

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

Micro e macro. Viaggio avventuroso tra atomi e galassie

This is a pre print version of the following article:

Original Citation:

Availability:

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/1579371> since 2016-07-01T06:11:47Z

Publisher:

il Mulino

Terms of use:

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)

Intersezioni

ooo.

I lettori che desiderano informarsi
sui libri e sull'insieme delle attività della
Società editrice il Mulino
possono consultare il sito Internet:

www.mulino.it

Werner Kinnebrock

Micro e macro

Un avventuroso viaggio tra atomi e galassie

il Mulino

ISBN 978-88-15-00000-0

Edizione originale: *Mikro und Makro. Von Galaxien und Atomen. Eine physikalische Reise*, München, Verlag C.H.Beck oHG, 2014. Copyright © 2014 by Verlag C.H.Beck oHG, München. Copyright © 2015 by Società editrice il Mulino, Bologna. Traduzione di Paola Rumore.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere fotocopiata, riprodotta, archiviata, memorizzata o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo – elettronico, meccanico, reprografico, digitale – se non nei termini previsti dalla legge che tutela il Diritto d'Autore. Per altre informazioni si veda il sito www.mulino.it/edizioni/fotocopie

Indice

Introduzione	p. 000
I. Misurare il mondo	000
1. Numeri e rappresentazioni numeriche	000
2. Infinitamente infinito?	000
3. Distanze spaziali e temporali	000
4. Massa ed energia	000
5. La geometria della natura	000
6. L'insieme di Mandelbrot	000
II. Un viaggio nel microcosmo	000
1. Rimpicciolire i riferimenti	000
2. Microrganismi: miliardi di miliardi	000
3. Il mondo delle molecole	000
4. Il DNA: i mattoncini della vita	000
5. L'immenso numero di molecole	000
6. Atomi	000
7. Il mondo della fisica quantistica	000
8. Particelle elementari	000
9. Fine corsa: il vuoto	000
III. Il macrocosmo: l'universo gigantesco	000
1. La dimensione del cosmo	000
2. L'universo: dalla nascita a oggi	000
3. Il futuro nell'universo	000
4. Le innumerevoli contingenze nell'universo	000
5. Problemi insoluti	000
6. Multiversi	000

Indice

Appendice	p. 000
A. I numeri complessi	000
B. Costruzione dell'insieme di Mandelbrot	000
Bibliografia	000
Figure	000

Introduzione

Nel 1870 venne chiesto all'inglese Eadweard Muybridge se un cavallo al galoppo si trovasse mai nella condizione di avere tutte e quattro le zampe sollevate dal suolo. Semplicemente osservando la corsa del cavallo non si riusciva a rispondere. Fortunatamente alcuni decenni prima era stata scoperta la fotografia e nel 1872, con l'aiuto di 24 macchine fotografiche, Muybridge stabilì che effettivamente un cavallo al galoppo rimane per qualche frazione di secondo completamente sospeso in aria.

Il nostro mondo è fatto di metri e di minuti. Tutto quel che accade al di fuori di questo mondo sfugge alla nostra percezione naturale. Tuttavia, grazie alla tecnologia – ad esempio, alle macchine fotografiche, ai microscopi e ai telescopi – riusciamo a gettare uno sguardo al di là del nostro orizzonte e a fare scoperte che altrimenti ci sarebbero rimaste precluse. Se vogliamo penetrare il mondo più in profondità non dobbiamo far altro che intraprendere sofisticati esperimenti e complesse deduzioni. È così che si sono scoperte le leggi della fisica quantistica e dell'universo in espansione. A un certo punto ci si è trovati di fronte a limiti che hanno fatto sorgere nuovi interrogativi ai quali non si era (ancora) in grado di rispondere. Il celebre fisico, Richard P. Feynman, era solito dire che in fin dei conti nessuno riesce davvero a capire la fisica quantistica. Finora sono stati vani gli stessi tentativi dei cosmologi di capire che cosa sono la materia e

l'energia «oscura» che costituiscono il 90% dell'energia dell'universo.

Alimentata dalla curiosità e dalla brama di nuove scoperte la sete di conoscenza ci ha condotto nell'affascinante policromia del microcosmo e verso l'immensità del macrocosmo. È così che, ad esempio, ci imbattiamo in stelle che sono 10 miliardi di volte più luminose del Sole (le *supernovae*). Nel 2012 venne scoperto un buco nero con una massa pari a 17 miliardi di masse solari. Per sorvolare in tutta la sua estensione la nostra galassia, la Via Lattea, con un airbus ci vorrebbero 120 miliardi di anni – quasi nove volte l'età dell'universo.

Il microcosmo è un mondo impressionante, sia per via della misteriosa codificazione delle informazioni genetiche che riposa in ultima istanza su quattro soli mattoncini, sia per l'incredibile numero di molecole che compongono ogni cosa. Se ad esempio si distribuisse un litro d'acqua in ugual misura tra tutti i mari del globo, ogni litro di acqua di mare – indifferentemente dell'Oceano Pacifico, del Mare del Nord o dell'Oceano Atlantico – conterrebbe all'incirca 12.000 molecole del litro iniziale. La fisica quantistica prevede una serie di fenomeni che Albert Einstein riteneva «spettrali»; oggi sappiamo però che questi fenomeni accadono davvero e che Einstein era in errore. Così, ad esempio, due fotoni correlati «sanno» l'uno dell'esistenza e del comportamento dell'altro, giacché funzionano come gemelli: si tratta del fenomeno dell'*entanglement*, per cui due fotoni con un'origine comune, ma che si trovano anni luce distanti tra loro, mantengono la loro correlazione iniziale.

Questo libro intende illustrare alcuni di questi fenomeni sorprendenti, descrivendo con uno stile divulgativo le teorie che vi stanno alla base. Nel primo

capitolo verranno pertanto introdotte in una maniera semplificata alcune nozioni preliminari, come quella di rappresentazione numerica, il concetto di «infinito», alcuni concetti fisici fondamentali come quello di massa ed energia, di spazio e geometria. Nel secondo capitolo si intraprenderà invece un viaggio nel microcosmo, il mondo dei microbi, delle molecole e delle particelle elementari, fino al vuoto, che è in realtà pieno di attività energetica. Il terzo e ultimo capitolo ci condurrà in direzione opposta, nel mondo dell'assolutamente grande. Partendo dalla Terra e passando per i pianeti, per il sistema solare e per la Via Lattea, attraverseremo l'universo, le sue immense galassie e... i suoi spazi vuoti. Comprimeremo lo sviluppo dell'universo nella durata di un anno: fissando l'esplosione originaria, il Big Bang, il 1° gennaio, riscontremo con sorpresa che la formazione delle Alpi avviene appena la sera del 29 dicembre e che l'uomo moderno fa la sua comparsa soltanto il 31 dicembre, poco prima della mezzanotte.

Abbiamo studiato e capito molto del mondo che ci circonda, ma quel che ci è ancora ignoto supera di gran lunga ciò che sappiamo. Assumere come riferimento assoluto il nostro mondo fatto di metri e di minuti fornisce spesso immagini distorte e fallaci, giacché sono davvero troppi i fenomeni che sfuggono alle nostre rappresentazioni inevitabilmente condizionate dal nostro concetto di spazio e di tempo. La fisica quantistica, per fare un esempio, non si può spiegare mediante le rappresentazioni della fisica classica, che ha un impianto fondamentalmente intuitivo. Occorre formulare teorie e descrizioni di quel che possiamo comprendere, rispettando al contempo la peculiarità di ciò che sfugge alla nostra comprensione, senza volerlo incasellare a tutti i costi nelle nostre concezioni riduttive. A questo proposito Goethe osservava: «La

più bella felicità dell'uomo pensante è di aver esplorato l'esplorabile e di venerare tranquillamente l'inesplorabile».

Questo libro ci permette di gettare uno sguardo sulla fisica atomica, sulla genetica, sulla fisica quantistica, sull'astrofisica e sulla cosmologia. È rivolto a chi desidera farsi un'idea di questi ambiti di ricerca a partire da una prospettiva laica. Essendo le questioni molte e variegate, il grado di approfondimento dei singoli temi sarà per forza di cose limitato. Chi desidera informazioni più approfondite troverà opportune indicazioni nella bibliografia.

Misurare il mondo

Non definisco il tempo, lo spazio, il luogo
e il movimento, dal momento che tutti
sanno che cosa sono.

Isaac Newton

Se si vuole «misurare» la natura occorre avere a disposizione delle unità di misura che esprimano la lunghezza, il tempo, la massa, l'energia e svariate altre grandezze. Normalmente misuriamo le cose in metri, minuti, grammi e così via: il nostro mondo è fatto di metri e di minuti. Invece, i fenomeni del mondo della natura vengono colti per mezzo di altri ordini di grandezze: i micro e macrosecondi, gli anni-luce, i parsec. Per esprimere queste misure ci occorre un linguaggio diverso da quello comune: grazie alle formalizzazioni della matematica riusciamo a rappresentare comodamente questi altri ordini di grandezza.

In questo primo capitolo ci occuperemo della rappresentazione dei numeri, delle unità di misura dell'universo, della massa, dell'energia, del concetto di «infinito» e della geometria della natura.

1. *Numeri e rappresentazioni numeriche*

Nel nostro viaggio incontreremo numeri enormemente grandi e estremamente piccoli; numeri che valicano i confini di qualsiasi ordine di grandezza consueto, ma che sono indispensabili per descrivere il micro e il macrocosmo. Essi concernono un tipo di

rappresentazione che in matematica si chiama *rappresentazione esponenziale*. In questo paragrafo proviamo a descriverli un po' più da vicino.

Sappiamo che oggi il debito pubblico della Germania si aggira sui 2.000.000.000.000 euro, cioè due miliardi di euro. Introducendo una notazione più breve possiamo sostituire i 12 zeri di questa lunga sfilza in questa maniera: 2×10^{12} . Così: $1.000.000 = 10^6$; $1.000 = 10^3$, e così via. Il numero 1 non ha zeri, quindi $1 = 10^0$.

Come vedremo nel capitolo II.6, in un cm^3 di aria ci sono 27.000.000.000.000.000.000, vale a dire 27 trilioni, di molecole; possiamo rappresentarlo in questo modo: 27×10^{18} .

Facciamo ancora un esempio: un libro pesa circa 200 grammi. Poiché la materia è composta essenzialmente da neutroni e protoni che chiamiamo nucleoni, il libro è composto all'incirca di 10^{26} nucleoni.

Quanto pesa un atomo di idrogeno? 0,00000000000000000000000017 kg. Possiamo rappresentare anche questo numero in una maniera più elegante, così: 17×10^{-26} .

Ad esempio:

$$\begin{aligned} 0,1 &= 1/10 = 10^{-1} \\ 0,01 &= 1/100 = 10^{-2} \\ 0,005 &= 5/1000 = 5 \times 10^{-3} \\ &\text{e così via.} \end{aligned}$$

Gli esponenti negativi rappresentano delle frazioni e ci consentono di rappresentare numeri estremamente piccoli in maniera assai più breve e persino elegante.

2. Infinite volte infinito?

2.1. L'infinito in natura

In natura si incontra mai il concetto di «infinito»? Non lo sappiamo. Sappiamo perlomeno che è un concetto possibile della cosmologia. Si pensa che l'universo sia piatto, che si estenda cioè come un piano all'infinito. In un universo piano funziona la geometria che impariamo a scuola, la cosiddetta «geometria euclidea» che prende il nome dal matematico greco Euclide. Lo spazio potrebbe estendersi all'infinito come un piano. Invece, la geometria che descrive le superfici curve, come quella della sfera, è detta «non euclidea». La superficie di un cilindro, di una camera d'aria di una ruota ecc. sono anch'esse superfici euclidee: i matematici parlano di «toro o toroide». L'universo potrebbe avere all'incirca la forma di un toroide (un toroide quadridimensionale con una «superficie» tridimensionale, un «ipertoro»). In questo caso non sarebbe infinitamente esteso, eppure ancora euclideo.

Ma analizziamo un po' più da vicino il concetto di «infinito». Oggi non sarebbe possibile concepire la matematica senza il concetto di infinito, e neppure le sue eleganti rappresentazioni della natura.

Nel 1900, a Parigi, il celebre matematico di Göttinga David Hilbert tenne una conferenza in cui Georg F.L.P. Cantor veniva celebrato come uno dei massimi matematici del XIX secolo. Il merito di Cantor era l'introduzione del concetto di «infinito» nella teoria astratta degli insiemi, un'operazione che secondo Hilbert rappresentava «l'espressione più stupefacente dello spirito matematico». Hilbert esortava al contempo i matematici a superare le incertezze che

ancora tormentavano la loro disciplina all'inizio del secolo. Non poteva presagire che appena trent'anni più tardi uno dei massimi matematici del XX secolo, Kurt Gödel, avrebbe dimostrato che in matematica vi sono asserzioni che in linea di principio non sono né dimostrabili, né confutabili.

2.2. L'«infinito» in numeri

La forma più semplice di infinito, rappresentata dal simbolo ∞ , si trova nei numeri 1, 2, 3, 4, 5, ... Questi sono numeri naturali, che si danno in una molteplicità infinita, tant'è che si può contare all'infinito.

Se l'insieme dei numeri interi è infinitamente grande, allora lo è anche l'insieme di tutti i numeri possibili, vale a dire dei numeri interi, dei decimali, delle frazioni, dei numeri negativi e positivi. Questi «numeri reali» sono essenzialmente un insieme più grande di quello dei numeri interi; sicché dobbiamo supporre che l'infinito dei numeri reali sia maggiore di quello dei numeri interi. Si può dimostrare che le cose stanno effettivamente così.

Cionondimeno, i numeri reali presentano per certi versi delle proprietà curiose. Se chiamiamo M tutti i numeri tra 0 e 1, e se R è l'insieme di tutti i numeri reali da meno infinito a più infinito, allora è evidente che R contiene l'insieme M . L'insieme M è un sottoinsieme di R (come si vede nella fig. 1.1, in cui l'insieme di punti più scuri è una parte dell'insieme più chiaro). È ovvio che M contiene un'infinità di numeri, esattamente come R .

La matematica afferma quindi che R e M sono equipollenti, ossia che entrambi gli insiemi possiedono la medesima quantità infinita di numeri.

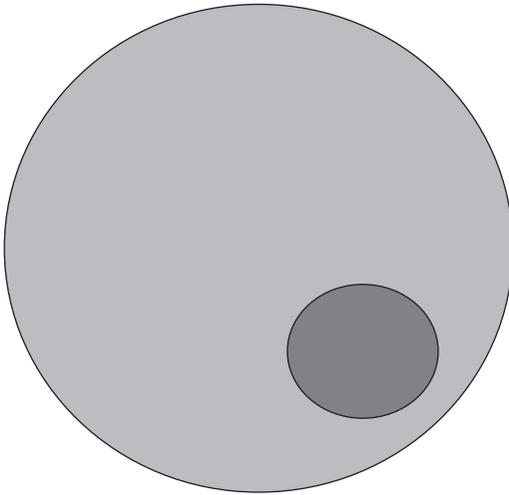


FIG. 1.1. L'insieme più scuro è un sottoinsieme dell'insieme più chiaro. Entrambi gli insiemi contengono la medesima quantità infinita di punti.

Questo risultato può venir trasposto sui punti di un piano. Nella figura 1.1 l'insieme di punti più scuri è un sottoinsieme dell'insieme più chiaro. Entrambi gli insiemi contengono la medesima quantità infinita di punti, entrambi sono ugualmente infiniti, quindi entrambi hanno un'uguale quantità di punti. Ciò è assolutamente controintuitivo, eppure la matematica riesce a dimostrarlo. I matematici chiamano l'infinito dei numeri interi «infinito numerabile», e l'infinito di tutti i numeri reali «infinito del continuo».

2.3. Quanti «infinito» ci sono?

Finora abbiamo incontrato due tipi di infinito, quello dei numeri naturali (1, 2, 3, ...) e quello di tutti

i numeri reali. Uno è più piccolo dell'altro. Occorre domandarsi se non vi siano altri «infinito», eventualmente ancora più grandi.

Per scoprirlo consideriamo l'insieme dei numeri 1, 2 e 3, che rappresentiamo in questo modo:

$$M = \{1, 2, 3\}.$$

Togliamo il numero 1 e otteniamo un sottoinsieme T , per cui $T = \{2, 3\}$. Quanti sottoinsiemi di questo tipo contiene M ? Evidentemente questi:

$$\{1\} \{2\} \{3\} \{1, 2\} \{1, 3\} \{2, 3\} \{1, 2, 3\}.$$

Comunemente si indica l'insieme vuoto, quello che non contiene elementi, con il simbolo $\{\}$ e lo si considera comunque un sottoinsieme. Formando l'insieme $P(M)$ di tutti i sottoinsiemi di M otteniamo un nuovo insieme:

$$P(M) = \{\{\}, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1, 2\}, \{1, 3\}, \{2, 3\}, \{1, 2, 3\}\}.$$

Ne risultano esattamente 8 sottoinsiemi:

$$(8 = 2 \times 2 \times 2 = 2^3).$$

In generale vale che un insieme con n elementi ha esattamente 2^n sottoinsiemi. L'insieme di questi sottoinsiemi si chiama «insieme delle parti». Un insieme delle parti delle 26 lettere dell'alfabeto tedesco ha quindi $2^{26} = 67.108.864$ insiemi parziali. Ogni parola tedesca che non contiene due lettere uguali è, ad esempio, un elemento di uno di questi sottoinsiemi.

Ovviamente potremmo formare anche l'insieme delle parti di un insieme infinito, come ad esempio di

quello dei numeri naturali. Anche questo insieme delle parti avrebbe a sua volta una quantità infinita di elementi. Si può dimostrare matematicamente che la cardinalità (ossia la numerosità o potenza) di un insieme delle parti è maggiore della cardinalità dell'insieme originario. Ciò significa che il numero degli elementi dell'insieme delle parti ha un infinito maggiore che nell'insieme originale. Detto in maniera più precisa: se formiamo tutti i sottoinsiemi possibili dell'insieme di tutti i numeri naturali (1, 2, 3, 4, 5, ...), essi saranno in numero infinito. Questo infinito è maggiore dell'infinito dei numeri naturali.

Da ciò segue una considerazione interessante: sia N l'insieme dei numeri naturali. Come si è detto, l'insieme delle parti $P(N)$ ha come propria cardinalità un infinito maggiore di N . Se ora formiamo l'insieme delle parti di $P(N)$, quindi $P(P(N))$, otteniamo un infinito ancora maggiore. Possiamo procedere in eterno e continuare a formare nuovi insiemi delle parti. Otterremo sempre nuovi insiemi con infiniti ancora maggiori. Sicché ci sono infinitamente tanti «infinito».

3. Distanze spaziali e temporali

3.1. Misurare la distanza nel micro e macrocosmo

Dopo questo viaggio attraverso il mondo dei numeri grandi e piccoli che ci ha condotto fino al concetto di infinito, diamo ora un'occhiata alle grandezze fondamentali della fisica. Possiamo misurare una lunghezza con un regolo, con un righello o come preferiamo, ma la esprimeremo sempre in metri.

Poiché viviamo in un mondo fatto di metri e di minuti, i metri sono più che sufficienti a misurare quel ci

circonda. Nello spazio cosmico, invece, ci imbattiamo in ordini di grandezze che vanno ben al di là della nostra capacità di immaginazione e per i quali si rendono necessarie unità di misura diverse. Come grandezza fondamentale assumiamo la luce, che si muove a una velocità di circa 300.000 km/s. A questa velocità, essa gira per oltre sette volte intorno alla Terra in un secondo. La luce è formata da particelle che si chiamano «fotoni»; pertanto queste particelle si muovono a 300.000 km/s, il che significa che in una settimana percorrono $1,8 \times 10^{11}$ km e in un anno $9,4 \times 10^{12}$ km, quindi 9.400.000.000.000 km.

Questa distanza viene detta «anno luce». La stella che ci è più vicina, la *Proxima centauri*, dista da noi circa 4 anni luce. Ciò significa che la sua luce, che vediamo oggi, è partita quattro anni fa. Alcune stelle distano dalla Terra decine di migliaia di anni luce. Quando le osserviamo dobbiamo tenere conto che la loro luce è stata irradiata quando sulla Terra ancora non c'erano esseri umani. La Via Lattea, la nostra galassia, ha un diametro di oltre 100.000 anni luce; altre galassie distano dalla Terra miliardi di anni luce.

Le distanze immense del cosmo hanno indotto gli astronomi a introdurre una nuova unità di misura: il *parsec* (ossia «parallasse di un secondo d'arco»). Un parsec è la distanza da cui si vede il diametro dell'orbita della terrestre con l'angolo di 1 secondo di grado, che corrisponde a $1/3.600$ di grado, ossia a 0,000278 gradi. Detto altrimenti: se nello spazio vedo l'orbita terrestre da lontano come una sfera minuscola, con un diametro di 1 secondo d'arco, vuol dire che disto 1 parsec dalla Terra. Ossia:

$$1 \text{ parsec} = 3,2616 \text{ anni luce} = 3,0857 \times 10^{16} \text{ metri.}$$

Se ci muoviamo lungo una linea retta siamo in una direzione unidimensionale. Il piano ha due dimensioni, lo spazio tre. I fisici non hanno nessuna difficoltà a operare con spazi quadrimensionali, per quanto, nonostante i calcoli siano abbastanza semplici, non ce li si riesce a rappresentare. Solitamente la quarta dimensione è il tempo. I matematici operano normalmente con spazi a sette, otto e persino cento dimensioni. Di per sé non è una cosa complicata; la difficoltà sta nel fatto che noi riusciamo a rappresentarci soltanto uno spazio tridimensionale, come quello in cui viviamo.

Se assumiamo il tempo come quarta dimensione dobbiamo tenere conto di una cosa: nello spazio possiamo muoverci in avanti e indietro come ci pare, mentre nel tempo ciò non è possibile. Il tempo non prevede un «indietro», procede inesorabilmente in avanti secondo dopo secondo, e noi con esso. Nel cosmo non esiste però un orologio globale che scandisce un tempo unico per tutti: fu proprio Albert Einstein a scoprire che il tempo è relativo. Ma che cosa significa? Significa che in un razzo lanciato ad alta velocità il tempo procede più lentamente che quello del nostro orologio. Quanto più velocemente ci muoviamo, tanto più lentamente scorre il tempo. Alle velocità a cui siamo abituati, però, questa differenza (che i fisici chiamano «distorsione temporale») è straordinariamente piccola. Invece, alla velocità della luce – se solo la si potesse raggiungere – il tempo si ferma.

Ma esistono sistemi cosmici in cui non esiste il tempo? Forse le religioni hanno in mente qualcosa del genere quando parlano di «eternità»? Ludwig Wittgenstein sosteneva che «se per eternità non s'intende l'infinita durata nel tempo, ma l'atemporalità, allora vive in eterno chi vive nel presente».

TAB. 1.1. *Le unità di misura della lunghezza*

Denominazione	Simbolo	In metri	Corrispondenza	Applicazione
Yottametro	Ym	10^{24}		
Zettametro	Zm	10^{21}		
Exametro	Em	11^{18}		
Petametro	Pm	10^{15}		
Terametro	Tm	10^{12}		
Gigametro	Gm	10^9	1.000.000 km	
Megametro	Mm	10^6	1.000 km	Oceanologia
Kilometro	km	10^3	1.000 m	
Ettometro	hm	10^2	100 m	Artiglieria, marina
Decametro	dam	10^1	10 m	
Metro	m	10^0		Unità di misura di base
Decimetro	dm	10^{-1}	10 cm	
Centimetro	cm	10^{-2}		
Millimetro	mm	10^{-3}	0,001 m	
Micrometro (micron)	μm	10^{-6}	0,001 mm	
Nanometro	nm	10^{-9}		Informatica
Ångström	Å	10^{-10}	100 pm	Fisica atomica
Picometro	pm	10^{-12}		
Femtometro (fermi)	fm	10^{-15}		Fisica delle particelle
Attometro	Am	10^{-18}		
Zeptometro	Zm	10^{-21}		
Yoctometro	ym	10^{-24}		

TAB. 1.2. *Le unità di misura delle distanze astronomiche*

Anno luce	al	$9,5 \times 10^{15}$ m
Parsec	pc	$3,0857 \times 10^{16}$ m
Megaparsec	mpc	10^6 pc

3.2. *Lo spazio: un enigma della fisica*

Che cos'è lo spazio? Per i fisici questa è una delle questioni più misteriose; in fin dei conti nessuno sa davvero che cosa esso sia. Nelle immensità del cosmo siamo circondati dallo spazio; ma lo spazio cosmico è

perlopiù vuoto, e così pure l'interno degli atomi. Se si comprimesse un palazzo di 20 piani in maniera da eliminare tutto lo spazio vuoto che c'è negli atomi, non rimarrebbe che un ammasso grande come un chicco di riso, ma con un peso di centinaia di milioni di kg. Tutto il resto non è che spazio vuoto: l'atomo è fatto per il 99,999 % di nulla (cfr. cap. II, par. 6.3).

Newton concepiva lo spazio come un palcoscenico su cui andava in scena il «dramma degli eventi cosmici». Quest'idea di uno spazio fisso, reale e assoluto gli consentiva di descrivere con grande precisione i movimenti che avvenivano al suo interno. Questa concezione rimase valida fino al 1905, quando si scoprì che la luce si muove sempre a 299.792,458 km/s, ossia a 1,08 miliardi km/h. È sorprendente che la luce riesca a mantenere questa velocità costante, indipendentemente dalla direzione assunta di volta in volta.

La stranezza di questo fenomeno emerge chiaramente da quest'esempio. Immaginatoci una scala mobile che sale di un metro al secondo. Se stiamo fermi, la scala ci fa salire esattamente a quella velocità. Se però, stando sulla scala, ci muoviamo a nostra volta di un metro al secondo, complessivamente saliamo di due metri al secondo, ossia la velocità della scala più la nostra. Applichiamo ora queste considerazioni alla luce: immaginatoci di viaggiare su un'auto che percorre un'autostrada alla velocità di 120 km/h. È buio e abbiamo i fari accesi, che mandano pertanto la luce nella direzione di marcia. La luce deve muoversi a una velocità pari alla velocità della luce più quella dell'auto, quindi una somma di velocità analoga a quella che si era prodotta sulla scala mobile. Ma luce viaggia a 299.792,458 km/s, indipendentemente dalla velocità dell'auto. Anche se la macchina riuscisse ad andare alla

metà della velocità della luce, ciò non cambierebbe in alcun modo la situazione: la luce continuerebbe a viaggiare a 299.792,458 km/s; sicché la velocità dell'auto non ha nessuna importanza. Ciò è in contrasto con ogni nostra concezione e non dovrebbe essere possibile sulla base delle leggi fisiche elementari che conosciamo. Cionondimeno gli esperimenti mostrano che le cose vanno proprio così.

Una volta scoperto questo fenomeno, nel 1880, gli scienziati rimasero interdetti; ma nel 1900 un impiegato dell'ufficio brevetti di Berna di nome Albert Einstein trovò la soluzione. Se la velocità della luce non si comporta secondo le leggi dello spazio e del tempo, saranno allora lo spazio e il tempo a venir determinati dalla velocità della luce. Ciò significa che spazio e tempo si deformano in maniera da consentire che la velocità della luce del faro dell'auto rimanga costante e non cambi a seconda della velocità dell'auto.

Questa scoperta comporta conseguenze notevoli. Per un'auto che procede velocemente lo spazio nella direzione di marcia si accorcia e il tempo scorre più lentamente. Tuttavia la deformazione dello spazio alle velocità a cui siamo abituati è talmente piccola che non la si riesce a misurare. Se invece viaggiassimo alla metà della velocità della luce, ecco che la deformazione di spazio e tempo diventerebbe rilevante. Einstein ha raccolto tutte queste considerazioni nella sua *teoria della relatività speciale o ristretta*. Qui lo spazio non è più concepito come un qualcosa di statico – come aveva creduto Newton – ma come dinamico, ossia capace di deformarsi. Lo spazio non è più quella medesima cosa che ci rappresentiamo come un «luogo» quando ci muoviamo in esso.

Ma accadde di peggio. Newton riteneva che la forza d'attrazione delle stelle fosse una forza miste-

riosa che eravamo in grado di descrivere, ma non di spiegare. Einstein si chiese come poteva agire una forza del genere in uno spazio non più assoluto, ma deformabile. Ci vollero dieci anni, ma alla fine formulò la *teoria della relatività generale*: se lo spazio è in grado di deformarsi, allora riesce anche a curvarsi. Facciamo un esempio. Una superficie di gomma con al centro qualcosa di pesante si affossa al centro; se vi dispongo sui bordi delle palle da tennis, queste rotolano inevitabilmente verso il punto più profondo della superficie, ossia nella direzione dell'oggetto pesante posto al centro. Così accade nel cosmo. I corpi celesti, come la Luna, sono attratti dai corpi più pesanti, come la Terra: lo spazio cosmico è incurvato come quella superficie di gomma. La legge di gravità si fonda proprio su questo principio: la forza d'attrazione delle stelle è un effetto dell'incurvatura dello spazio.

Lo spazio è incurvato per via della materia. Potrebbe essere come la superficie di una sfera, con la differenza che la sfera è bidimensionale, mentre lo spazio – nella sua curvatura – è tridimensionale. Non riusciamo a rappresentarci la curvatura dello spazio, ancorché, di nuovo, la sua formulazione matematica non sia particolarmente complessa. Sicché, in linea di principio lo spazio potrebbe essere la «superficie» di una sfera quadridimensionale, dove però questa «superficie» sarebbe tridimensionale, quindi il nostro spazio consueto. Ci torneremo nel capitolo III.

Si tenga infine presente che uno spazio vuoto – il «vuoto» – non è mai davvero vuoto. La fisica quantistica ci dice che in quello spazio vi sono particelle che si formano e si disintegrano continuamente. Per una descrizione più precisa di questo fenomeno si rimanda al capitolo II, 9.

4. Massa ed energia

La massa è un'altra grandezza fondamentale. Spesso viene confusa con il peso. Il peso è l'effetto della forza di gravità, mentre la massa non ha nulla a che fare con la gravità. Un astronauta nello spazio ha massa, ma non ha peso, dal momento che nello spazio cosmico non c'è gravità. Sulla Terra, però, la massa e il peso sono proporzionali l'uno all'altro e la misura della massa può venir espressa attraverso il peso. Ogni corpo ha una massa, fatta eccezione per i fotoni privi di massa.

Ogni massa contiene energia. La celebre formula $E=mc^2$ descrive proprio questo rapporto: m indica la massa, c la velocità della luce e E l'energia contenuta nella massa. La formula si deriva dalla teoria della relatività speciale di Albert Einstein.

Poiché c è un numero esorbitante, l'energia contenuta nella massa è enorme. Se volessimo trasformare 1 grammo di materia interamente in energia, otterremmo tanta energia da soddisfare il fabbisogno elettrico di mezzo milione di famiglie per un giorno intero. Tuttavia questa trasformazione della massa in energia è possibile solo parzialmente; questo processo è meglio noto come *reazione nucleare*: gli atomi di uranio (^{235}U) bombardati da neutroni si disintegrano in atomi più leggeri come kripton, bario ecc. (la cosiddetta *fissione nucleare*). Se misuriamo il peso dell'atomo di uranio prima della fissione e il peso della somma di tutti i prodotti della fissione vediamo che quest'ultimo è inferiore al peso dell'atomo di uranio. Ciò significa che con la fissione si perde massa, che si trasforma in energia. Indicando la massa che si è perduta con Δm , abbiamo che l'energia ottenuta è $E = \Delta m \times c^2$.

L'energia si presenta in diverse forme: calore, energia cinetica, luce, elettricità. Ogni forma di energia può trasformarsi in un'altra e la quantità complessiva rimane immutata. Facciamo un esempio: un centometrista ha un'energia potenziale pari a $E = mc^2$, dove m è la sua massa corporea; quando corre una parte di questa energia si trasforma in energia cinetica, secondo la formula $E_B = 1/2mv^2$. Essa rappresenta una frazione minima della sua energia a riposo, che viene impiegata come energia cinetica, all'incirca 0,000000000000001 ossia 10^{-15} .

5. *La geometria della natura*

5.1. *Geometria naturale e geometria euclidea*

Le cose prodotte dall'uomo – le case, le macchine, le strade, i campi e le fabbriche – hanno strutture geometriche che sono una versione idealizzata e semplificata delle strutture presenti in natura. Vi sono linee rette, cerchi, ellissi, segmenti e piani. Fu Euclide il primo a descrivere questi oggetti e a ordinarli in quella particolare geometria che ha successivamente preso il suo nome. La quadratura del cerchio, il teorema di Pitagora e il teorema di Talete descrivono le proprietà di questi oggetti.

In natura, però, non si incontrano mai gli oggetti della geometria euclidea. La geometria della natura è fatta di linee storte, di piani spiegazzati, di corpi con superfici irregolari. Cerchi, ellissi e rette non si trovano da nessuna parte. È vero che l'orbita descritta dal Sole intorno alla Terra è un'orbita ellittica, ma a ben vedere non si tratta di un'ellissi perfetta, perché è soggetta all'azione di disturbo esercitata dagli altri pianeti. E

che cosa accade con la luce? I raggi non si propagano forse in linea retta? La risposta è no: il raggio di luce viene deviato dall'attrazione della materia vicina (gravitazione) e si muove quindi su una linea storta. Gli elementi della geometria euclidea sono pertanto semplici costrutti mentali. Non descrivono la realtà come è in natura, ma prodotti umani.

Quali sono allora gli elementi della geometria naturale, del macro e del microcosmo? Prendiamo ad esempio una montagna. La forma è descritta da linee che salgono e scendono in maniera irregolare. Incominciamo ad arrampicarci. Saliamo per vie a tratti più ripide, a tratti meno; le irregolarità continuano. Guardiamo ora la terra sotto di noi: ecco che di nuovo manca una struttura regolare. Persino le foglie degli alberi, pressoché innumerevoli, hanno ognuna la propria forma particolare. Guardiamo in alto: ecco le nuvole. Ognuna ha la propria struttura e i propri bordi irregolari. Nel complesso le nuvole del cielo costituiscono un insieme dotato di un proprio valore estetico, formato da molte immagini particolari dai bordi irregolari.

Analoghe considerazioni si possono fare a proposito delle coste dei mari. Sulle cartine osserviamo linee irregolari e dentellate. Anche se ne ingrandiamo una parte, l'immagine non cambia.

Ecco che qui incontriamo una delle prime proprietà della geometria naturale: esaminando le parti di un oggetto geometrico, ad esempio con una lente, vediamo che le strutture geometriche si ripetono in maniera simile. Gli studiosi della teoria del caos chiamano questa proprietà «autosimilarità». Ne facciamo esperienza osservando – come si è detto – le coste, le foglie, i fiori, le nuvole, gli alberi, i profili delle montagne ecc. Ma l'autosimilarità si osserva particolarmente bene nel caso dei fiocchi di neve (cfr. cap. II, par. 3.2

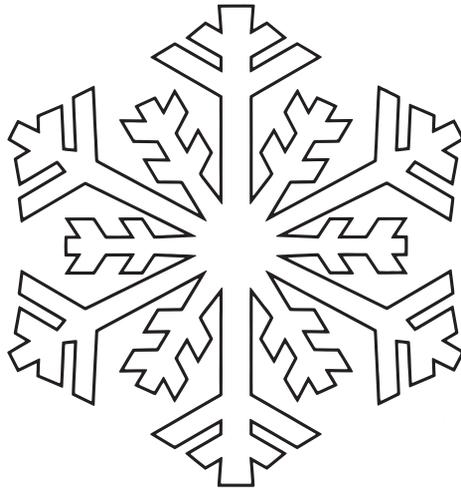


FIG. 1.2. Una delle strutture fondamentali che può presentare un fiocco di neve, come esempio di figura autosimile.

e fig. 1.2). Le loro svariate articolazioni interne si sviluppano in maniera sempre simile e con velocità simile mentre essi cadono da un'altezza elevata. Da qui deriva la loro autosimilarità.

5.2. I limiti della misurabilità

Osserviamo la costa di un'isola e cerchiamo di misurarne la lunghezza. In prima approssimazione ci serviamo dell'aiuto di una cartina. Il risultato è ovviamente frutto di un'idealizzazione, il cui grado di precisione dipende dal criterio di misurazione assunto. Sicché il valore che ottengo è impreciso. Decidiamo dunque di percorrere la costa misurando ogni passo. Il valore che otteniamo in questa maniera è più preciso e

probabilmente più grande, dal momento che teniamo conto di tutte le piccole insenature che non erano riportate sulla cartina. Se volessimo poi infine misurare la costa con una precisione microscopica, considerandone anche le minime sporgenze, è probabile che otterremmo un valore immenso.

Pertanto è evidente che il valore della lunghezza della costa che assumiamo dipende dal nostro metro di misurazione. Il fatto di considerare o di tralasciare i minimi dettagli influisce sul risultato finale.

Quando arriveremo a occuparci della fisica quantistica (cfr. cap. II, par. 7.3) vedremo che nel microcosmo i valori delle misurazioni dipendono sempre dall'osservatore, ossia da chi esegue la misurazione.

Attraverso i processi di misurazione è possibile quantificare le grandezze date in natura. In questo modo riusciamo a ordinarle in un'immagine del mondo che siamo in grado di governare.

5.3. Geometrie frattali

Le forme naturali appena descritte non hanno nulla a che fare con gli oggetti classici della geometria euclidea; esse costituiscono piuttosto quella che si è soliti chiamare «geometria frattale».

Nell'epoca dei computer si è riusciti a generare immagini frattali mediante semplici algoritmi. La loro antenata era una curva autosimile, generata dal matematico svedese Helge Koch nel 1904 e chiamata, appunto, la «curva di Koch». Essa ricopre soltanto una parte della superficie, sta su un francobollo, ma è infinitamente lunga.

La costruzione della curva di Koch è semplice (fig. 1.3): un segmento viene suddiviso in tre parti e

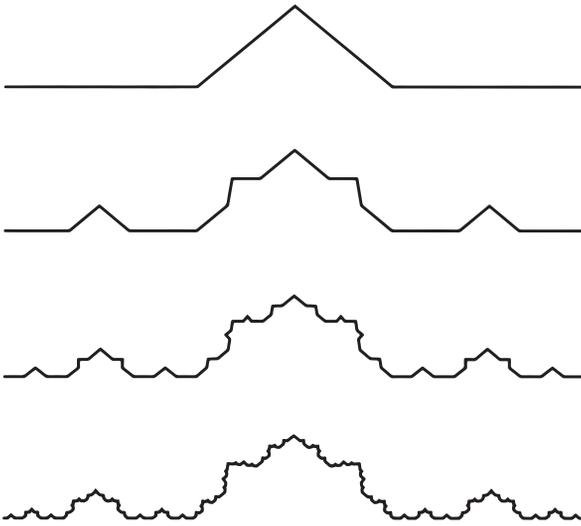


FIG. 1.3. La curva di Koch.

nella parte centrale si inserisce una sporgenza di forma triangoidale (prima curva). Dopodiché (seconda curva) si ripete l'operazione per ognuno dei quattro segmenti che si sono così generati. L'operazione può venir ripetuta a piacimento: la curva diviene autosimile e sempre più articolata. Un semplice calcolo ci dice che ogni nuova curva è più lunga della precedente di $4/3$ (se la sporgenza che si è inserita nel segmento centrale ha la forma di un triangolo equilatero e se i segmenti hanno tutti la medesima lunghezza).

È evidente che in questo modo le curve saranno lunghe quanto vogliamo. Se la prima (fig. 1.3) misura 10 cm, l'ottava sarà $10 \times (4/3)^7 = 74,9$ cm, la quindicesima $10 \times (4/3)^{14} = 561$ cm e la centesima addirittura $10 \times (4/3)^{99} = 233$ milioni di km se si procede con l'operazione $(4/3)^n$ n all'infinito, la curva diventerà infinitamente lunga.

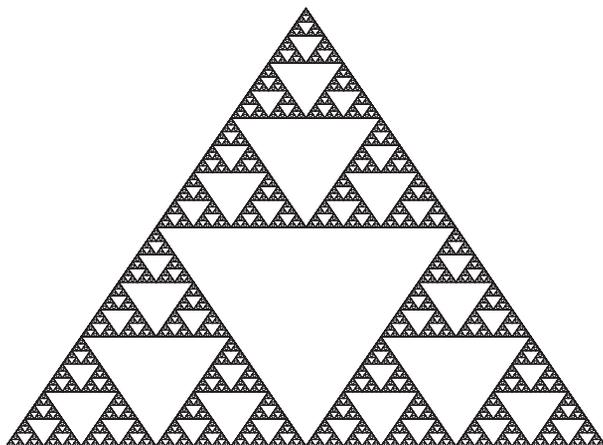


FIG. 1.4. Il triangolo di Sierpiński, un esempio di figura autosimile.

Un tipico esempio di figura autosimile è il triangolo di Sierpiński (fig. 1.4), che prende il nome dal matematico polacco Waclaw Sierpiński (1882-1969). Questo triangolo è autosimile in ogni sua parte. Osservandolo con una lente d'ingrandimento si vede che ogni sua minima porzione presenta la medesima struttura, qualsiasi sia il livello di ingrandimento adottato; e così all'infinito. Il triangolo di Sierpiński si ottiene in questo modo:

1. disegnare un triangolo;
2. unire la metà dei tre lati, così da ottenere 4 triangoli;
3. eliminare il triangolo centrale e mantenere i restanti 3;
4. ripetere le operazioni ai punti 2. e 3. sui triangoli restanti, e così via.

Sia la curva di Koch, sia il triangolo di Sierpiński sono esempi di figure autosimili presenti anche in natura.

La matematica – che comprende la geometria – è il linguaggio della fisica. Come abbiamo visto, noi descriviamo la natura che ci circonda attraverso immagini idealizzate, il cui contenuto è per così dire una «riduzione» di quel che c'è in natura. Cerchi, rette e ellissi si danno esclusivamente nelle nostre rappresentazioni. Cionondimeno queste rappresentazioni devono riuscire a esprimere i processi della natura. Gli studiosi della teoria del caos – il cui compito è descrivere la discrepanza tra la natura e le nostre rappresentazioni idealizzate – sanno bene che le imprecisioni sono inevitabili.

5.4. *La galleria dei mostri*

Come sappiamo la retta ha una sola dimensione, la superficie due e lo spazio tre. Esistono anche spazi a quattro o cinque dimensioni? I fisici ritengono che lo spazio tridimensionale e il tempo formino insieme uno spazio quadrimensionale: lo «spaziotempo». Sappiamo anche che noi non riusciamo a rappresentarci spazi a più di tre dimensioni. Tuttavia i matematici riescono benissimo a lavorare su spazi a cinque, sei, cento dimensioni. Come si è detto, la matematica necessaria a compiere queste operazioni non è particolarmente complicata.

Intuitivamente le dimensioni si indicano sempre con numeri interi, ossia nella serie 1, 2, 3. Un filo di seta ha 1 dimensione. Se lo trasformiamo in stoffa avrà 2 dimensioni. Se ripieghiamo la stoffa su se stessa otteniamo un oggetto a 3 dimensioni.

Ma esiste una curva matematica che ricopre un'intera superficie, proprio come il filo di seta dell'esempio appena descritto? In questo caso la curva si dovrebbe sviluppare su un piano, percorrendone tutti i punti

– nessuno escluso – e senza mai intersecarsi. Effettivamente nel 1890 Giuseppe Peano scoprì una curva del genere, che in matematica si chiama appunto «curva di Peano». Successivamente vennero scoperte altre curve che ricoprivano una superficie intera, e che procurarono qualche grattacapo ai matematici. Infatti, le curve sono oggetti monodimensionali; ma se sono in grado di ricoprire una superficie saranno anche essere bidimensionali. Il matematico Henri Poincaré ha chiamato questo tipo di curve la «galleria dei mostri».

Un altro esempio è la curva di Koch, che abbiamo già incontrato. Attraverso il calcolo dei limiti – di cui qui non ci occuperemo – si riesce a stabilire la dimensione della figura e si resta stupefatti: la dimensione della curva di Koch (per $n \rightarrow \infty$) è 1,26285; quella del triangolo di Sierpiński è $\log_2 3 = 1,58496 \dots$. Si parla, in questi casi, di «dimensione frattale». Nel 1977 Benoît B. Mandelbrot scoprì attraverso calcoli informatici altre figure la cui dimensione non era un numero intero. Se si calcola la dimensione delle linee costiere britanniche si ottiene il valore 1,26.

6. *L'insieme di Mandelbrot*

Benoît B. Mandelbrot era nato nel 1924 a Varsavia e, durante l'occupazione nazista, era fuggito con i genitori a Parigi. Qui aveva studiato ingegneria aerea e linguistica, acquisito conoscenze nel campo delle scienze economiche e iniziato la collaborazione con il celebre matematico John von Neumann. Anni dopo si sarebbe trasferito al Thomas Watson Research Center dell'IBM a New York.

Mandelbrot si occupava, tra il resto, di geometria frattale. Nel suo libro *The Fractal Geometry of Nature*

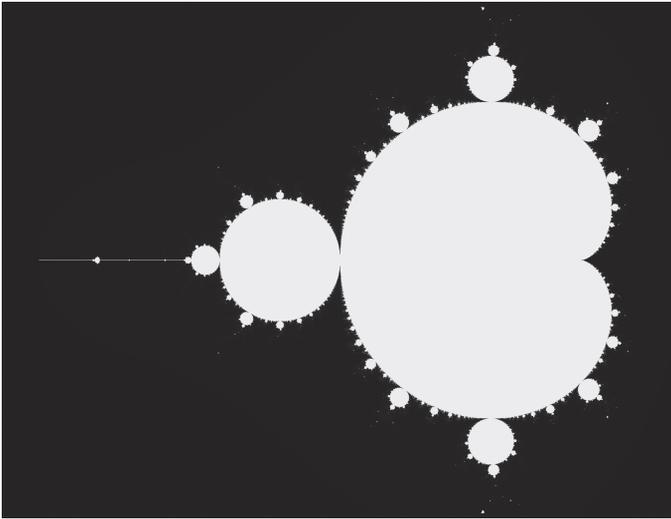


FIG. 1.5. L'insieme di Mandelbrot.

scriveva: «Le nuvole non sono sfere, le montagne non sono coni, le linee costiere non sono archi circolari, la corteccia non è liscia, e nemmeno il fulmine si muove su una retta». Mandelbrot riteneva fossero «frattali» persino determinate strutture dei mercati finanziari. Scoprì strutture matematiche autosimili, come gli oggetti naturali, che si potevano costruire mediante procedimenti matematici elaborati al computer. Si tratta del cosiddetto «insieme di Mandelbrot» (fig. 1.5), un insieme di punti su un piano. Questa immagine viene anche comunemente detta «l'omino a forma di mela».

Le strutture davvero interessanti si trovano sulla zona di confine tra il chiaro e l'oscuro. Ingrandendo i margini appaiono immagini straordinarie da un punto di vista estetico, come si vede ad esempio nella figura 1.6. Mandelbrot osservava: «Questo insieme è una

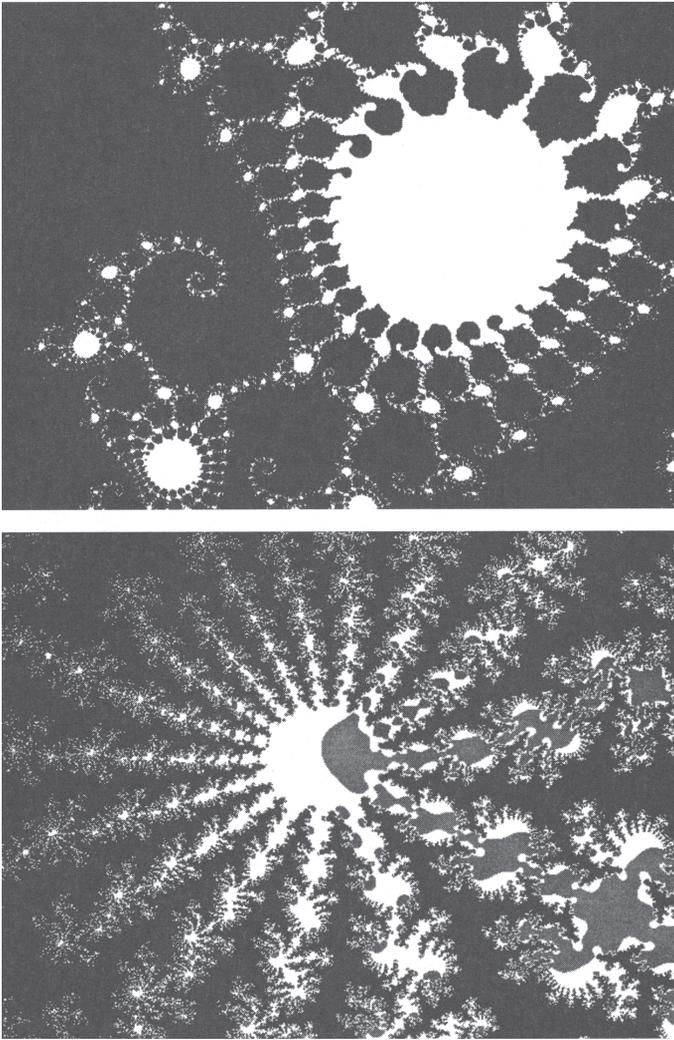


FIG. 1.6. Due porzioni dell'insieme di Mandelbrot.

combinazione sorprendente di estrema semplicità e impressionante complessità».

Servendosi di strumenti ad alta precisione grafica, i matematici di Brema Hartmut Jürgens, Hans-Otto Peitgen e Dietmar Saupe avevano riprodotto gli insiemi di Mandelbrot e le immagini relative. Dopodiché le ingrandirono, le raccolsero e le esposero in due mostre che andarono in giro per il mondo. Il numero di visitatori superò il record di qualsiasi manifestazione d'arte. Il «Guardian» scrisse: «Chi ancora non è disposto a credere che nella matematica si possa nascondere la bellezza vada a visitare questa mostra». Registi e cineasti incominciarono a servirsi di questi oggetti come sfondo delle loro produzioni, il compositore György Ligeti ne ha tratto ispirazione per nuovi studi al pianoforte, alcuni architetti danesi volevano servirsene come modelli per i loro edifici. Un numero imprecisato di programmatori amatoriali in giro per il mondo continua a produrre nuove varianti di queste immagini frattali. La visualizzazione dell'insieme di Mandelbrot avviene per mezzo di iterazioni sul piano dei numeri complessi effettuate con l'aiuto di programmi informatici.

Il processo di generazione di queste immagini è talmente semplice che non occorre essere un matematico per produrle; è sufficiente disporre di qualche conoscenza informatica di base. Nell'Appendice si trova una spiegazione della matematica necessaria (facilmente comprensibile) e un'introduzione alla programmazione.

Prima di Mandelbrot, il vero scopritore di queste strutture geometriche era stato il matematico francese Gaston Julia (1893-1978). Nel 1918, prigioniero di guerra in un lazzaretto, aveva iniziato a occuparsi di insiemi sul piano dei numeri complessi, scoprendo figure

autosimili. Contemporaneamente a Julia e per vie parallele il matematico francese Pierre Fatou (1878-1929) arrivava a scoprire qualcosa di simile. Ma poiché ancora non esisteva il computer su cui visualizzare quelle immagini, i loro lavori vennero presto dimenticati.

II

Un viaggio nel microcosmo

Se è stato Dio a creare l'universo, l'ultima sua preoccupazione è stata crearlo in maniera tale che noi riuscissimo a comprenderlo.

Albert Einstein in una lettera
a David Bohm del 10 febbraio 1954

1. *Rimpicciolire i riferimenti*

Nel nostro mondo le grandezze si misurano in metri e il tempo in ore, minuti e secondi. In questa maniera ci orientiamo nel mondo secondo le nostre dimensioni e secondo la capacità percettiva del nostro cervello o della nostra coscienza. Ci sono insetti che percepiscono il tempo in maniera del tutto difforme dalla nostra. Reagiscono in maniera più rapida perché il loro tempo scorre più velocemente. E di conseguenza la loro vita è più breve. All'altro estremo della scala degli esseri ci sono animali come le tartarughe il cui tempo scorre al rallentatore e che pertanto si muovono con grande lentezza e vivono molto a lungo.

Che cosa accadrebbe se potessimo cambiare la nostra percezione del tempo? Se potessimo guardare il mondo dal punto di vista, ad esempio, di una tartaruga, di una mosca effimera o di un batterio?

Per poter esperire la continuità del mondo, gli esseri umani percepiscono 60 eventi al secondo. Le mosche registrano tra le 5 e le 6 volte al secondo gli eventi percepiti dagli uomini e pertanto esperiscono il mondo in maniera completamente diversa: reagiscono

più velocemente e per questo non riusciamo quasi mai a prenderle.

Essendo costretti a percepire il mondo in metri e minuti giungiamo abbastanza presto ai limiti delle nostre capacità. Quindi alla domanda con cui si è aperto questo libro – se un cavallo al galoppo si trovi per un istante completamente sollevato dal suolo – si può rispondere soltanto facendo ricorso ad ausili tecnologici. Fu così che nel 1877 l'inglese Eadweard Muybridge sistemò 24 macchine fotografiche lungo il tratto percorso da un cavallo al galoppo; le macchine scattavano a intervalli di un secondo e le immagini registrate mostrarono che effettivamente per un istante brevissimo il cavallo si trova completamente sospeso in aria.

Presto ci si rese conto che era possibile filmare gli eventi al rallentatore o in time lapse. Si poterono osservare attimi che duravano frazioni di secondo. Si comprese, così, che nel tempo di un battito di ciglia una mosca batte le ali ben 20 volte. I granchi frantumano le conchiglie, colpendole con le chele con un'accelerazione svariate volte superiore a quella terrestre. Processi nascosti divennero improvvisamente osservabili e reali.

La stessa possibilità di riprodurre gli eventi in time lapse, estendendo cioè la porzione di tempo osservata, aprì nuove prospettive. In quei filmati nel giro di pochi minuti le nubi sfrecciano nel firmamento, le piante crescono, fioriscono e appassiscono, si alternano bassa e alta marea, e così via. Oggi esistono macchine fotografiche in grado di catturare 10.000 immagini al secondo e di rallentare il tempo di circa 400 volte.

In questa maniera non soltanto riusciamo a dilatare o a comprimere il tempo, ma anche lo spazio. I microscopi ci permettono di osservare animaletti minuscoli, invisibili a occhio nudo, e persino la struttura del

DNA. Per mezzo di microscopici elettronici riusciamo a vedere le molecole. I microscopi ottici rendono visibili cose delle dimensioni pari a $1/250$ di un capello. Oltre le molecole, nel mondo degli atomi, non riusciamo però ad arrivare: tutto diventa eccessivamente piccolo. Qui dobbiamo fare riferimento a teorie supportate da esperimenti. Procedendo in zone ancora più piccole arriviamo ai confini della conoscenza descritti dal principio di indeterminazione di Heisenberg. Tutto quel che esiste al di sotto del principio di indeterminazione sottostà alle leggi della fisica quantistica. Qui regnano leggi che il fisico quantistico Richard P. Feynman riteneva non si potessero mai comprendere fino in fondo.

In quel che segue proseguiamo il nostro viaggio in direzione del microcosmo. Dapprima incontriamo il mondo dei microrganismi; successivamente giungiamo al nanomondo delle molecole e al picomondo degli atomi; infine approdiamo al mondo dei quanti – le cui leggi, come si è detto, non possono più venir comprese per mezzo della fisica classica – e al mondo dei quark, il primo passo verso il vuoto.

2. Microrganismi: miliardi di miliardi

Vi sono esseri viventi che possono venir osservati soltanto al microscopio: i microrganismi. Su tratta per la maggior parte di organismi unicellulari come i batteri, i funghi e le alghe microscopiche, ma non solo. Molti microbiologi non ritengono ad esempio che i virus siano microorganismi, poiché non hanno un proprio metabolismo e possono riprodursi solamente in cellule ospite, riprogrammandone il DNA in maniera che queste ultime producano nuovi virus.

I batteri vennero osservati per la prima volta nel 1676 da Antoni van Leuwenhoek con l'aiuto di un microscopio artigianale che aveva fabbricato proprio a questo scopo. Aveva trovato i batteri in campioni di acqua e nella saliva umana. Oggi si ritiene che ve ne siano tra i due e i tre miliardi di specie, di cui però se ne conosce appena lo 0,5% – il che conduce continuamente a nuove interessanti scoperte.

In un litro di acqua di mare possono vivere oltre 20.000 diverse specie di microrganismi. Negli oceani vivono fino a dieci milioni di specie di microbi. Essi producono almeno la metà dell'ossigeno elementare sulla Terra, contribuendo così per primi a renderla un ambiente abitabile. La maggior parte dei microrganismi non è nociva per gli esseri umani.

Passiamo ora ai microbi che abitano il nostro corpo. Essi sono d'importanza vitale: ci aiutano nella digestione, ci proteggono dall'attacco di altri microbi nocivi, producono enzimi ecc. Il corpo umano è fatto all'incirca di 10.000.000.000.000 cellule, ma contiene 1.000.000.000.000.000 microbi; nel corpo ci sono quindi 100 volte più microbi che cellule (all'incirca 10^{15}). Se si potessero ingrandire tutti i microbi che albergano nel nostro corpo alla dimensione di 1 mm³ si otterrebbe un volume complessivo di 1 milione di m³, che è più della quantità di acqua contenuta in 1.000 piscine di media grandezza. La massa complessiva dei microrganismi del corpo umano pesa quasi 1 kg.

In ogni cm² di pelle ci sono tra i 100 e i 10.000 microbi. Al confronto delle mucose, su cui vivono milioni di microbi, la pelle è relativamente povera di germi. Sappiamo che la nostra bocca ospita oltre 20 milioni di microbi, tra cui batteri, flagellati, amebe e funghi. Ve ne sono tra le 300 e le 400 specie diverse, che vivono sulla lingua, sulle mucose e sui denti. La maggior parte

ci sono assai utili: rafforzano il nostro sistema immunitario e proteggono le nostre mucose. Ancor più popolato di germi è però l'apparato digerente, in cui vivono più microrganismi di quanti uomini siano mai vissuti sulla Terra, ossia molti miliardi. Il batterio intestinale *escherichia coli* riesce a raddoppiarsi ogni 20 minuti. La maggior parte dei microbi intestinali sono batteri; essi producono enzimi che smontano il cibo in parti piccolissime che il corpo è in grado di assorbire. Circa il 30% delle calorie di cui abbiamo bisogno è prodotto da questi batteri. In un grammo di escrementi umani si trovano 100 miliardi di microrganismi.

Attraverso un esperimento sui topi si è cercato di capire se un essere vivente superiore sia in grado di vivere senza microbi. I topi da cui erano stati prelevati tutti i microbi dopo qualche tempo presentavano organi deformati e inadatti a svolgere le loro funzioni.

3. Il mondo delle molecole

Addentriamoci ancora più in profondità nei territori del «piccolo». Al di sotto degli animaletti minuscoli e dei microbi si trova il mondo delle molecole. Osserviamo quelle più interessanti: le molecole dell'acqua.

3.1. L'acqua: la molecola della vita

La molecola più piccola si rivela piena di meraviglie. Da secoli gli scienziati studiano l'acqua senza comprenderne fino in fondo la natura e le proprietà. Qualche tempo fa la celebre rivista «Nature» denunciava: «Nessuno conosce l'acqua per davvero».

A temperatura ambiente, infatti, l'acqua dovrebbe trovarsi teoricamente allo stato gassoso. Molecole analoghe, come l'ammoniaca, l'acido cloridrico o il metano si presentano allo stato gassoso già a temperature inferiori ai $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ (il metano addirittura a $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$). La molecola dell'acqua ha una struttura particolare per cui l'acqua si trova in quello stato di aggregazione soltanto a circa $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se accadesse altrimenti, non potrebbe esserci vita sulla Terra.

Tutte le sostanze si condensano a basse temperature, aumentando la loro densità. Una sostanza solida ha pertanto una densità maggiore del suo corrispettivo allo stato liquido. La conseguenza è che, ad esempio, l'alcol congelato se posto in un bicchiere di alcol allo stato liquido precipita sul fondo.

Se l'acqua si comportasse in questo modo il mare ghiaccerebbe dal basso verso l'alto. I pesci e gli altri animali acquatici non sopravviverebbero a un inverno rigido. Secondo questo principio i ruscelli di montagna ne sarebbero presto intasati.

Fortunatamente l'acqua si comporta diversamente: essa non raggiunge la densità massima al punto di congelamento, ma a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Da questa temperatura in avanti comincia nuovamente a espandersi. Sicché il ghiaccio è più leggero dell'acqua e sale verso la superficie. Il mare non ghiaccia a partire dal fondo, ma dalla superficie, che assume addirittura la funzione di riscaldare quel che sta sotto. Così che se continua a nevicare, il mare è protetto contro il congelamento totale.

In fondo al mare si concentra l'acqua alla temperatura di $4\text{ }^{\circ}\text{C}$; pesci, granchi e alghe hanno un posto abbastanza accogliente dove trascorrere la stagione fredda.

Inoltre, nell'acqua si sciolgono più sostanze che in tutti gli altri liquidi. Noi riusciamo ad assorbire i

nutrimenti soltanto in virtù del fatto che l'acqua è in grado di sciogliere le sostanze più diverse.

Non c'è nessun altro condizionamento chimico che influenzi i nostri pianeti in maniera più persistente: l'acqua influenza il clima, riempie gli oceani, cade sotto forma di pioggia, neve e grandine e condiziona l'aspetto di interi paesaggi. Senza acqua non ci sarebbe vita, e lo stesso organismo umano è formato per due terzi di acqua.

L'acqua è presente dappertutto; la sua formula, H_2O , è ben nota anche a chi non fa il chimico di mestiere: una sua molecola è formata da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno. Essa è talmente piccola che in una goccia d'acqua ce ne sono 1,67 trilioni. Per farsi un'idea di un numero così incredibilmente enorme ipotizziamo che ogni molecola di una goccia d'acqua sia grande 1 mm^3 . Quanta «iperacqua» otterremmo? Ogni goccia diverrebbe una quantità di acqua sufficiente a riempire oltre trenta volte il Lago di Costanza; se la rovesciassimo in una vasca con la superficie della Germania, la riempiremmo fino a due metri. E tutto questo con una sola goccia d'acqua!

Immaginiamo che al polo del freddo, in Jacuzia (Russia), a una temperatura esterna di $-50\text{ }^\circ\text{C}$, le persone spruzzino acqua bollente nell'aria. Che cosa succede? Si formano cristalli di ghiaccio che poi ricadono a terra. Se l'acqua è a una temperatura normale ciò non succede. Infatti se si mettono nel congelatore due pentole, una con acqua calda fumante e l'altra con acqua tiepida, ghiaccia prima quella bollente e solo dopo quella tiepida.

A oggi non c'è una spiegazione per questo fenomeno sconcertante. Complessivamente gli scienziati hanno registrato più di 70 anomalie nel comportamento dell'acqua.

3.2. I fiocchi di neve: ognuno a modo suo

Il giurista e astronomo Johann Heinrich Flögel di Ahrensburg (1834-1918) fu il primo, nel 1879, a fotografare dei fiocchi di neve al microscopio. Dopo di lui, fu il turno del fattore americano Wilson Bentley (1865-1931), che viveva nella piccola cittadina di Jericho, nel Vermont. Con una tecnica appositamente studiata, questi fotografò più di 5.000 fiocchi di neve. Sulla base delle sue osservazioni, nel 1922 ritenne di poter affermare che ogni cristallo di neve ha una forma diversa (*no two snowflakes are alike*).

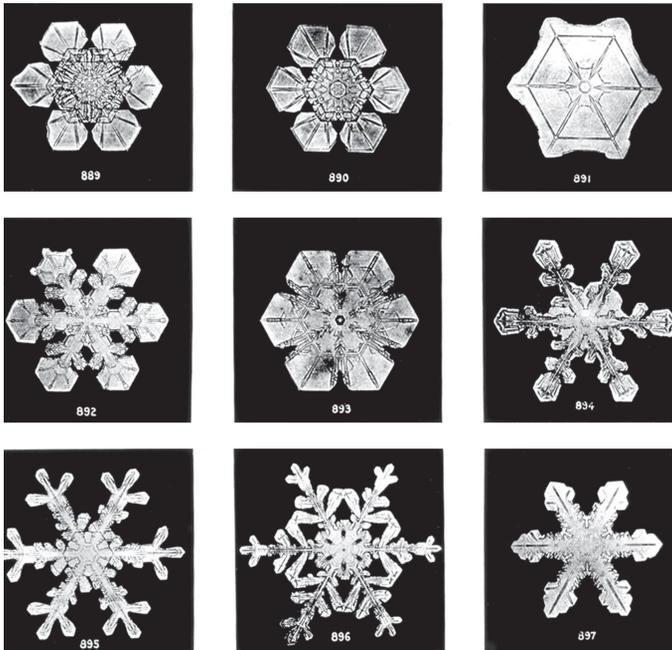


FIG. 2.1. I fiocchi di neve fotografati nel 1902 da Wilson Bentley.

Nel 1931 Bentley pubblicò *Snow Crystals*, un libro che conteneva 2.400 foto di cristalli di neve. Scriveva: «al microscopio vidi che i fiocchi di neve sono miracoli di bellezza (*snowflakes are miracles of beauty*), ed è un peccato che questa loro bellezza non possa essere vista e ammirata da chiunque. Ogni cristallo è un capolavoro di design e ognuno è unico nel suo genere, irripetibile» (cfr. <http://snowflakebentley.com>).

Le lastre fotografiche andarono in eredità al Buffalo Museum of Science di Jericho, dove sono tutt'ora esposte.

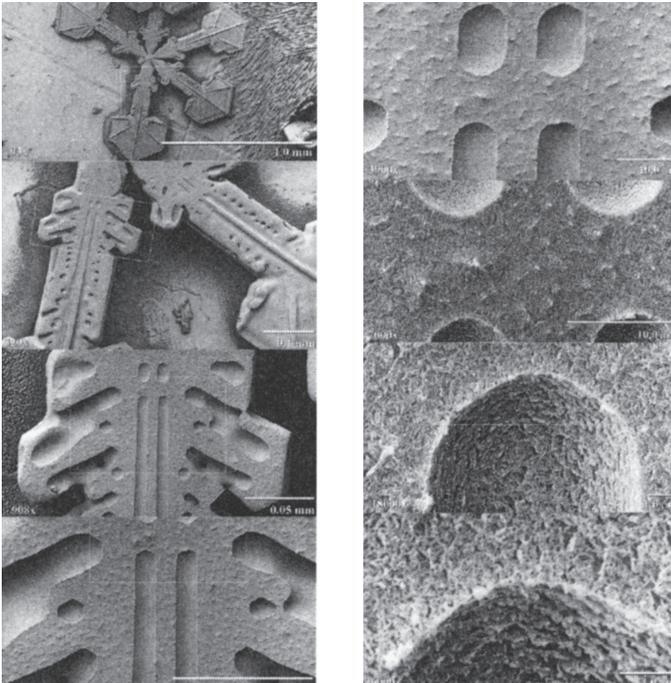


FIG. 2.2. Ingrandimenti di fiocchi di neve al microscopio elettronico.

Tra i 5.000 fiocchi di neve fotografati Bentley non riuscì a trovarne due identici; ognuno era diverso. Effettivamente è assai improbabile che due fiocchi abbiano una struttura identica, poiché ognuno contiene 10^{18} molecole d'acqua; questo numero immenso è la ragione per cui si possono comporre così tanti modelli. Ma la tesi di Bentley secondo cui non ci sono due fiocchi con identica struttura venne però confutata nel 1988 da Nancy Knight, una ricercatrice del National Center for Atmospheric Research che riuscì a trovare due fiocchi perfettamente uguali.

I fiocchi di neve si formano quando l'acqua si deposita su germi cristallini (ad esempio, particelle di polvere) e li ghiaccia. Ciò è quel che accade ad alta quota, con una temperatura sotto i -12 °C. Durante la caduta il germe si ingrandisce fino a diventare un fiocco di neve. Si formano così le celebri forme a sei punte in cui si possono osservare solo angoli perfetti di 60 e 120 gradi.

Tra i fiocchi della neve fresca c'è molta aria: per questa ragione la neve ha una capacità fonoassorbente. Per il mondo vegetale la neve fresca comporta un gran vantaggio, giacché racchiude fino al 95% di aria che isola le piante dal gelo e dai venti glaciali.

4. Il DNA: i mattoncini della vita

Se l'acqua è ciò che rende possibile la vita, le molecole del DNA sono ciò che la «contiene». L'acido deossiribonucleico (DNA) contiene tutte le informazioni genetiche dell'organismo e si trova in ogni sua cellula. Il DNA umano è lungo complessivamente 2 metri, ma è largo appena 2,5 nanometri: esso è 10.000 volte più sottile di un capello. Di conseguenza ha anche un vo-

lume assai ridotto, appena $0,00000004 \text{ mm}^3$, ed è per questo che può essere contenuto in ogni cellula.

Osserviamo più da vicino queste molecole, i mattoncini della vita.

4.1. *Cellule, proteine, aminoacidi*

Gli organismi viventi sono fatti, come è noto, da cellule biologiche. Queste cellule si comportano come unità chimiche e svolgono diversi compiti: quelle cerebrali operano come neuroni, quelle intestinali sono parti del tratto intestinale ecc. Esse possiedono inoltre la capacità di autoregolarsi, di dividersi ecc.

Ma di che cosa è fatta una cellula? Ognuna è composta da proteine altamente complesse; ogni cellula richiede dei particolari tipi di proteine per poter svolgere la propria funzione.

Quando una cellula si divide, le due cellule che ne derivano devono contenere le medesime proteine

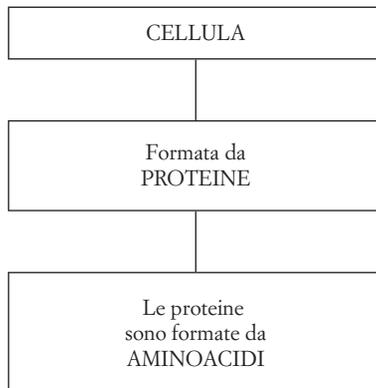


FIG. 2.3. La struttura di una cellula biologica.

specifiche. Ogni cellula è in condizione di «costruire» le proprie proteine. Ma da dove trae le informazioni per farlo? Le informazioni relative a tutte le proteine umane sono conservate nel DNA, che si trova nel nucleo di ogni cellula. Si tratta di una catena di molecole formata da catene più piccole, i cromosomi.

4.2. Il codice genetico

Osservando l'insieme di quelle informazioni vediamo che gli elementi fondamentali (quelle che sarebbero le perle se si trattasse di una collana di perle) sono soltanto 4 molecole: adenina, guanina, citosina e timina. Se ce le immaginiamo verdi, rosse, blu e gialle, otteniamo una bella collana variopinta, a quattro colori. La nostra collana di perle contiene tutte le informazioni che costituiscono il progetto generale per la costruzione di un essere vivente. Nel caso dell'uomo, ad esempio: il sesso, il colore degli occhi, la forma del corpo ecc.

Dalla serie delle perle la cellula riesce a trarre le indicazioni per la costruzione delle proteine. I genetisti indicano le quattro molecole con le loro iniziali: A, G, C, T. Le perle della nostra collana stanno l'una accanto all'altra in una sequenza tipo questa:

TGCCTTGAGAATCGGTTTACATCATGGCCAAAAGTT...

Se la si rappresentasse in questo modo la catena del DNA umano sarebbe lunga almeno 7.000 km; infatti è formata da 3 miliardi di coppie di lettere. Come si è detto, il DNA è presente in ogni cellula, sicché in ogni cellula ci sono anche informazioni su proteine di cui la cellula stessa non ha nessun bisogno. Come fa

dunque la cellula a decifrare nella catena in questione fatta di sole quattro lettere la struttura molecolare di una proteina specifica? Il principio è sorprendentemente semplice: gruppi di tre lettere – ad esempio, CTG o CAA – codificano una molecola. Così TCA è la molecola serina, CTG la leucina e GCC l'alanina. Queste molecole sono dette aminoacidi, e ce ne sono 20 diversi tipi. Il DNA si può dunque considerare una catena di aminoacidi codificati; il codice degli aminoacidi è riportato nella tabella 2.1.

Con una serie di quattro lettere si possono rappresentare in serie di tre – ad esempio CTG, GCC ecc. – esattamente $4^3 = 64$ diverse unità d'informazione. Tuttavia, poiché si possono codificare soltanto 20 aminoacidi, alcune triadi si riferiscono alla medesima molecola.

Come si passa dagli aminoacidi alle proteine? Ogni proteina è definita da una serie specifica di aminoacidi. Gli aminoacidi nel DNA operano come 20 lettere. Sicché, esattamente come per mezzo delle lettere si può scrivere e decifrare un testo, così la cellula riesce a decifrare le informazioni per la costruzione di una proteina o di un enzima a partire dalla catena degli aminoacidi.

Ad esempio: il codice dell'insulina è composto di 51 aminoacidi, quello dell'enzima ribonucleasi di 124, tutti disposti a catena.

Immaginiamoci una cellula del fegato che deve produrre un enzima specifico. Il piano di costruzione della proteina è conservato nel DNA che si trova nel nucleo della cellula. Da qualche parte nella catena del DNA si trova una parte che contiene il codice della proteina che si vuole produrre. Ma dove comincia e dove finisce questa «parte»? Ogni codice delle proteine incomincia con la triade ATG, mentre i codici TGA, TAA e TAG ne indicano la fine.

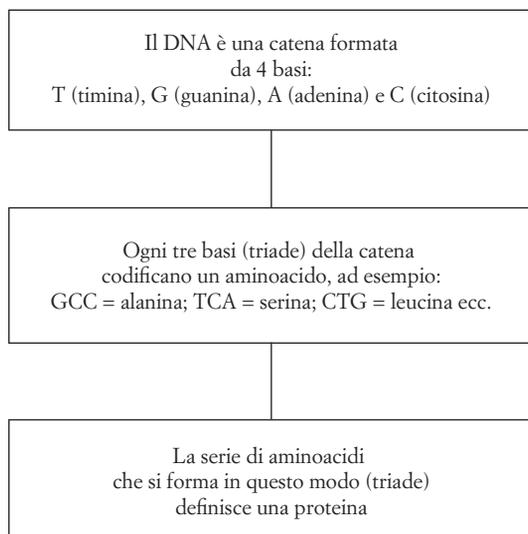


FIG. 2.4. Codificazione delle proteine.

TAB. 2.1. *La codificazione degli aminoacidi (ad esempio: prolina = CCA; serina = TCA)*

	T	C	A	G	3
T	fenilalanina	serina	tirosina	cisteina	T
	fenilalanina	serina	tirosina	cisteina	C
	leucina	serina	–	–	A
	leucina	serina	–	triptofano	G
C	leucina	prolina	istidina	arginina	T
	leucina	prolina	istidina	arginina	C
	leucina	prolina	glutamina	arginina	A
	leucina	prolina	glutamina	arginina	G
A	isoleucina	treonina	asparagina	serina	T
	isoleucina	treonina	asparagina	serina	C
	isoleucina	treonina	lisina	arginina	A
	–	treonina	lisina	arginina	G
G	valina	alanina	acido aspartico	glicina	T
	valina	alanina	acido aspartico	glicina	C
	valina	alanina	acido glutammico	glicina	A
	valina	alanina	acido glutammico	glicina	G

In questo modo la cellula riesce a trovare la stringa che le serve. Riproduce quindi una copia esatta della stringa in questione. Questa copia, detta RNA, viene trasportata in una parte della cellula: il ribosoma. Il ribosoma, che si trova in ogni cellula, si può paragonare a una piccola fabbrica che produce la proteina secondo il modello del RNA. Il ribosoma trasforma quindi il RNA in una catena di aminoacidi.

frammento di DNA:

AACGTCTTGATATCGGTAGCTTCGTTGAACACHTA
CTHTACTGGATACGTAACGTGTACACTATACGTAC
ACT CATGTACCATGCAATATGTGT ...

*Così raffigurata la catena del DNA umano sarebbe
lunga all'incirca 7.000 km.*

4.3. Il «Progetto Genoma Umano»

Il «Progetto Genoma Umano» (HGP, *Human Genome Project*) è un progetto di ricerca internazionale fondato nel 1990 che ha come fine la decodificazione del DNA umano. Scopo del progetto era l'individuazione delle sequenze delle molecole (le coppie di basi) del DNA. Inizialmente al progetto aderirono 1.000 scienziati di 40 paesi. Dal giugno del 1995 anche la Germania ha preso parte alle attività di ricerca. Parallelamente anche l'industria statunitense *Celera* lavorava alla decodificazione delle sequenze del genoma umano.

Nel 2003 venne comunicata la sequenza completa del codice genetico umano, ossia del nostro DNA. In questa maniera veniva rivelata l'intera sequenza del genoma con tutti i suoi tre miliardi di mattoncini: il libro della vita si presentava ora nella forma di un testo nudo e crudo.

La scienza incomincia così a decifrare gli oltre 20.000 geni a partire dall'immensa informazione digitale. I geni sono meno di quel che si pensava prima del Progetto Genoma. Cionondimeno, le cose sono più complicate di quel che ci si aspettava. Fino a ora si pensava che il 98% del DNA fosse trascurabile e che soltanto il 2% contenesse informazioni importanti. Oggi sappiamo invece che anche questa parte di genoma che si pensava insignificante non lo è per almeno l'80-95%, che contiene informazioni preziose. Ci sono circa 11.000 pseudogeni, resti di duplicazioni genetiche precedenti. Se finora si pensava che gli pseudogeni non contenessero informazioni vitali, ora si è scoperto che almeno il 10% di loro svolge funzioni importanti.

Il bilancio è questo: le questioni che ci si è posti sulla decodificazione del codice genetico sono più delle risposte trovate. Ci vorranno ancora diversi decenni per comprendere fino in fondo il genoma umano.

5. *L'immenso numero delle molecole*

Abbiamo visto che le molecole dell'acqua sono talmente piccole che una goccia ne contiene un numero enorme. Adesso consideriamo le dimensioni delle molecole dei gas; arriveremo a conclusioni stupefacenti.

Nel 1796 Amedeo Avogadro aveva vent'anni e si laureava in Diritto canonico; a partire dal 1800, però, prese a dedicarsi interamente allo studio della matematica e della fisica. Inizialmente insegnava al ginnasio di Vercelli, dopodiché venne chiamato come professore di Fisica matematica all'Università di Torino. Nel 1811 pubblicava la sua celebre ipotesi: *volumi uguali di gas diversi, alla stessa temperatura e pressione, contengono lo stesso numero di molecole.*

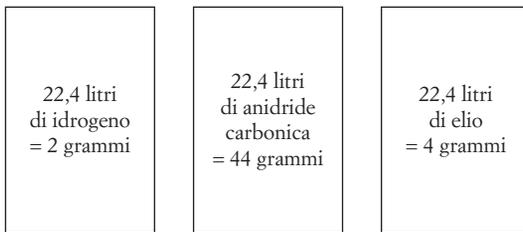


FIG. 2.5. Volumi uguali di gas diversi, alla stessa temperatura e pressione, contengono lo stesso numero di molecole.

Immaginiamo di pesare due contenitori, uno con 22,4 litri di idrogeno e l'altro con 22,4 litri di elio; entrambi i contenitori contengono il medesimo numero di molecole. Quante fossero Avogadro non lo sapeva; soltanto più tardi si scoprì la formula per calcolarlo. Ovviamente i due contenitori hanno un peso diverso, perché le molecole di idrogeno e quelle dell'elio hanno pesi diversi. L'elio pesa il doppio dell'idrogeno, sicché 22,4 litri di idrogeno pesano 2 gr e 22,4 litri di elio 4 gr (fig. 2.5).

L'importanza straordinaria della scoperta di Avogadro non venne subito riconosciuta. Soltanto nel 1860 il suo allievo Stanislao Cannizzaro riprese questa sua idea in una relazione presentata al Convegno dei chimici di Karlsruhe. Il problema era ora scoprire quante molecole ci fossero in un certo volume, ad esempio in un cm^3 . Era sufficiente considerare un gas qualsiasi, dal momento che tutti i gas contengono, nel medesimo volume, il medesimo numero di molecole. In tal modo si sarebbero scoperte le dimensioni delle molecole di un certo gas, ad esempio dell'aria: bastava dividere il volume per il numero delle molecole.

Proprio così fece il fisico e chimico austriaco Josef Loschmidt (1821-1895), professore di chimica fisica a Vienna e autore, nel 1865, di un saggio dal titolo *Sulla*

dimensione delle molecole dell'aria. Sulla base dei principi della cinetica dei gas egli determinò che il diametro di quelle molecole era $s=0,970$ nm (nm = nanometri, cfr. cap. I, par. 3.1); ma osservò: «questo valore va assolutamente inteso come un'approssimazione vaga; cionondimeno non è di certo dieci volte superiore o inferiore al valore reale». E aveva ragione, giacché il valore oggi riconosciuto è $s=0,365$ nm. Se ora si divide il volume di 1 cm^3 per il volume di una molecola, si ottiene il valore $2,6867 \times 10^{19} = 26.867.000.000.000.000$ molecole per cm^3 (ovviamente si deve tenere conto del fatto che a causa del moto termico le molecole non si trovano attaccate tra loro).

Più precisamente:

1 cm³ di qualsivoglia gas alla temperatura di 0 °C e alla pressione di 1013,25 mbar contiene 27×10^{18} molecole.

Ludwig Boltzmann, allievo e poi amico di Loschmidt, chiamò questo numero «costante di Loschmidt», e così la conosciamo ancora oggi. Per onorare la memoria del grande scienziato la Posta austriaca gli dedicò nel 1995 l'edizione speciale di un francobollo.

Per farci un'idea dell'immensità di questo numero proviamo a pensare che le molecole di aria che ci sono in 1 cm^3 di aria abbiano ognuna le dimensioni di 1 mm^3 e supponiamo che si trovino le une attaccate alle altre; otterremo il volume $27 \times 10^{18} \text{ mm}^3 = 27 \times 10^9 \text{ m}^3$ (da $1 \text{ m}^3 = 10^9 \text{ mm}^3$). Ossia $27.000.000.000 \text{ m}^3$ di «superaria». Questa quantità corrisponde alla quantità d'acqua contenuta in 30 milioni di piscine di media grandezza.

Osserviamo ora un litro d'acqua e immaginiamoci di contrassegnare in qualche modo le singole molecole. Dopodiché distribuiamo questa quantità di acqua in parti uguali tra tutti i mari della Terra e, ciò fatto, pre-

leviamo un litro di acqua di mare da un posto a caso, ad esempio dall'oceano Pacifico o dal mare del Nord. Quante molecole contrassegnate si troveranno nel nostro campione? Possiamo supporre che data la quantità enorme di acqua nei mari non ve ne sia nessuna. Se ce ne fossero sarebbe davvero un caso eccezionale. Il risultato di fronte a cui ci troviamo è invece sorprendente: in ogni litro di acqua di mare ne ritroviamo circa 12.000! Indifferentemente che si tratti dell'oceano Pacifico, dell'Atlantico, del mare del Nord o del mar Baltico.

Il calcolo è semplice: se si fa evaporare un litro d'acqua si ottengono all'incirca $1,4 \text{ m}^3$ di vapore. La costante di Loschmidt ci permette di calcolare che il numero delle molecole è $3,8 \times 10^{25}$. Un litro d'acqua contiene pertanto $3,8 \times 10^{25}$ molecole d'acqua. Dividendo questo numero per il volume d'acqua (in litri) che si ritiene sia nei mari si ottiene il numero 12.000.

Facciamo un ultimo esempio. Quando respiriamo normalmente emettiamo circa 250 ml di aria per ogni respiro. Per calcolare qual è il numero enorme di molecole d'aria corrispondenti, immaginiamo che ognuna sia grande come un pisello. Ecco che avremmo $700.000.000.000.000 \text{ m}^3$ di piselli! È una quantità talmente grande che si potrebbe riempire una vasca della superficie dell'intera Germania con oltre 1 km di altezza. E ciò vale per ogni singolo respiro.

Ecco, nuovamente, il calcolo: 250 ml corrispondono a 250 cm^3 . Secondo Loschmidt un cm^3 contiene 27×10^{18} molecole, quindi il singolo respiro contiene $250 \times 27 \times 10^{18}$ molecole. Se 10 piselli occupano un volume di 1 cm^3 , avremo un volume di piselli di $250 \times 27 \times 10^{17} \text{ cm}^3$. Suddividendolo per quella che si ritiene essere la superficie della Germania, ossia $1000 \text{ km} \times 500 \text{ km} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^2$, si ottiene l'altezza sopra indicata di 1350 metri.

6. *Gli atomi*

6.1. *Il modello atomico di Thomson e Rutherford*

Le molecole sono fatte di atomi, ad esempio una molecola d'acqua è fatta di atomi di idrogeno e ossigeno. Ma di che cosa sono fatti gli atomi?

Nel 1897 il fisico britannico Joseph John Thomson riuscì a provare l'esistenza degli elettroni. L'aveva dedotta dall'osservazione della deviazione dei raggi catodici in un campo magnetico. Thomson ipotizzò dunque che gli atomi del catodo contenessero elettroni. Secondo il suo modello atomico all'interno dell'atomo si trovano elettroni piccolissimi, come uvette in un panettone (da qui il nome «modello a panettone»). Nel 1906 Thomson riuscì a stabilire che gli atomi di idrogeno hanno un solo elettrone. Sulla base di questa e di altre scoperte, nel 1906 gli venne conferito il premio Nobel per la fisica.

Come sono disposti gli elettroni nell'atomo? Il fisico neozelandese Ernest Rutherford provò a capire com'è fatto l'atomo. Nel 1911 eseguì un esperimento raffinato: prese una sottile lamina d'oro, argento e rame e la colpì con un raggio di piccolissime particelle («particelle alfa»). Dietro alla lamina aveva messo uno schermo luminoso che consentiva di vedere le particelle alfa quando raggiungevano la lamina. Se gli atomi avessero avuto una struttura rigida, come le palle da biliardo, allora la maggior parte delle particelle alfa avrebbe dovuto rimbalzare sulla lamina, esattamente come farebbero delle palle da tennis contro un muro. Con grande sorpresa Rutherford si trovò a constatare che il raggio di particelle alfa passava quasi indisturbato dritto attraverso la lamina. Solo poche venivano deviate, raggiungendo lo schermo in punti diversi. Ciò

poteva significare soltanto che all'interno degli atomi c'era perlopiù dello spazio vuoto.

Dal tipo di deviazione di alcune particelle alfa, che talvolta raggiungeva i 90 gradi, Rutherford concluse che il raggio del nucleo dell'atomo poteva misurare al massimo 10^{-12} cm. Inoltre il nucleo doveva raccogliere quasi l'intera massa atomica, altrimenti la deviazione non sarebbe stata così importante. Alla fine si convinse che il nucleo doveva possedere anche una carica positiva. E poiché la carica complessiva dell'atomo è neutra, intorno al nucleo dovevano trovarsi elettroni quasi privi di massa. Il modello atomico di Rutherford prevede così che vi sia un piccolo nucleo intorno a cui girano gli elettroni, una sorta di modello planetario, con i pianeti che si muovono intorno al Sole. Il nucleo ha un raggio inferiore a 10^{-4} Ångström (cfr. cap. I, par. 3.1) e ha carica positiva. La quasi totalità della massa dell'atomo si trova concentrata nel nucleo.

Si trattava di concezioni assolutamente nuove a quel tempo. Ricerche successive mostrarono però che questo modello atomico conteneva alcune contraddizioni importanti. Secondo la concezione della fisica tradizionale, l'elettrone che si muoveva intorno al nucleo doveva emettere radiazioni elettromagnetiche. Ma nel modello di Rutherford ciò non era previsto. Seconda contraddizione: gli atomi potevano sì emettere radiazioni, ma soltanto a determinate frequenze (spettro discreto). L'elettrone del modello di Rutherford doveva invece emettere uno spettro continuo (ossia a tutte le frequenze), il che non risulta per via sperimentale. Infine, il modello di Rutherford si basava sui principi della meccanica e dell'elettrodinamica classica.

Le considerazioni matematiche, per quanto rigorose, non riuscirono a eliminarne le contraddizioni. Toccò infine a Niels Bohr, nel 1911, sanare le contrad-

dizioni del modello di Rutherford integrandolo con nuove scoperte rivoluzionarie. Il suo contributo poggiava sulla quantizzazione dell'energia precedentemente scoperta da Max Planck. Egli formulò così un postulato che soltanto successivamente si sarebbe riusciti a dimostrare per mezzo della meccanica quantistica. In quel che segue ci occuperemo del modello atomico di Bohr.

6.2. *Il modello atomico di Bohr*

Gli stadi olimpici sono fatti in maniera tale che il percorso intorno al campo di gioco permette di correre i 400 metri. Immaginatoci un cerchio con una circonferenza di 5 km esatti. Sulla base della celebre formula della circonferenza ($=2r\pi$) stabiliamo che il raggio (r) misura 796 m. Tracciamo ora un secondo cerchio, concentrico con il primo, con una circonferenza di 6 km. Il raggio di questo nuovo cerchio misurerà 955 m. Ovviamente possiamo aggiungere quanti cerchi vogliamo, con circonferenze di 7, 8, 9... km. Ognuna misurerà n km, dove n è un numero intero come 1, 2, 3...

Una situazione analoga si dà all'interno dell'atomo, che è costituito in questo modo: gli elettroni si muovono intorno a un nucleo fisso come i pianeti intorno al Sole. Questa è l'immagine classica che Niels Bohr aveva a disposizione quando intraprese le proprie ricerche nel 1913. Egli perfezionò questo modello, avanzando la tesi che gli elettroni possono percorrere esclusivamente orbite circolari perfette. La ragione era che si potevano concepire gli elettroni come movimenti d'onda. Come nel nostro esempio dei cerchi la lunghezza della circonferenza doveva essere soltanto un numero intero, così le orbite degli elettroni devono essere concepite in maniera che il movimento d'onda,

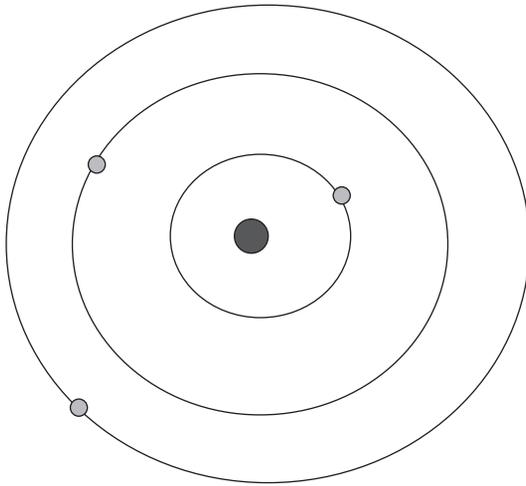


FIG. 2.6. Il modello classico di atomo: gli elettroni (parti chiare) si muovono intorno al nucleo dell'atomo su orbite circolari perfette.

dopo aver compiuto il giro, si ricongiungesse con il successivo. Ciò significa che l'orbita è un multiplo della lunghezza d'onda (ossia riproduce un numero intero di volte l'intera lunghezza d'onda).

L'orbita ha una lunghezza di $n \cdot \lambda$, dove λ è la lunghezza d'onda e n un numero intero. Se così non fosse, dopo aver percorso un giro le onde di elettroni non si ricongiungerebbero e l'orbita sarebbe instabile. I fisici parlano di «onda stabile». Accade esattamente come nel caso delle vibrazioni di una corda: anche qui sono possibili soltanto frequenze determinate, che dipendono dalle lunghezze d'onda. Già Pitagora aveva ritenuto che le armonie delle vibrazioni costituissero le proprietà essenziali della costituzione dell'universo.

Ogni orbita possibile corrisponde precisamente a una certa energia dell'elettrone. Queste orbite sono percorse dagli elettroni senza che essi emettano energia.

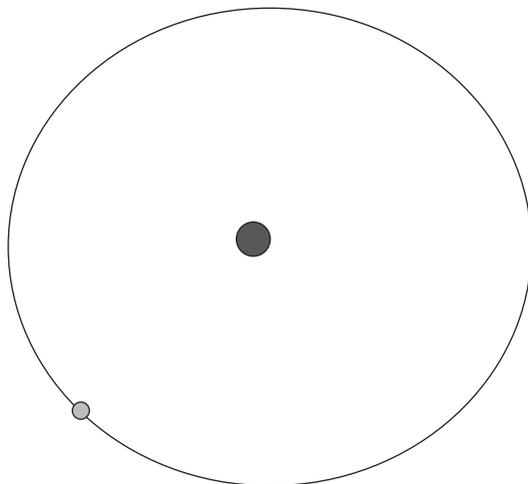


FIG. 2.7. Immagine classica dell'atomo di idrogeno: un elettrone (parte chiara) si muove intorno al nucleo (protone, parte scura) su un'orbita.

In realtà la situazione è un po' più complicata: la teoria quantistica (par. 7) mostra che il modello che rappresenta gli elettroni come pianeti intorno al Sole descrive bene l'atomo, ma che tuttavia gli elettroni vanno concepiti come onde e non come particelle, e che possiamo indicarne la presenza soltanto in maniera probabile. Su questo torneremo nel paragrafo 7.

La teoria quantistica mostra inoltre che l'energia di un elettrone è tanto maggiore, quanto minore è la lunghezza d'onda. Pertanto se si aggiungesse energia a un elettrone in orbita (ad esempio sotto forma di luce) la sua lunghezza d'onda diminuirebbe di conseguenza. Alla nuova lunghezza d'onda corrisponde ora una nuova orbita e pertanto l'elettrone si muove ora su un'orbita diversa, con maggiore energia. Quando l'energia raggiunge un valore critico, l'elettrone si stacca dal nucleo e accade quel che i fisici chiamano «ionizzazione».

L'esatto contrario si dà quando l'elettrone passa su un'orbita inferiore. In questo caso esso rilascia l'energia in eccesso (nella gran parte dei casi sotto forma di luce) e passa a un livello energetico inferiore, più vicino al nucleo. Poiché le orbite sono sempre determinate, ogni elemento chimico ha le proprie specifiche frequenze luminose. I chimici parlano di «spettro dell'elemento». Il primo che riuscì a indicare in forma compiuta dello spettro dell'atomo di idrogeno fu il professore di matematica svizzero Johann Jakob Balmer, nel 1885.

I pianeti si mantengono sulla loro orbita intorno al Sole grazie alla forza di attrazione esercitata da quest'ultimo. Che cosa corrisponde alla gravitazione a livello degli elettroni che girano intorno al nucleo dell'atomo? La forza d'attrazione elettrica delle diverse cariche prevalenti: gli elettroni hanno una carica negativa, mentre i protoni del nucleo hanno una carica positiva. Quanti più sono gli elettroni intorno al nucleo, tanti più sono i protoni contenuti in esso.

In un atomo di idrogeno c'è un solo elettrone, quindi nel nucleo c'è un solo protone (fig. 2.7). Perché due elettroni si mantengano sulla loro orbita, occorre che nel nucleo ci siano due protoni. Ma, poiché hanno un'identica carica elettrica, i protoni dovrebbero respingersi, causando la disgregazione dell'atomo. Ciò non accade per due ragioni: per un verso, perché nel nucleo ci sono anche due neutroni, privi di carica elettrica, che mitigano la repulsione dei protoni; per l'altro, perché nel nucleo c'è una forza – la «forza nucleare forte» o «interazione forte» – che lo tiene insieme. Essa agisce soltanto su brevissime distanze, all'incirca 10^{-15} m.

Sicché un atomo con due elettroni che girano intorno a un nucleo dove si trovano due protoni e due neutroni risulta stabile. Si tratta dell'atomo di elio.

Il numero dei protoni determina pertanto il tipo di atomo: mentre un atomo di idrogeno ha un solo protone, un atomo di elio ne ha due, uno di litio tre, uno di berillio quattro. Il carbonio possiede sei protoni, il nichel 28 e l'oro 79. Nel nucleo di questi atomi si ha ovviamente un numero di protoni e neutroni adeguato affinché l'atomo risulti stabile. Di conseguenza, intorno al nucleo gira un numero di elettroni ben preciso.

6.3. Le dimensioni dell'atomo

Quanto sono grandi gli atomi? Se ce li immaginassimo come piccole biglie, potremmo indicarne la misura del raggio. Tuttavia la questione delle dimensioni dell'atomo è problematica. Il raggio atomico si determina sulla base della portata dell'azione della sua forza (l'orbita degli elettroni). Volendo, è possibile calcolare la lunghezza del raggio atomico; vi sono diversi metodi per farlo, e tutti portano a questi valori:

$$R = 0,8 \times 10^{-8} \text{ cm fino a } 3 \times 10^{-8} \text{ cm.}$$

Cerchiamo però di capire qual è l'ordine di grandezza dell'atomo. Consideriamo un atomo di idrogeno, ossia un atomo con un elettrone soltanto. L'elettrone gira intorno al nucleo a una distanza R . Prendiamo $R = 10^{-8}$ cm e adattiamo questa misura ai riferimenti del nostro mondo di metri e di minuti. Proviamo a ingrandire l'atomo finché il nucleo assume le dimensioni di una palla da calcio. Per far ciò dobbiamo aumentare tutto di 10^{13} volte; la scala è questa:

$$1:10.000.000.000.000 \text{ ossia } 1:10 \text{ bilioni.}$$

Questa espansione è talmente enorme che lo spessore di un capello passerebbe da 0,05 mm a 500.000 km. E che cosa succede a questo punto al nostro atomo di idrogeno? Se ingrandiamo l'atomo in scala 1:10 bilioni il nucleo di un atomo di idrogeno diventa grande come una palla da calcio. A 1 km da questa palla gira un solo elettrone che percorre, per ogni giro, una distanza di 6 km.

Possiamo concludere che lo spazio è fondamentalmente vuoto. Se ad esempio comprimessimo la produzione quotidiana totale di ferro in Europa nei nuclei atomici, così da eliminare tutto lo spazio vuoto, essa starebbe comodamente in una scatola di fiammiferi. Lo stesso nostro corpo è fatto per il 99,99% di vuoto.

7. Il mondo della fisica quantistica

7.1. Schrödinger e la natura ondulatoria della materia

Nel 1905 Albert Einstein spiegò che la luce è fatta di piccole particelle, i fotoni. 300 anni prima Isaac Newton aveva affermato la stessa cosa, ma all'inizio del XIX secolo Thomas Young aveva dimostrato al di là di ogni dubbio che la luce ha una natura ondulatoria. Si capisce dunque perché molti fisici non erano pronti ad accettare la teoria dei fotoni di Einstein. La luce era fatta di onde o particelle? Quando nel 1913 Einstein venne accolto nell'Accademia delle Scienze prussiana, Max Planck gli scrisse una presentazione, in cui affermava: «sebbene le sue speculazioni l'avevano spinto talvolta troppo in là, come nel caso della sua ipotesi dei fotoni, tuttavia a ciò non si deve dare troppa importanza...». A poco a poco, sulla base di esperimenti che potevano venir spiegati soltanto assumendo una proprietà delle particelle, la

teoria di Einstein incominciò a imporsi. Quando nel 1921 gli venne conferito il premio Nobel, la sua teoria era ormai universalmente riconosciuta.

I fisici si abituarono così all'idea che la natura della luce può essere sia ondulatoria, sia corpuscolare (il cosiddetto «dualismo onda-corpuscolo della luce»). Non si riusciva a trovare una spiegazione che potesse dirimere questa apparente contraddizione.

Nel 1924 venne compiuto il passo successivo che inizialmente destabilizzò i fisici e che molti ritennero assurdo. Il fisico francese Luois de Broglie, un conte il cui nome per esteso era Louis-Victor Pierre Raymond Duc de Broglie, affermava nella propria tesi di dottorato che non soltanto la luce è fatta di particelle e di onde, ma che anche gli elettroni hanno una natura ondulatoria. Una tesi audace, non supportata da nessun esperimento. L'Università di Parigi esitava ad accettare la tesi di dottorato, e pertanto consultò Einstein. Questi rispose che la tesi era sì folle, ma che aveva una sua logica. Max Planck, al contrario, dichiarò che i giovani come de Broglie prendevano le cose troppo alla leggera. Cionondimeno il lavoro venne accolto.

Nel 1927 la tesi di de Broglie venne confermata per via sperimentale. I due fisici americani Clinton Davisson e Lester Germer dei Bell-Laboratorien riuscirono a dimostrare che un fascio di elettroni si comporta come le onde. De Broglie ottenne quindi, nel 1929, il premio Nobel per la fisica. Successivamente si scoprì che anche altre particelle atomiche hanno una natura ondulatoria.

La conseguenza era chiara: la materia può comportarsi come particelle e come onde. Affascinato dalle onde di materia, il professore di fisica di Zurigo Erwin Schrödinger si mise a studiare la tesi di dottorato di de Broglie e provò a rappresentarla con strumenti

matematici. I matematici conoscevano ormai da decenni le equazioni differenziali che descrivono in maniera elegante i movimenti ondulatori come quelli delle onde dell'acqua o delle onde acustiche, la cosiddetta «equazione delle onde». Se la materia è un movimento ondulatorio, allora anche quelle onde devono poter essere descritte per mezzo dell'equazione delle onde. Schrödinger si mise a modificare quell'equazione in maniera che potesse descrivere le onde di materia. Così formulò la celebre «equazione di Schrödinger», che sarebbe diventata una delle equazioni cardine della fisica quantistica. Tuttavia essa presentava un difetto estetico: la soluzione che doveva rappresentare le onde di materia era complessa. Ciò significava che richiedeva l'utilizzo di numeri complessi (cfr. appendice A.1), ossia numeri la cui radice quadrata è un numero negativo. Poiché una radice di questo tipo, ad esempio $\sqrt{-4}$, in realtà non esiste, non si capiva bene quale fosse il senso della soluzione di quell'equazione. D'altra parte Schrödinger mostrava che essa era in grado di risolvere in maniera soddisfacente non pochi problemi della fisica atomica. Prima di Schrödinger Werner Heisenberg aveva proposto un altro metodo di calcolo (per matrici). I due metodi si rivelarono equivalenti e adatti al calcolo delle onde di materia.

Nel 1933 Schrödinger ottenne il premio Nobel e prese il posto che era stato di Planck a Berlino.

Una via d'uscita dal dilemma della soluzione complessa venne indicata dal professore di fisica di Göttinga Max Born. Era stato assistente di Heisenberg quando questi lavorava al metodo di calcolo alternativo e dalla soluzione dell'equazione di Schrödinger ricavò il modulo quadro dei numeri complessi. Questo valore è un numero positivo e reale che può facilmente venir calcolato per ogni numero complesso (cfr. appen-

dice A.2). Sulla base di esperimenti precedentemente eseguiti sugli elettroni, Born sapeva che questi valori rappresentavano la frequenza – e quindi la probabilità – della presenza degli elettroni. Born propose così di calcolare il valore della soluzione dell'equazione di Schrödinger e di considerare quel valore la misura della probabilità della presenza delle onde di materia (più precisamente, la probabilità è il quadrato del valore).

Un esempio ci può aiutare a capire meglio: un elettrone viene emesso da una fonte puntiforme. Sin da principio si forma un'onda che si propaga in tutte le direzioni. Per mezzo dell'equazione di Schrödinger si calcola una soluzione a numeri complessi e se ne stabilisce il valore (al quadrato). Esso ci dice per ogni punto nei dintorni della fonte qual è la probabilità di trovarci l'elettrone.

A tutt'oggi l'interpretazione della soluzione complessa dell'equazione di Schrödinger non è del tutto chiara. A oltre 80 dalla formulazioni della teoria quantistica non c'è ancora un accordo definitivo sull'interpretazione delle asserzioni della fisica quantistica, mentre la formalizzazione matematica è universalmente accettata. Come è possibile che l'elettrone si propaghi come un'onda, ma che sperimentalmente si presenti come una particella con una posizione precisa? Vennero presentate molteplici interpretazioni. Una di queste fu avanzata dal matematico John von Neumann, che nel 1932 postulò che durante una misura l'onda collassa e si concentra in un punto («punto di misurazione») in una maniera indeterminata. La posizione della particella così misurata può essere prevista secondo la probabilità calcolata con l'equazione di Schrödinger. Questa interpretazione divenne nota come «collasso della funzione d'onda». Ci sono anche altre interpretazioni, su cui però sorvoleremo.

7.2. Il principio di indeterminazione di Heisenberg

Rutherford scoprì grazie ad appositi esperimenti che gli atomi possiedono sottostrutture: un nucleo e degli elettroni (cfr. par. 6). Negli anni Venti del secolo scorso Heisenberg prese a domandarsi quanto in profondità ci si potesse spingere, sulla scorta di quegli esperimenti, dentro le strutture atomiche e nel microcosmo, vale a dire fino a che punto fosse possibile misurarlo. Scoprì che c'è un limite di misurabilità oltre il quale non si può andare, e lo espresse nel suo celebre principio di indeterminazione. Per capire di che cosa si tratta, facciamo un esempio. Supponiamo di dover misurare una particella piccolissima, ad esempio una particella elementare. Dobbiamo sapere in quale posizione si trova e a quale velocità si muove. Potremmo determinarne la posizione puntandole contro un raggio di luce, osservare se e come esso viene riflesso e trarne le dovute conseguenze. La luce è composta di fotoni, quindi di particelle piccolissime. Quando i fotoni raggiungono la particella che intendiamo misurare, le cedono energia, determinandone un cambiamento di posizione e velocità. La misurazione diventa imprecisa. Sarebbe come se colpissi un palloncino con delle palline da tennis: l'urto ne modificherebbe sicuramente la posizione e la direzione.

Heisenberg mostrò che proprio per queste ragioni è impossibile misurare in maniera esatta la posizione e la velocità delle particelle a livello microcosmico. Si può infatti cogliere con molta precisione la posizione di una particella elementare, ma a quel punto ne risulta assai imprecisa la determinazione della velocità, e viceversa. C'è dunque un limite di misurazione oltre il quale non possiamo spingerci. Heisenberg lo espresse con una formula. Invece della velocità scelse di con-

siderare l'impulso, ossia la velocità moltiplicata per la massa della particella. Se si vogliono misurare la posizione x della particella e il suo impulso p , non si ottengono valori precisi, ma soltanto valori indeterminati.

Indichiamo l'indeterminatezza della posizione x con Δx e l'indeterminatezza dell'impulso p con Δp ; avremo:

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

dove h è una costante ($h = 6,624 \times 10^{-34}$ Js, il «quanto d'azione di Planck»), che precisamente qui è $h/4\pi$).

Come si vede, quanto più cresce Δp , tanto più diminuisce Δx , e viceversa.

Questa equazione è il celebre principio di indeterminazione di Heisenberg. Esso pone un limite di misurazione invalicabile quando ci si addentra nel microcosmo. Al di sotto di questo limite la natura si comporta in maniera completamente diversa da come siamo abituati.

Quando l'indeterminatezza Δx per la posizione di una particella e Δp per l'impulso sono entrambe talmente piccole che $\Delta x \cdot \Delta p$ è inferiore a h , allora ci troviamo al di sotto del principio di indeterminazione di Heisenberg. Non è dunque più possibile stabilire con misurazioni precise se anche qui valgono le medesime leggi del macrocosmo.

In linea di principio ci sono due possibilità. La prima è che anche lì vigano le medesime leggi di natura del mondo che conosciamo, ancorché non si riesca a dimostrarlo. Poiché il nostro mondo è determinato dal punto di vista fisico da alcune variabili (ad esempio distanza, tempo, energia), la medesima cosa dovrebbe darsi nel microcosmo, dove però noi non siamo in grado di osservarle. Pertanto in questo caso

si parla di «variabili nascoste». La seconda possibilità è che nel microcosmo valgano leggi di natura diverse, che ci sono ignote e che non riusciamo né a spiegare, né a capire sulla base della nostra esperienza. Molti elementi fanno pensare che sia proprio quest'ultima la spiegazione corretta.

Nel 1923, durante una conversazione con Werner Heisenberg, Niels Bohr descriveva in questi termini la situazione degli scienziati che studiano il microcosmo:

ci troviamo in un certo senso nella condizione di un esploratore che giunge in una terra lontana, in cui non soltanto le condizioni di vita sono diverse da quelle che conosceva in patria, ma in cui persino la lingua degli indigeni gli è del tutto ignota. Vuole capire, ma non ha i mezzi per farlo. In una condizione del genere una teoria non può affatto «spiegare» nella maniera in cui solitamente lo fa la scienza. Non ci resta che mostrare i nessi tra i fenomeni e procedere a tentoni.

Heisenberg, Bohr e altri erano convinti che nella terra appena scoperta operassero leggi completamente diverse da quelle del nostro mondo. Albert Einstein la pensava diversamente. Secondo lui nel microcosmo vigevano le medesime leggi del macrocosmo, ancorché non le si riuscisse a comprendere per mezzo delle nostre tecniche di misurazione. Egli credeva che esistessero delle variabili nascoste. Nel 1944 scriveva al fisico dei quanti e professore di fisica Max Born: «Tu ritieni che Dio giochi a dadi col mondo; io credo invece che tutto ubbidisca a una legge, in un mondo di realtà oggettive che cerco di cogliere per via meramente speculativa».

Si profilavano due possibili realtà distinte: da un lato, una realtà ignota con leggi di natura parzialmente diverse e, dall'altro, una realtà che obbedisce preci-

samente alle nostre leggi, ma con variabili nascoste. Heisenberg e Bohr erano per la prima via; Einstein per la seconda. I sostenitori di ognuna delle due fazioni cercarono incessantemente di persuadere i loro oppositori, elaborando costruzioni concettuali raffinatissime che avrebbero dovuto confermare la correttezza della loro posizione; ma puntualmente queste «dimostrazioni» venivano confutate dal partito avversario.

Così i sostenitori della realtà ignota al di sotto del principio di indeterminazione affermavano che esistono particelle elementari correlate (il fenomeno dell'*entanglement*), ossia particelle che in un certo momento si erano trovate unite, e che hanno continuano a influenzarsi vicendevolmente anche una volta poste a anni luce di distanza l'una dall'altra. Albert Einstein lo definiva un comportamento «spettrale».

Nel 1982 a Parigi il fisico francese Alain Aspect dimostrò su base sperimentale questa azione a distanza. Successivamente altri ricercatori intrapresero esperimenti analoghi. Tutti confermarono che la realtà sconosciuta del microcosmo esiste davvero e che Einstein aveva torto. Sicché al di sotto del principio di indeterminazione esiste una realtà dotata di leggi di natura diverse da quelle che conosciamo nel nostro mondo fatto di metri e di minuti. Sono le leggi della fisica quantistica.

«Ci fu un tempo in cui i giornali dicevano che soltanto 12 persone avevano capito la teoria della relatività. Io non credo che fu mai così. D'altro canto penso però che di si può affermare con certezza che nessuno capisce la meccanica quantistica». Così diceva il fisico dei quanti Richard P. Feynman, che nel 1965 era stato insignito del premio Nobel per i suoi lavori nell'ambito della elettrodinamica quantistica. Feynman, che era famoso per il suo spirito anticonvenzionale e per il suo

senso dell'umorismo, investì molte energie nel tentativo di spiegare la meccanica quantistica al grande pubblico in una maniera per quanto possibile «leggera».

7.3. Le leggi della fisica quantistica

Effettivamente le asserzioni della fisica quantistica sono talmente assurde che è difficile presentarle in ordine. Ci sono particelle elementari che distano tra loro anni luce e che cionondimeno «sanno» l'una quel che fa l'altra. Le particelle alfa possono abbandonare la loro posizione, nonostante le leggi della fisica classica ci dicano che la cosa è impossibile. Particelle minuscole occupano la loro posizione soltanto quando vengono misurate. Mentre nel nostro mondo esperibile tutto si svolge con continuità e costanza, il mondo dei quanti non conosce nessuna stabilità. In quel che segue affronteremo proprio questi diversi aspetti.

Salti quantici

Quando guardiamo un film al cinema percepiamo un movimento di immagini fluido. Quando un bambino tira una palla in aria vediamo che la palla che si muove con continuità, tracciando una curva; ciò significa che non procede a scatti. Se però consideriamo i singoli fotogrammi ci accorgiamo che in entrambi i casi si tratta di una sequenza di immagini (che si susseguono quindi a scatti l'una dopo l'altra).

Il mondo che osserviamo ci appare continuo: gli eventi non procedono a scatti. Fino al 1900 i fisici ritenevano ovvio che il mondo funzionasse in questa maniera. Quando un corridore aumenta la propria velocità non lo fa a scatti, ma progressivamente. Già nel 1704 Leibniz aveva affermato che «la natura non fa salti».

Max Planck fu il primo a sostenere, in un contributo del 1900, che nel microcosmo l'energia si presenta solo in quanti. Ciò significa che l'elettrone aumenta la propria energia sempre per salti. In questa maniera Planck riusciva a dar ragione di un fenomeno che la fisica classica non era riuscita a spiegare e che è entrato nella storia della fisica con il nome di «catastrofe ultravioletta». Trovò una formula che esprimeva esattamente la quantità di energia che si sviluppava da una radiazione. Si trattava di una formula di interpolazione assai indovinata, ma con un difetto estetico: l'energia era quantizzata, il che significa che l'energia dell'elettrone aumenta soltanto a scatti, compiendo cioè dei salti. In questo modo si introduceva la discontinuità nella fisica del microcosmo.

Lo stesso Planck non era molto soddisfatto di questa sua soluzione che metteva in discussione la continuità, uno dei fondamenti della fisica classica. Così, prontamente dichiarò che quella formula non era che un «espediente» e che sicuramente, prima o poi, se ne sarebbe trovata una migliore, capace di ristabilire la continuità dei fenomeni. Tuttavia questa formula migliore non venne mai trovata. Il contributo di Planck segnò la nascita della meccanica quantistica, riconoscendo che la discontinuità è una delle proprietà del microcosmo.

L'energia di una radiazione può venir emanata o assorbita soltanto in porzioni, in singoli quanti. Un quanto della luce rossa possiede con la sua lunghezza d'onda di 700 nm $2,8 \times 10^{-19}$ joule di energia. Si tratta della quantità di energia minima che può venir emessa a questa frequenza. Quantità inferiori non sono possibili.

Tuttavia, all'inizio, molti fisici non si mostrarono disposti a rinunciare a concezioni ormai care alla fisica

classica, come quella della continuità della natura. Alcuni anni dopo, Max Planck fece una considerazione importante: «Solitamente una nuova verità scientifica non si afferma perché i suoi contestatori se ne persuadono subito e ammettono di aver imparato qualcosa di nuovo; piuttosto accade che costoro pian piano passano a miglior vita e la nuova generazione incomincia fin da subito a familiarizzare con quella nuova verità».

Nell'ambito degli atomi, ad esempio, si danno continuamente processi discontinui. Nel paragrafo 6 abbiamo visto che gli elettroni si muovono intorno al nucleo. Se si somministra energia a un elettrone, questo passa a un'orbita superiore. Ma lo fa improvvisamente, con un salto, e non in maniera continua.

Misurazioni

Abbiamo visto che nel microcosmo non è possibile una misurazione esatta nel senso classico del termine. Cionondimeno, quando cerchiamo di misurare un valore, otteniamo anche qui un risultato; ma questo risultato dipende da molti fattori: da quel che si voleva misurare, dall'ordine con cui si è proceduto e dalla maniera in cui il misuratore ha eseguito la misurazione. Che cosa ci dice pertanto il valore ottenuto? Come va interpretato?

Come abbiamo visto, nel microcosmo non si danno «variabili nascoste», come aveva invece ipotizzato Einstein. Il microcosmo è proprio un altro tipo di realtà; una realtà che sfugge alle nostre rappresentazioni. Quando misuriamo ad esempio la polarizzazione di un fotone, quest'ultimo assume il valore che risulta dalla misurazione soltanto una volta che questa è stata eseguita. Prima della misurazione – ad esempio nel momento in cui si forma il fotone – quel valore non era ancora stabilito: esso si determina soltanto al mo-

mento della misurazione. Nel 1927 Werner Heisenberg scriveva: «L'orbita dell'elettrone si forma soltanto per il fatto che la osserviamo». Prima di ciò tutti i valori sono indeterminati, si dà soltanto una probabilità per possibili valori di misurazione.

7.4. Azione spettrale a distanza

Supponiamo di essere a Monaco, seduti a un tavolo su cui si trova una comunissima moneta. Nel medesimo istante a New York c'è un tavolo su cui pure si trova una moneta del medesimo tipo, ma lì intorno non c'è anima viva. A Monaco tiriamo in aria la moneta ed esce «croce». Nel medesimo istante a New York una mano fantasma tira la moneta ed esce «testa». Quando a Monaco esce «testa», a New York esce «croce». A New York esce sempre l'altra faccia della moneta rispetto a quanto accade a Monaco. Le monete si comportano come due gemelli. Sembra che la moneta di New York «sappia» quel che fa la moneta di Monaco, e che mostri sempre l'altra faccia rispetto a quella. «Ma una cosa del genere non è possibile!», direte. E avete ovviamente ragione. Eppure, sebbene una cosa del genere non accada mai nel mondo della nostra esperienza, essa accade continuamente nel microcosmo. Le monete in questione – nel nostro caso si tratta di fotoni – possono anche trovarsi a anni luce di distanza. Fotoni di questo tipo si trovano, ad esempio, nei cristalli. Un cristallo può emettere un fotone che si scinde in due fotoni che si disperdono in direzioni diverse. Cionondimeno essi rimangono dipendenti l'uno dall'altro; la ragione sta nel fatto che possiedono una medesima funzione d'onda che ne determina il comportamento futuro (cfr. par. 7.1).

Ecco una spiegazione più precisa. Le particelle della luce possiedono un determinato livello di oscillazione, la polarizzazione. Questa polarizzazione ha una direzione. I principi di conservazione della fisica esigono che le polarizzazioni dei fotoni correlati siano sempre perpendicolari tra loro. Ma, come abbiamo visto, prima della misurazione non c'è nessun valore determinato, nemmeno quello della polarizzazione. Soltanto nel momento in cui misuriamo la polarizzazione di una delle particelle, queste «decidono» quale polarizzazione assumere. E qui avviene quel che Einstein definiva «spettrale»: per mantenersi conforme alle leggi fisiche, la seconda particella deve necessariamente assumere una direzione di polarizzazione perpendicolare a quella della prima particella. Nel medesimo istante della misurazione della prima particella si genera dunque la direzione della polarizzazione della seconda. E ciò accade anche quando le particelle sono assai distanti tra loro.

Immaginiamoci che due fotoni correlati si siano dispersi nell'universo moltissimi anni fa. Sono ormai distanti anni luce l'uno dall'altro. Uno dei due giunge sulla Terra e noi ne misuriamo la polarizzazione. Nel medesimo istante l'altro fotone, sempre distante anni luce dal primo, assume una polarizzazione con una direzione perpendicolare a quella del fotone correlato. Si comporta cioè come se «sapesse» che il suo gemello è stato misurato, e adegua la propria polarizzazione di conseguenza.

L'informazione circa la direzione della polarizzazione da assumere viene trasmessa immediatamente alla seconda particella. Si potrebbe dire che ciò accade con una velocità «infinita». Molti fisici non vedevano di buon occhio quest'idea, poiché essa contraddiceva chiaramente la teoria speciale della relatività, secondo

cui è la velocità della luce la massima velocità possibile in natura.

Lo stesso Einstein era scettico. Scriveva infatti: «La conclusione [...] si può accettare soltanto a condizione che si assuma che la misurazione di S1 (la prima particella) modifichi telepaticamente la posizione reale di S2 (la seconda particella), oppure che si neghi in generale che cose che occupano spazi differenti possano avere posizioni reali indipendenti. Entrambe le condizioni mi sembrano inaccettabili» – e per questo qualificava il fenomeno come «spettrale».

Nel 1982, in un laboratorio di Parigi, Alain Aspect riuscì a dimostrare in maniera convincente e sulla scorta di esperimenti l'esistenza di questa azione a distanza. Dopo di lui altri ricercatori intrapresero esperimenti analoghi. Tutti confermarono che la reazione simultanea di particelle correlate, che Einstein aveva messo in dubbio, esiste davvero. Alcuni scienziati dell'équipe di Serge Haroche a Parigi arrivarono a dimostrare che esistono persino atomi correlati.

7.5. Effetto tunnel

Immaginiamoci uno zoo con una gabbia di predatori, diciamo di leoni. La gabbia è circondata da un rete alta 5 metri, per cui è impossibile che gli animali riescano a scappare. Difatti sappiamo per esperienza che nessun leone è in grado di scavalcare con un balzo un'altezza simile.

Una situazione analoga si dà nel microcosmo: al posto dei leoni mettiamo delle particelle alfa, dei nuclei di elio, che si trovano anche in nuclei atomi più grandi. Le particelle alfa non possono allontanarsi dal nucleo: la forza nucleare glielo impedisce, proprio

come la rete impedisce ai leoni di uscire dalla gabbia. Il nucleo atomico si comporta come un carcere per le particelle alfa.

Come abbiamo visto, l'equazione di Schrödinger descrive le onde della materia. Poiché anche le particelle alfa hanno una natura ondulatoria, possiamo applicare anche a esse quell'equazione. Il calcolo mostra sorprendentemente che devono esserci alcune particelle alfa che riescono a lasciare il nucleo. I fisici ritengono che queste particelle «si aprono un varco», che «si scavino un tunnel»; da qui l'espressione «effetto tunnel». L'esistenza di questo effetto si ricava anche dal principio di indeterminazione di Heisenberg: se lo spazio è molto limitato, la velocità può crescere al punto da consentire la formazione di un tunnel. Paragonando nuovamente questo fenomeno al comportamento degli animali si potrebbe dire così: immaginiamoci di chiudere in un recinto un giovane capriolo; se restringiamo progressivamente il recinto, il capriolo ha sempre meno posto e, verosimilmente in preda al panico, si scaglierà contro la recinzione per fuggire, magari pure distruggendola. Diciamo che il capriolo «si è aperto un varco» nel recinto.

Tra l'altro, proprio l'effetto tunnel è la causa della luminosità delle stelle. Il Sole e le stelle producono luce ed energia perché i protoni, ossia i nuclei di idrogeno, si fondono in nuclei di elio (particelle alfa). In questo modo si libera un'enorme quantità di energia di legame nucleare, che viene irradiata sotto forma di luce. Si tratta del noto processo della fusione nucleare.

Ma la fusione comporta un problema: i protoni del nucleo atomico sono tenuti insieme dalla «forza nucleare forte», che ha un raggio d'azione assai ridotto. Se un protone proveniente dall'esterno si avvicina a un altro protone, viene a trovarsi nel raggio d'azione della

forza nucleare forte: essa connette i due protoni e fa sì che si formi un atomo di elio. Ma i protoni hanno una carica elettrica che li porta a respingersi reciprocamente. Ciò ne impedisce la connessione: i protoni «non si piacciono» e «scappano via» l'uno dall'altro. A meno che la velocità dell'uno non sia talmente alta da spingerlo direttamente tra le braccia dell'altro. I calcoli mostrano che ciò può verificarsi soltanto a temperature altissime, diciamo intorno ai 10 miliardi di gradi. Si pensi che l'interno del Sole ha una temperatura di «appena» 15 milioni di gradi, quindi decisamente troppo fredda per una fusione. Ecco che entra in gioco l'effetto tunnel: un protone può aprirsi un varco e finire nelle braccia di un altro protone, il che significa che viene scagliato a tutta forza sull'altro e vi rimane attaccato. Fondendosi generano un nucleo di elio.

8. *Particelle elementari*

8.1. *Il neutrino*

Nel 1932 ai fisici erano note complessivamente quattro particelle: protoni, neutroni, elettroni e fotoni. Si pensava che queste fossero i mattoncini di cui si componeva la materia. E si supposeva fossero parti elementari, ossia non composte da parti più piccole.

All'inizio degli anni Trenta i fisici si trovarono di fronte a un serio problema: un neutrone isolato si scinde nel giro di un quarto d'ora in un protone e un elettrone. Ma in fisica vige la legge di conservazione dell'energia, sicché l'energia del neutrone deve essere pari alla somma delle energie dei prodotti della sua scomposizione. Gli esperimenti smentirono questa convinzione. I neutroni sono più pesanti di quel che

dovrebbero essere e questo rappresentava un serissimo problema per i fisici; si discuteva addirittura dell'eventualità che la legge di conservazione dell'energia non valesse per le particelle elementari.

La soluzione arrivò infine dal fisico di Zurigo Wolfgang Pauli, il quale nel 1930 ipotizzò l'esistenza di una nuova particella che viene prodotta dalla scissione del neutrone, accanto al protone e all'elettrone. Pauli sapeva bene che questa particella doveva essere leggera al punto da essere «invisibile». Egli formulò quest'ipotesi in una lettera al «Gruppo dei radioattivi» durante il Convegno di fisica che si tenne a Tubinga nel 1930. Scriveva: «Non oso ancora pubblicare niente su quest'idea, e mi rivolgo a voi fiducioso».

Ci si immaginava la nuova particella come un piccolo neutrone; per questa ragione Enrico Fermi propose di chiamarla «neutrino». Soltanto 20 anni dopo – nella prima metà degli anni Cinquanta – si riuscì a documentare la presenza del neutrino in prossimità dei reattori nucleari. Oggi se ne conoscono tre tipi.

Le proprietà dei neutrini sono notevoli. Essi sono diecimila volte più leggeri degli elettroni – ammesso che abbiano una massa. Di norma attraversano la Terra senza scontrarsi con nuclei atomici o con elettroni. Riescono perfino ad attraversare il Sole senza grossi problemi.

I neutrini si formano, come i fotoni, all'interno del Sole, nell'ambito di processi di fusione. Ma mentre ai fotoni servono molti anni per raggiungere la superficie del Sole, ai neutrini bastano pochi secondi. Il numero di neutrini emessi dal Sole è talmente grande che sulla Terra ne arrivano 65 miliardi per cm^2 al secondo. Quando prendiamo il sole sdraiati sulla spiaggia siamo bombardati da 300.000.000.000.000 neutrini al secondo. Se ognuno di essi fosse grande come un

granello di sabbia, verremmo ricoperti da 30.000 m³ di sabbia, che è poi la quantità che si trova in oltre 50 m di spiaggia sul Mare del Nord. Tutta questa «sabbia», ossia questi neutrini, ci attraversa in un secondo. Praticamente i neutrini non collidono con gli atomi del nostro corpo, ma li attraversano indisturbati, come quasi tutti attraversano tranquillamente la Terra senza provocare nessuna collisione. Ciò perché sono molto piccoli, e perché la materia è fatta quasi completamente di spazi vuoti (cfr. par. 6).

8.2. *Quark, leptoni & co.*

Rutherford aveva scoperto che l'atomo è composto da un nucleo e da elettroni; dopodiché la fisica nucleare capì che il nucleo è formato da protoni e neutroni; successivamente si scoprì l'esistenza del neutrino. Questo era lo stato dell'arte della fisica atomica intorno al 1930. Rimaneva aperta la questione se le particelle come i protoni e i neutroni fossero semplici e indivisibili, oppure composte da subparticelle.

Nel 1964 il fisico del Caltech (California Institute Of Technology) Murray Gell-Mann postulò l'esistenza di subparticelle che compongono i neutroni e i protoni. In quei mesi Gell-Mann stava leggendo *Finnegans Wake* di James Joyce; nel romanzo un uomo, Mark, ordina tre birre, che solitamente in inglese si chiamano *quarts*. Ma i *quarts* in Joyce diventavano *quarks*: «three quarks for Muster Mark» – «quark» era proprio il nome che Gell-Mann stava cercando. Chiamò così le sue particelle e, una volta che i suoi esperimenti ebbero effettivamente confermato l'esistenza di questi mattoncini elementari della materia, nel 1969 ottenne il premio Nobel per la fisica. I quark sono l'ultima

quark up	quark charm	quark top	fotone
quark down	quark strange	quark bottom	gluone
neutrino elettronico	neutrino muonico	neutrino tauonico	bosone Z
elettrone	muone	tauone	bosone W

FIG. 2.8. Particelle elementari (quark, bosoni, leptoni).

frontiera a cui si è pervenuti nel tentativo di scomporre la materia nelle sue parti più piccole.

Oggi si conoscono così tante particelle elementari che i fisici spesso scherzano sullo «zoo delle particelle elementari». Conosciamo sei quark, di cui si compongono ad esempio i protoni e i neutroni; sei leptoni, tra cui rientrano l'elettrone e tre tipi diversi di neutrini; infine ci sono i bosoni che regolano l'azione reciproca tra le particelle. Tra di esse operano infatti delle forze che presiedono al loro scambio di subparticelle. Detta un po' in soldoni, è come se le particelle si passassero continuamente delle palle. Queste «palle» sono bosoni o bosoni di gauge. Un facile esempio è la forza elettromagnetica, che viene prodotta proprio dallo scambio di fotoni.

Considerare tutte le connessioni possibili tra le particelle andrebbe ben al di là dei confini di questo libro; limitiamoci ai quark, che sono i mattoncini fondamentali dei protoni e dei neutroni.

Quando il fisico dei quanti Richard P. Feynman si trovava su Wangerooge, un'isola tedesca del Mare del Nord, dove stava trascorrendo un periodo di convalescenza dopo essersi ammalato di cancro, trovò in un negozio di alimentari un pacchetto con su scritto «Quark». In tono scherzoso disse: certo che i tedeschi sono proprio più avanti di noi! Negli Stati Uniti siamo

ancora alla ricerca dei quark, e qui li vendono già nei negozi.

Per formare un protone o un neutrone abbiamo bisogno soltanto di due dei sei tipi di quark: il quark d e il quark u (dove d sta per down e u per up). Questi quark possiedono cariche elettriche che non sono numeri interi: il quark u ha la carica positiva $2/3$ e il quark d la carica negativa $1/3$. Tre quark formano un protone o un neutrone. Il protone ha carica elettrica $+1$, quindi ha bisogno di due quark u e un quark d . La carica elettrica è dunque: $2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$.

Il neutrone non ha carica elettrica. È composto da due quark d e un quark u , e la carica è dunque: $-1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$.

Potremmo formalizzare la cosa in questo modo: protone = (u, u, d) ; neutrone = (u, d, d) .

Il capitolo sulla costituzione della materia non sarebbe completo se non si tenesse conto anche di queste particelle, che solitamente vengono dette «antimateria». Quasi tutte le particelle elementari hanno le loro antiparticelle, che presentano queste proprietà:

1. quando una particella si scontra con la sua antiparticella, entrambe si annientano completamente e si dissolvono in radiazioni;
2. quando due particelle si scontrano, possono formarsi le antiparticelle.

Naturalmente esistono anche antiparticelle dei quark: gli antiquark.

8.3. Che cosa sono le particelle di Higgs?

Il più grande acceleratore di particelle del mondo, il LHC (*Large Hadron Collider*), si trova al CERN (Conseil européen pour la recherche nucléaire) di Gi-

neva. In questo acceleratore i protoni collidono alla velocità della luce. Si lanciano miliardi di protoni gli uni contro gli altri. Si provocano oltre 100 milioni di collisioni al secondo, che generano miliardi di prodotti di disintegrazione, tra cui capita si trovino anche particelle estremamente importanti: le particelle di Higgs. Si lavora da anni a pieno regime per individuarle.

La sera del 4 luglio 2012 i ricercatori del CERN erano accalcati di fronte alla porta dell'aula magna, dove il giorno dopo si sarebbe tenuto un seminario importante. Molti avrebbero trascorso la notte dormendo sul pavimento, in maniera da potersi assicurare i posti migliori la mattina seguente. Poiché l'affluenza superava la capienza del locale, la conferenza venne spostata in un auditorium vicino, da dove fu trasmessa persino via internet. Correva voce che si fosse finalmente trovata la tanto attesa particella di Higgs. Durante la conferenza il direttore del CERN Rolf-Dieter Heuer dichiarò: «È stata scoperta una nuova particella che sembra confermare la teoria».

Giornalisti televisivi di tutto il mondo cercarono di spiegare ai loro telespettatori che cosa fosse questa particella. Ne risultò più o meno quest'immagine: una superstar fa la propria comparsa in un festival e, come prevedibile, viene circondata dai giornalisti; più si muove tra la folla, più la gente le si attacca alle calca; alla fine è come se la nostra superstar si muovesse all'interno di un grappolo di giornalisti e curiosi. Le spiegazioni si concludevano sempre con una considerazione di questo tipo: «Ecco, la particella di Higgs si comporta più o meno così».

Le reazioni dei telespettatori non dovevano essere delle più convinte. Pertanto occorre vedere un po' più precisamente come stanno le cose. Il modello standard delle particelle elementari è stato verificato per

mezzo di molti esperimenti, trovando sempre ottime conferme. Cionondimeno non si sa ancora da dove traggano la loro massa queste particelle elementari. Secondo il modello standard alcune particelle come i bosoni Z e W dovrebbero essere prive di massa. Ma non è così: esse hanno una massa non trascurabile. Per risolvere questa contraddizione, nel 1964 Peter Higgs e il belga François Englert avevano ipotizzato l'esistenza di un campo che riempie l'intero universo, oggi noto come il «campo di Higgs». In virtù di questi loro studi, nel 2013 ottennero entrambi il premio Nobel per la fisica. Il campo di Higgs interagisce con i bosoni, conferendo loro una massa. Ciò accade perché il campo frena il movimento delle particelle. La formazione della massa delle particelle materiali si spiega in questo modo. Possiamo immaginarci l'azione di «freno» esercitata dal campo in questa maniera: un anziano signore cammina lentamente nel parco, accompagnato da un cucciolo di cane. Il cucciolo salta di albero in albero e scorrazza in giro a grande velocità. Ciononostante non attraversa il parco più velocemente del vecchietto. Analogamente, le particelle inizialmente prive di massa che si muovono a grande velocità vengono frenate dall'interazione col campo di Higgs e, così facendo, ottengono una massa. Quanto più il campo di Higgs frena le particelle, tanto maggiore sarà la loro massa.

Si capisce bene come mai i fisici sono così impazienti di capire se con la dimostrazione del campo di Higgs si è in grado di fornire qualche indicazione riguardo all'ultimo mattoncino mancante del modello standard. Se ciò non accadesse, l'intero edificio della teoria delle particelle verrebbe messo in pericolo. La dimostrazione del campo di Higgs non si può tuttavia eseguire. Il campo produce infatti particelle – le co-

siddette particelle di Higgs – che si disintegrano assai rapidamente e la cui presenza può venir attestata soltanto a partire dai prodotti della loro scomposizione.

9. *Fine corsa: il vuoto*

Siamo ormai giunti alla fine del nostro viaggio che, partito dai microrganismi, ci ha condotto attraverso le molecole, gli atomi e le particelle elementari. Di fronte a noi si dà ora il nulla: lo spazio vuoto.

Il nulla esiste? Da un punto di vista filosofico il nulla non è pensabile perché, non appena lo si pensa, diventa qualcosa. Il filosofo greco Parmenide diceva che il «non essere» non si può conoscere, né esprimere.

Nel 1657 Otto von Guericke, uno dei quattro borgomastri di Magdeburgo, cercò di capire come si comporta una sfera al cui interno viene prodotto il vuoto. Progettò un esperimento spettacolare. Nell'estate del 1657 si fece costruire due semisfere di bronzo dotate di una guarnizione e le fece combaciare; con l'aiuto di una pompa prelevò l'aria dall'interno della sfera così ottenuta. Dopodiché legò a ogni semisfera otto cavalli che, procedendo nelle due direzioni contrarie, dovevano cercare di separare le due semisfere. I cavalli non ci riuscirono; ma non appena la sfera venne nuovamente riempita di aria, le semisfere si separarono senza nessuno sforzo. La pressione dell'aria sui due emisferi entro cui si era creato il vuoto ne impediva l'apertura. L'esperimento di Guericke divenne celebre come l'«esperimento degli emisferi di Magdeburgo».

Da quando c'è la fisica quantistica non ha più senso parlare di vuoto. Il principio di indeterminazione di Heisenberg ci dice che è impossibile determinare

con esattezza il luogo e l'impulso delle particelle. Se avessimo un vuoto effettivo, i valori sarebbero tutti esattamente $= 0$, quindi determinabili in maniera univoca – il che contraddice il principio di indeterminazione. Si è pensato che nel vuoto si producano di continuo particelle virtuali, che si formano rapidamente e che altrettanto rapidamente si disintegrano (per via delle loro antiparticelle). Sicché nel vuoto ci sarebbe un continuo ribollire di particelle, un po' come in una pentola con acqua bollente. Si parla in questo caso di «fluttuazione quantistica» o di «energia di punto zero».

Nel 1948 Hendrik Casimir approntò un esperimento per dimostrare la fluttuazione delle particelle nel vuoto. Due lastre di metallo conduttrici di energia vengono poste parallelamente l'una all'altra. Entrambe hanno una temperatura di 0 K e si trovano nel vuoto. Se nel vuoto si dà l'energia di punto zero, tra le due lastre si formano e si disintegrano continuamente delle particelle. Sappiamo che le particelle si comportano come onde (cfr. par. 7.1). Se la distanza tra le lastre è talmente piccola da non consentire la formazione di certe lunghezze d'onda, tra le lastre si trovano meno particelle virtuali che al loro esterno. Ciò produce una pressione dall'esterno, che siamo in grado di misurare. Se le due lastre distano 190 nm la pressione è di 1 pascal . Questo effetto ha preso il nome di «effetto Casimir», e venne confermato sperimentalmente.

III

Il macrocosmo: l'universo gigantesco

Quando cesserò di stupirmi e incomincerò a capire?

Galileo Galilei

Dopo aver esaminato il microcosmo, passiamo ora a considerare il macrocosmo e le sue dimensioni. Partendo dalla Terra attraversiamo il sistema solare, la nostra galassia (la Via Lattea), e approdiamo negli spazi sterminati dell'universo. Seguiamo lo sviluppo del cosmo dall'esplosione originaria, il Big Bang, fino a oggi e indaghiamo i grandi misteri dei nostri giorni: la materia e l'energia oscure.

1. *La dimensione del cosmo*

1.1. *La Terra: dimensione e generazione*

Il nostro pianeta percorre la propria orbita intorno al Sole a una velocità di 29,78 km/s, ossia oltre 107.000 km/h. Esso dista dal Sole circa 150 milioni di km. Questa è precisamente la distanza necessaria affinché possa esserci vita sulla Terra. Se la distanza dal Sole fosse inferiore anche solo del 5%, il nostro pianeta sarebbe un deserto disabitato. Se fosse superiore del 10%, la superficie della Terra sarebbe ricoperta di ghiaccio. La Terra ha un diametro di poco inferiore ai 13.000 km. Se volessimo raffigurarci un modello del Sole e della Terra con la Terra del diametro di 1 m, quello del Sole arriverebbe oltre i 100 m.

In questo modello la Terra è dunque una sfera microscopica che gira intorno a un Sole immenso a una distanza di 150 milioni di km (fig. 3.1).

Come è nata la Terra? Esistono molti racconti mitologici e biblici che ne narrano la generazione (come, ad esempio, il racconto della creazione nel *Genesi*). A differenza di quelle maniere di spiegare la nascita del nostro pianeta, le spiegazioni scientifiche ricorrono a processi astrofisici.

In un'epoca anteriore di circa 4,6-4,7 miliardi di anni alla formazione del nostro sistema solare, una nebbia solare gigantesca si è condensata per via della gravitazione. Come una pattinatrice che per accelerare le proprie piroette deve tenere le braccia distese lungo il corpo, quella nebbia si compatta e inizia un movimento di rotazione. La materia si concentra in orbite ellittiche intorno a un baricentro comune. In questo centro la massa raggiunge una densità talmente alta da innescare un processo di fusione nucleare. Nasce il Sole. La materia restante che ruota intorno al Sole si raccoglie in ammassi di materia. Quelli con massa maggiore attraggono, sempre per via della gravitazione, altra materia; nascono così i protopianeti e da questi, successivamente, i pianeti, tra cui anche la Terra.

All'origine l'atmosfera della Terra era formata da idrogeno ed elio. Su di essa si trovavano già tutti gli elementi chimici che ci sono ancor oggi, ma si presentavano quasi tutti allo stato liquido. Gli elementi più densi presero a precipitare verso il nucleo del pianeta, mentre quelli più leggeri rimasero in superficie. In questa maniera si è prodotta la struttura sferica e stratificata del nostro pianeta (cfr. cap. II, par. 1.2). Fino a 2,5 miliardi di anni fa la temperatura continuò a scendere sotto i 100°C: si formò la crosta terrestre.

• ← TERRA

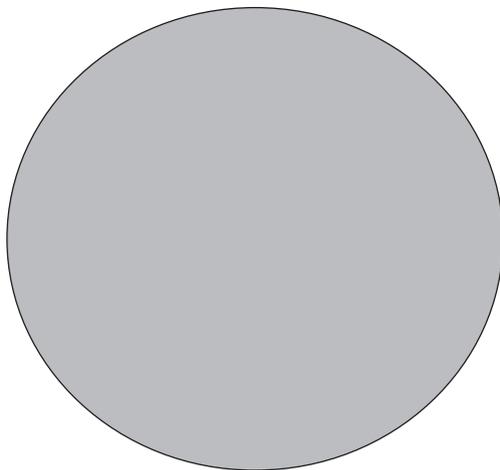


FIG. 3.1. La Terra rispetto al Sole è come il punto in alto. Secondo i riferimenti assunti in questa raffigurazione, la Terra (il punto) disterebbe dal Sole 6 metri.

Le cosiddette alghe azzurre (che sono propriamente batteri) si formarono nell'acqua 3,5 miliardi di anni fa e, per mezzo della fotosintesi, liberarono ossigeno dall'ossido di carbonio. In questo modo la quantità di ossigeno nell'atmosfera prese lentamente ad aumentare.

1.2. *Viaggio al centro della Terra*

La Terra ha una forma quasi sferica, con un diametro tra i 12.000 e i 13.000 km. Grazie alla forza di gravità noi rimaniamo attaccati al suolo. Se non ci

fosse la gravità, ci libereremmo nell'aria come gli astronauti nello spazio. L'accelerazione gravitazionale della Terra si indica con la lettera g , dove $g=9,81 \text{ m/s}^2$. Ciò significa che quando siamo in caduta libera la nostra velocità aumenta ogni secondo di $9,81 \text{ m/s}$. Tuttavia la caduta viene contrastata dall'attrito dell'aria, che ne frena la velocità.

Meno noto è il fatto che, a causa della rotazione terrestre, su di noi agisce anche una forza centrifuga che ci spinge verso l'esterno – o, meglio, verso l'alto. In definitiva, è come essere su una giostra che, girando, spinge i passeggeri verso l'esterno. Questa forza centrifuga imprime su di noi un'accelerazione di $0,02 \text{ m/s}^2$. Altrimenti detto: se non ci fosse la gravità verremmo spinti via con una velocità crescente di $0,02$ metri al secondo quadrato. Ciò significa che dopo un'ora ci troveremmo a volteggiare a diversi metri di distanza dal suolo terrestre. All'equatore la forza centrifuga è un po' più grande; al Polo Nord è nulla.

Che cosa sappiamo di quel che c'è dentro la Terra? Immaginiamoci di compiere un viaggio in un ascensore che ci porta dal punto in cui ci troviamo fino al centro del pianeta. Percorreremmo circa 6.500 km . Dapprima passeremmo attraverso l'involucro esterno, la crosta terrestre. Questa galleggia su un denso strato roccioso ed è spessa 35 km circa. Se la Terra avesse un diametro di soli 2 m , la parte solida posta al di sopra di questo strato misurerebbe appena $2,5 \text{ mm}$. Accade esattamente come con il latte: quando lo si scalda sulla superficie si forma una pellicola. Ecco, noi viviamo su questa sottile «pellicola» e sotto di noi c'è uno strato di roccia densa e viscosa.

Sicché la Terra è come un calderone che ribolle, in cui di tanto in tanto la parte interna trova una via d'uscita attraverso la crosta sottile esterna, la quale è

composta di tutti gli elementi da cui deriva la vita, così come di carbonio, oro, argento, petrolio ecc. A questo punto assisteremmo a uno spettacolo naturale assai pericoloso: l'eruzione di un vulcano.

Il nostro ascensore si mette in moto. A 5 m di profondità raggiungiamo lo strato più profondo in cui vivono dei mammiferi: si tratta dei *cynomys*, anche conosciuti come «cani della prateria», che scavano tunnel che arrivano a quella profondità e che sono dotati di due uscite. I tunnel della metropolitana possono raggiungere i 100 m di profondità; i più profondi – proprio a 100 m dal suolo – si trovano a San Pietroburgo. A 120 m ci troveremmo a constatare non senza un certo stupore che esistono specie di alberi le cui radici arrivano fin lì. Si tratta di fichi sudafricani che crescono in ambienti simili a quelli desertici, che hanno radici che si sprofondano nel terreno fino a trovare l'acqua. Ci sono miniere che arrivano fino a diverse centinaia di metri di profondità. Con le trivellazioni della crosta terrestre si raggiungono talvolta strati ancora più profondi. Il pozzo più profondo è sulla penisola di Kola, in Russia, e ha richiesto una perforazione di 12 km. In Germania, a Windischenbach, si è arrivati a scavare fino a 9,1 km.

Quanto più si scende nelle profondità della Terra, tanto maggiori diventano la pressione e la temperatura. A 14 km di profondità la pressione è di circa 400 MPa e la temperatura di circa 300 °C.

Dopo circa 35 km, attraversata una zona di passaggio, raggiungiamo il mantello superiore. Qui troviamo uno strato roccioso denso, composto di silicati e ossidi. Le temperature salgono tra i 1.000 e i 2.000 °C, tutta la massa è in movimento.

A 2.900 km di profondità raggiungiamo la parte esterna del nucleo terrestre, che è liquido e compo-

sto essenzialmente di una miscela di nichel e ferro. La temperatura è intorno ai 3.000 °C. Questa miscela in movimento, insieme alla rotazione terrestre, è responsabile del campo magnetico della Terra che ci protegge dal vento solare.

Raggiunti i circa 5.000 km di profondità ci troviamo all'interno del nucleo terrestre. Esso è composto, probabilmente, di una lega di ferro e nichel. La pressione qui è 3,6 milioni di volte superiore a quella a cui siamo abituati e la temperatura si aggira tra i 4.000 e i 5.000 °C. Proprio questa pressione elevata fa sì che il nucleo sia solido e non liquido.

1.3. *La Terra e la sua Luna*

Dopo circa 30-50 anni dalla formazione del sistema solare – 4,5 miliardi di anni fa – si è formata la Prototerra, un antenato del nostro pianeta, che proprio allora entrò in collisione con un corpo celeste delle dimensioni di Marte. Fortunatamente l'angolo d'urto era obliquo e ciò consentì di evitare uno scontro diretto: il corpo celeste sfiorò appena la Prototerra. Cionondimeno una grande quantità di materia venne scaraventata nell'orbita terrestre, si compattò e diede origine a quella che oggi chiamiamo Luna. La materia restante del corpo celeste si unì alla Prototerra e così si formò il nostro pianeta.

Inizialmente la Luna distava dalla Terra soltanto tra i 20.000 e 30.000 km. Oggi la distanza ha raggiunto i 384.400 km, e il tempo di rotazione intorno alla Terra dura più di 27 giorni. In virtù della rotazione terrestre, a noi sembra che la Luna ruoti intorno alla Terra in un solo giorno – come il Sole. Con la prima spedizione lunare – l'*Apollo 11* – vennero portati sulla Luna dei

retroreflessori laser, a cui da allora si mandano regolarmente segnali. Calcolando il tempo che il segnale luminoso impiega a tornare indietro si riesce a stabilire con una precisione al centimetro la distanza del satellite. La distanza della Luna dalla Terra aumenta ogni anno di 3,8 cm, giacché essa si allontana da noi con un movimento in accelerazione progressiva.

Ma che ne sarebbe della Terra senza la Luna? La rotazione del satellite intorno alla Terra ne stabilizza l'asse: se non ci fosse la Luna, l'asse sarebbe soggetto a oscillazioni enormi. La regolare scansione dell'anno in inverno ed estate verrebbe meno, e la Terra si troverebbe in condizioni analoghe a quelle in cui si trovava circa 100.000 anni fa. A quel tempo l'asse terrestre aveva oscillazioni di appena 1,5 gradi. Le valli fiorite erano deserti e al nord incominciò l'era glaciale. Se non ci fosse la Luna l'asse terrestre si ribalterebbe, provocando una catastrofe climatica. La vita, così come la conosciamo, non si sarebbe mai sviluppata in quelle condizioni. Se non ci fosse stata la Luna l'evoluzione della Terra sarebbe stata probabilmente simile a quella di Marte, un pianeta senz'acqua e con una superficie desertica.

1.4. *C'è vita sugli altri pianeti?*

Intorno al Sole ruotano nove pianeti: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno. Dal 2006 Plutone non è più ritenuto un pianeta vero e proprio, e lo si include nel gruppo dei pianeti nani. Tutti questi pianeti formano, insieme al Sole, il sistema solare che ha un diametro di circa 9 miliardi di km. Tutti i pianeti ruotano intorno al Sole, ma con velocità differenti: la Terra ci mette un anno, Nettuno ce ne mette 165,49.

C'è o c'è stata vita su qualche altro pianeta? Marte fu ritenuto a lungo un possibile candidato per questa circostanza e divenne pertanto oggetto di ricerche astronomiche particolarmente interessanti. Nell'agosto del 2012 il veicolo spaziale *Curiosity* atterrò integro sul pianeta rosso dopo un viaggio di otto mesi e ne inviò immagini alla Terra. Quelle fotografie ritraevano ciottoli e formazioni argillose che vennero ritenuti segni inequivocabili della presenza di antichi mari. Ma fu grande la delusione di chi sperava di rinvenire tracce di vita: nell'atmosfera erano completamente assenti il metano e altre molecole organiche. Nel novembre 2012, durante una conferenza stampa della NASA, venne annunciata una «buona notizia»: i giornalisti accorsi vennero informati del fatto che nei campioni di suolo prelevati da *Curiosity* erano state trovate tracce di carbonio, elemento fondamentale della materia organica. Tuttavia i ricercatori della NASA informarono subito gli uditori che la presenza di anidride carbonica poteva avere anche un'origine diversa – il che fece svanire nuovamente i sogni sulla presenza di vita su Marte. I ricordi andarono subito ad altri episodi precedenti – in cui la NASA aveva comunicato di aver trovato tracce di batteri su meteoriti di Marte e acqua corrente – che si erano poi rivelati illusori. Così a tutt'oggi non è dato sapere se vi sia mai stata vita su Marte.

Complessivamente Marte rappresenta una regione assai poco ospitale per le forme di vita. La temperatura media è di circa -63 °C, giacché i venti polverosi che si generano dai deserti in superficie impediscono la penetrazione della luce solare.

Quanto sia irrealistica l'idea di forme di vita extraterrestri su altri pianeti del nostro sistema solare lo mostrano le sonde spaziali, che al passaggio dei pia-

neti ne mandavano immagini alla Terra. Su Saturno, ad esempio, venne osservato un ciclone che viaggiava a una velocità di 517 km/h. Giusto per farsi un'idea: le peggiori tempeste sulla Terra con grado di potenza 12 – con una velocità di circa 120 km/h – producono danni e devastazioni impressionanti. Le tempeste più violente nel nostro sistema solare si sono osservate su Nettuno: esse raggiungevano una velocità di circa 2.000 km/h. Non si riesce neppure a immaginare quali sarebbero state le loro conseguenze sulla Terra.

Il 15 ottobre 1997 partì dalla Terra la sonda spaziale *Cassini* diretta sulla luna di Saturno, Titano, distante dal nostro pianeta 1,3 miliardi di km. La sonda aveva viaggiato per oltre sei anni ed era giunta a destinazione il 14 gennaio 2005. Titano sembrava simile alla Terra: c'erano corsi d'acqua in superficie e talvolta pioveva. Dalle analisi risultò che quel che scorreva non era però acqua, ma metano, che a quelle temperature si presenta allo stato liquido. Il metano è altamente infiammabile, ma su Titano mancava l'ossigeno necessario per innescare qualsiasi processo di combustione. L'atmosfera conteneva soltanto azoto.

Le orbite di Marte e di Venere sono quelle che si sviluppano più vicino alla Terra. Il 6 giugno 2012 Venere si posizionò esattamente di fronte al Sole, mostrandosi alla Terra come una piccola macchia nera sul disco solare. Milioni di persone osservarono il fenomeno grazie ad appositi filtri solari – uno spettacolo del genere si ripresenterà soltanto nel 2117.

Venere è il pianeta più simile alla Terra per massa, densità e dimensioni. Si trova più vicino al Sole e pertanto la sua temperatura è superiore alla nostra. Ma come sarebbe trascorrere un giorno su Venere, ovviamente dotati di una tuta spaziale adeguata? Un giorno venusiano dura 243 giorni terrestri ed è pertanto estre-

mamente lungo. L'alba dura mesi e il Sole sorge – a differenza di quanto si osserva dalla prospettiva terrestre – da ovest a est. Ciò perché Venere è l'unico pianeta che gira intorno al Sole in senso contrario. La ragione non è chiara. Su Venere non c'è mai molta luce, neppure «in pieno giorno», giacché lo spesso strato di nubi (che arriva a misurare svariati km) la assorbe quasi tutta. La luce del giorno è pertanto di un giallo lattiginoso. La temperatura è ben più elevata che su qualsiasi altro pianeta e arriva fino a 500 °C. In queste condizioni alla nostra tuta spaziale non è richiesto di resistere soltanto a questo calore tremendo, ma anche a una pressione atmosferica di 90 atmosfere terrestri. Ovviamente a quelle temperature non c'è acqua. Intorno a noi soffia una leggera brezza, ma a 40 km dal suolo infuria un uragano.

1.5. Un viaggio intorno al cosmo

Il sistema solare appartiene alla galassia «Via Lattea». Quest'ultima è un'isola nel cosmo, composta da più di 100 miliardi di soli. Intorno a quest'«isola» c'è lo spazio vuoto. Molto più in là vi sono altre galassie, altre «isole di stelle».

La Via Lattea ha un aspetto a spirale (fig. 3.2). Ruota intorno al proprio centro a una velocità di 220 km/s e una rotazione completa dura all'incirca 230 milioni di anni. Il nostro sistema solare dista pressappoco 30.000 anni luce dal centro. Per farci un'idea delle dimensioni di questa galassia proviamo a immaginarci una cosa di questo tipo: un raggio di luce viene irradiato dal margine esterno della Via Lattea al tempo della nascita di Cristo, quindi 2.000 anni fa, e la attraversa nel punto della sua massima estensione;

oggi quel raggio ne avrebbe percorso appena il 2%. Oppure immaginiamoci di percorrere la Via Lattea da un capo all'altro con un airbus A380: il nostro viaggio durerebbe all'incirca 120 miliardi di anni. Quasi nove volte quello dell'universo: un'impresa senza speranza!

Ma facciamo un esperimento mentale. Immaginiamoci di essere su un razzo che sfreccia nel cosmo alla massima velocità possibile. Non teniamo conto della distorsione temporale (cfr. cap. I, par. 3.1), della gravità e delle temperature. Viaggiamo a una velocità di 300.000 km/s, ossia all'incirca la velocità di un punto che in un secondo ruota più di sette volte intorno alla Terra. Partiamo. Dopo appena 8 minuti passiamo il Sole e dopo altre 4-5 ore passiamo accanto a Nettuno, il pianeta più lontano. Abbiamo lasciato il sistema solare. Dopodiché proseguiamo in direzione della stella più vicina, la *Proxima centauri*. Ci vogliono ben quattro anni per raggiungerla – una distanza immensa. La *Proxima centauri* è la stella della Via Lattea più vicina al Sole; è più piccola del Sole e può venir osservata soltanto dal di fuori dell'Europa. Proseguiamo. Ogni paio d'anni incontriamo una nuova stella. Manteniamo la velocità di 300.000 km/s; dopo 70.000 anni ci rendiamo conto che il numero delle stelle diminuisce progressivamente. Entriamo in uno spazio vuoto. Abbiamo lasciato la Via Lattea, siamo usciti dalla nostra galassia.

Accade grosso modo come quando partiamo da una grande città a bordo di un treno di notte: ci lasciamo alle spalle un mare di luci che progressivamente si allontana e si rimpicciolisce, e ci troviamo avvolti nell'oscurità. Così il mare di luci delle stelle che compongono la Via Lattea si trasforma progressivamente in una nebbia e noi ci troviamo avvolti nell'oscurità più buia. Molto in lontananza intravediamo dell'altra



FIG. 3.2. La galassia spirale M101, nota anche come Galassia girandola.

nebbia e qualche macchia di luce: si tratta di altre galassie, altre «isole di stelle».

Dopo 160.000 anni che viaggiamo nell'oscurità, incontriamo la Nube di Magellano, una galassia piccola vicina, e dopo 2,5 milioni di anni arriviamo alla Nebulosa di Andromeda, che è invece la galassia grande più vicina. Per capire meglio questa considerevole distanza temporale, si pensi che se guardiamo all'indietro di 2,5 milioni di anni, ci troviamo in un'epoca in cui sulla Terra non era ancora comparso neppure *l'homo sapiens*.

La Nebulosa di Andromeda è più grande della Via Lattea. Le due galassie sfrecciano l'una accanto all'altra a una velocità di 150 km/s; a un certo punto si scontreranno, e verosimilmente si fonderanno in un'unica galassia. Ma ciò accadrà soltanto tra 5 miliardi di anni.

Proseguendo nel nostro viaggio ci troviamo circondati per un lungo tratto dal vuoto. Qui regna l'oscurità più profonda, la notte eterna del cosmo. Soltanto con l'aiuto di telescopi sofisticati riusciamo a scorgere in lontananza rare immagini luminose, le galassie. Il cosmo è composto per la maggior parte di spazio vuoto. Le galassie sono immagini rare ed è quasi un colpo di fortuna passarci accanto.

1.6. Le dimensioni dell'universo

Per farci un'idea complessiva delle dimensioni dell'universo proviamo a ridurlo in scala 1:1 miliardo. Lasciando immutato il tempo, a un anno luce corrisponderebbe ora un tratto poco inferiore ai 10.000 km e la velocità della luce sarebbe all'incirca di 30 cm/s, ossia 1080 m/h. Il Sole è una palla infuocata con un diametro di 1,40 m, intorno a cui ruota la Terra a una distanza di appena 150 m. La Terra si è ristretta fino ad assumere un diametro di 1,2 cm, e il pianeta nano più lontano, Plutone, dista 6 km. Oltre Plutone si apre un immenso spazio vuoto, giacché la prima stella luminosa si trova appena a 43.000 km. Stante questa scala, se poniamo ad esempio che il Sole si trovi da qualche parte in Germania, ecco che la prima stella disterebbe due volte la distanza dell'Australia. Per 140.000 km si incontrano solamente altre 20 stelle luminose.

Facciamo una cosa analoga per la nostra galassia. Comprimamo ulteriormente il nostro universo compresso in scala 1:1 milione. A questo punto la Via Lattea occupa uno spazio corrispondente a quello che si otterrebbe sollevando la superficie della Germania di 20-50 km. Questo spazio è riempito da 100 miliardi di stelle che distano tra loro mediamente una cinquantina

di metri. Da qualche parte all'altezza dell'Assia, della Sassonia o della Baviera si trova il Sole, che ora ha un diametro di 0,002 mm. L'intero sistema solare ha un diametro di 12 mm e la Terra è talmente piccola che difficilmente riusciamo a vederla. Un anno luce misura ora 10 m. La galassia più vicina, la Nebulosa di Andromeda, dista 20.000 km, e si trova pertanto – nella nostra rappresentazione in scala – da qualche parte in Australia. Per raggiungerla dovremmo percorrere distanze incredibili e finiremmo in spazi di totale oscurità.

Se riduciamo ancora una volta questo universo in scala 1:1 milione, ecco che un anno luce corrisponde a 0,01 mm. La nostra galassia si restringe fino a diventare un'immagine indistinta di 80 cm di diametro. Il sistema solare sparisce in questa nebbia ed è talmente piccolo che neppure lo si vede. Le stelle, minuscoli puntini, distano tra loro mediamente 0,05 mm. La prima grande galassia dista ora 20 m. Le altre si trovano, ad esempio, a 739 m (Vergine) e a 38 km (Orsa Maggiore). Tutte queste isole di stelle si muovono e girano nello spazio. Dalla nostra prospettiva riusciamo a vedere soltanto una distanza di 190 km; quel che c'è oltre ci rimane invisibile.

Per amor di completezza occorre ricordare che nelle rappresentazioni appena descritte cambia di regola anche il tempo. Tuttavia, perché esse funzionino, ci occorreva che la velocità della luce rimanesse invariata, con i suoi 300.000 km/s, nonostante le contrazioni dell'universo. Ma a rigore si contrarrebbe anche il tempo. Nella prima riduzione in scala 1:1 miliardo un anno dura 0,03 secondi e l'universo avrebbe complessivamente un'età di 14 anni. Nella seconda riduzione l'universo avrebbe solo 6 minuti e nella terza 0,0003 secondi.

1.7. La relatività del tempo

Grazie alla scoperta della teoria della relatività di Einstein sappiamo che a velocità elevata un orologio procede più lentamente. Quando viaggiamo in auto i nostri orologi procedono effettivamente in maniera più lenta, cionondimeno la differenza rispetto agli orologi in situazioni di quiete è talmente piccola che non la si riesce neppure a misurare.

Il 20 luglio 1969 Neil Armstrong e Edwin Aldrin sono i primi uomini a mettere piede sulla Luna. A bordo di un razzo, *Apollo*, che viaggiava ad altissima velocità (a poco meno di 40.000 km/h), percorsero i 380.000 km che li separavano dalla loro meta. A quella grandissima velocità, una volta sbarcati sulla Luna, l'orologio di bordo segnava un ritardo di appena 1,2 secondi.

La velocità massima mai raggiunta dall'uomo è all'incirca 383.680 km/s. È la velocità raggiunta dalla sonda spaziale della NASA *New Horizons*, lanciata nel 2006, che dovrebbe raggiungere Plutone nel 2015.

Tuttavia alle grandi velocità dei razzi spaziali o nel caso dei satelliti la differenza temporale diventa rilevante. Il sistema di navigazione GPS, regolato via satellite, deve tenere conto della differenza di tempo determinata dalle alte velocità dei satelliti.

Quando la velocità raggiunge alcune migliaia di km/s la differenza temporale diventa notevole. A 90.000 km/s il minuto si riduce a 57 secondi. Le riduzioni precise sono riportate nella tabella 3.1.

Nel 2012 l'ESA (European Space Agency) ha stabilito che entro 10 anni avrebbe spedito la sonda spaziale *Juice* (Jupiter Icy Moon Explorer) su Giove, affinché potesse studiare per tre anni le tre lune di Giove Ganymed, Europa e Kallisto. Giove dista 800

TAB. 3.1. *La dilatazione del tempo*

La velocità del razzo in percentuale rispetto alla velocità della luce	La corrispondenza in secondi di un minuto terrestre all'interno del razzo
10%	59,4
20%	58,8
30%	57,0
40%	55,2
50%	51,6
60%	48,0
70%	42,6
80%	36,0
90%	26,2
99%	8,5
99,99%	0,8
100%	0

milioni di km e la sonda lo raggiungerà pressappoco in otto anni, nel 2030. Supponiamo che sulle lune di Giove vi sia una spessa crosta di ghiaccio che copre immensi oceani di acqua allo stato liquido in cui eventualmente si diano forme di vita. Se sulle lune di Giove venissero inviati anche degli astronauti, il loro viaggio di andata e ritorno durerebbe 16 anni – un tempo folle da qualsiasi punto di vista. Viene quindi da chiedersi: dal momento che alle alte velocità il tempo si accorcia, non si può spedire nello spazio una navicella che viaggi alla metà della velocità della luce e che quindi consenta di percorrere quelle distanze in tempi tollerabili? Purtroppo ci sono diverse ragioni tecniche che non consentono di raggiungere velocità di quel tipo, di cui purtroppo non possiamo dare ragione in questa sede. Cionondimeno con l'aiuto di un esperimento mentale possiamo provare almeno a immaginarci che cosa vorrebbe dire compiere un viaggio a quelle velocità.

Supponiamo dunque che una squadra di astronauti viaggi verso Giove, che si trova a una distanza media dalla Terra di 800 milioni di km. Supponiamo ancora

che il razzo viaggia a 255.000 km/s, ossia all'85% della velocità della luce. Dalla tabella 4 sappiamo che in quelle condizioni il tempo scorre con una velocità dimezzata rispetto al tempo terrestre. Un minuto sulla Terra corrisponde a mezzo minuto nella capsula spaziale.

Un semplice calcolo mostra che alla velocità di 255.000 km/s il viaggio spaziale raggiunge Giove già dopo 52 minuti. Gli astronauti possiedono naturalmente un orologio all'interno della navicella spaziale, ma esso procede alla metà della velocità che aveva sulla Terra. Secondo questo orologio raggiungono la meta in appena 26 minuti. Alla velocità di 255.000 km/s Giove si raggiunge quindi in 26 minuti. Il calcolo è questo: 26 minuti, ossia 1560 secondi, alla velocità di 255.000 km/s fa all'incirca 400 milioni di km. Ma Giove dista 800 milioni di km. Come è possibile che dopo 400 milioni di km i nostri astronauti siano già arrivati? Se gli strumenti di bordo, ivi compreso l'orologio, funzionano correttamente e se guardando fuori dall'oblò si vede che effettivamente si sono raggiunte le lune di Giove, non possiamo che trarne le dovute conseguenze: non si è accorciato soltanto il tempo, ma anche la distanza.

La teoria della relatività di Albert Einstein afferma proprio questo. Secondo Einstein alle alte velocità non si riduce soltanto il tempo, ma anche la distanza da percorrere. Per gli astronauti che viaggiano a quella velocità Giove dista davvero solo 400 milioni di km.

Se osserviamo la tabella 3.1 vediamo che alla velocità della luce un minuto si riduce a zero secondi, quindi il tempo si ferma. Per i fotoni – le particelle di cui è composta la luce – il tempo non esiste: per loro il tempo è fermo. Di conseguenza anche lo spazio da percorrere si riduce a zero. Ed ecco che ci troviamo

L'universo si espande. Gli esperti ritengono che nei primi secondi le sue dimensioni siano aumentate con un fattore scalare di 10^{43} , ossia di nuovo un numero a 44 cifre. Quest'espansione si è realizzata in una frazione minima di secondo (la cosiddetta «inflazione»). Dopodiché è iniziata un'espansione normale, che prosegue ancor oggi.

Chiunque si sia trovato almeno una volta a gonfiare le gomme di una bicicletta sa che a furia di pompare la pompa si surriscalda. La ragione di ciò sta nel fatto che l'aria, quando viene compressa, si scalda. Al contrario, l'aria espansa si raffredda. Secondo la medesima legge fisica, durante l'espansione l'universo si è raffreddato. Un secondo dopo l'esplosione originaria la temperatura era di 10^{10} K, ma dopo 370.000 anni era scesa ad «appena» 3.000 K.

Inizialmente le particelle come i protoni (i nuclei di idrogeno), gli elettroni, i neutroni ecc. sfrecciavano a grande velocità a causa delle alte temperature e quindi a causa della grande quantità di energia nell'universo. Quando la temperatura prese ad abbassarsi, rallentarono la loro corsa e a un bel momento i protoni si unirono agli elettroni che avevano vicini. A questo punto gli elettroni si muovevano intorno ai protoni: ecco che era nato l'atomo di idrogeno. Esso è formato da un protone, che ne costituisce il nucleo, e da un elettrone che vi gira intorno. Man mano si formarono anche gli atomi di elio con due protoni e due neutroni nel nucleo, e due elettroni all'esterno. Ciò accadeva però dopo circa 370.000 anni.

In questa maniera si formò una miscela di gas, composta di idrogeno ed elio. Negli strati dove la densità del gas era maggiore si formò la materia. Dopo diverse centinaia di milioni di anni si formarono le prime galassie e i primi ammassi di galassie. Qui si nacquero

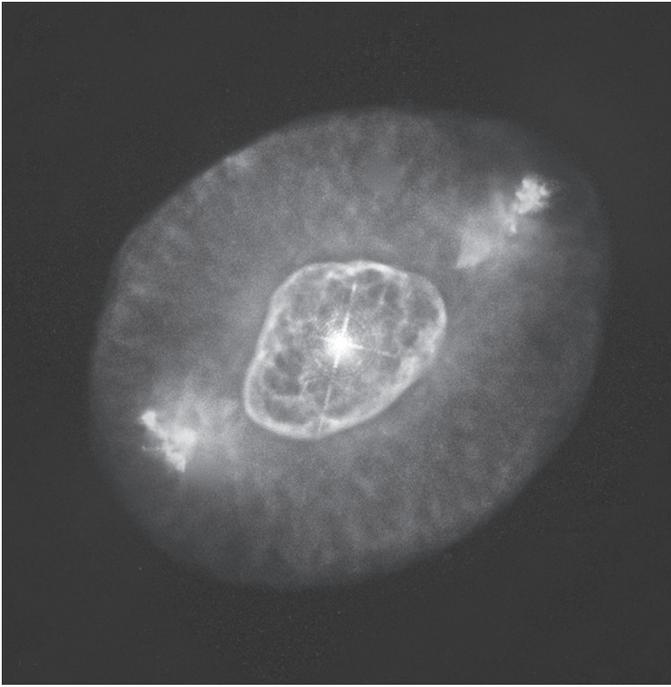


FIG. 3.3. La nebbia planetaria scintillante NGC 6826. La sua stella centrale è una delle stelle più luminose che conosciamo in una nebbia planetaria.

le prime stelle. Una galassia possiede tra le 10^6 e le 10^{12} stelle. Molte stelle hanno un peso fino a 200 volte superiore a quello del Sole. La stella più grande finora scoperta ha un raggio 3.000 volte più grande di quello del Sole.

Tutto ciò accade perché la temperatura dell'universo era diminuita progressivamente. Conosciamo tutti il fenomeno del raffreddamento del vapore acqueo: il vapore si condensa in acqua, ma se la temperatura continua a scendere si formano ghiaccio e cristalli di ghiaccio, ossia forme solide.

Inizialmente le stelle erano formate da molto idrogeno e poco elio. Questi sono gli elementi chimici più leggeri: nel nucleo di idrogeno c'è un solo protone, mentre l'elio ha due protoni e due neutroni. Quando la pressione aumenta, i due atomi di idrogeno si fondono in un atomo di elio. In questo modo si libera energia sotto forma di calore e luce che si diffondono nell'universo. Adesso il nostro Sole si trova in questa fase.

Sappiamo che quando bruciamo del legno alla fine non rimane che un mucchietto di cenere. La medesima cosa accade con le stelle, se non sono troppo pesanti. Infatti, quando nelle stelle leggere si brucia tutto l'idrogeno e si sono innescati processi di fusione in carbonio, non rimane che una piccola stella – detta «nana bianca» – la quale rappresenta le «ceneri» dei processi di combustione.

Quando una stella che ha una massa due volte inferiore a quella del Sole arriva alla fine del proprio corso, dal suo nucleo si genera una nube gassosa composta di idrogeno, elio e una piccola parte di elementi pesanti. Questa nube, larga circa un anno luce e in lenta continua espansione, brilla con diversi colori, dal rosso al blu, e viene detta «nebulosa planetaria», nonostante non abbia nulla a che fare coi pianeti. Nella nostra galassia ne sono state scoperte circa 1.500.

2.2. Dieci miliardi di volte più luminose del Sole

Se una stella pesa almeno nove volte il Sole, però, il processo di combustione si conclude in un'altra maniera: in questo caso non si produce una nana bianca, ma il carbonio si fonde in silicio. Poiché questo processo di combustione produce una quantità di energia enorme, la stella diventa sempre più calda. Si generano



FIG. 3.4. Nubi di frammenti di un'esplosione stellare.

neon e ossigeno. Quest'ultimo processo si compie nel giro di un anno, dopodiché in un giorno soltanto si producono nichel, cobalto e ferro. Ciò significa che i processi di combustione si accelerano; alla fine la quantità di energia che si è liberata è immensa. La luminosità della stella è ora molte migliaia di volte superiore a quella del Sole.

Non appena si arriva alla produzione del ferro, la serie delle fusioni si interrompe. Grazie a questi processi si è generata una pressione interna alla stella che contrasta la gravitazione e ne impedisce il collasso. Ma a un certo punto la pressione viene meno e la stella implode: in un paio di decimi di secondo le particelle vengono risucchiate nel nucleo. Si generano così nuovi elementi: oro, piombo e uranio.

Come palle da tennis che rimbalzano su un muro, gli atomi che erano stati risucchiati nel nucleo vengono

immediatamente scaraventati verso l'esterno; ne deriva un'onda d'urto che trasporta quel materiale nello spazio con una velocità tra i 1.000 e i 20.000 km/s. La stella esplose e lascia il posto a una supernova. Dagli elementi scagliati nello spazio possono successivamente generarsi dei pianeti come la Terra. Molto del materiale di cui siamo fatti si è formato proprio a partire da una supernova.

Ma esiste anche un altro tipo di supernova: gli astronomi la chiamano «supernova di tipo I», in contrapposizione a quella appena descritta che prende il nome di «supernova di tipo II». La prima è molto più attiva della seconda dal punto di vista energetico: si tratta infatti di un sistema costituito da due stelle, di cui una è una nana bianca. Una parte della materia dell'altra stella viene trasferita alla nana bianca, determinandone un aumento di dimensioni, temperatura (oltre un miliardo di grado) e densità (fino a 100.000 tonnellate per m³). A queste temperature si genera una fusione nucleare che produce tutti gli elementi pesanti, fino al ferro. A un certo punto la nana bianca si frantuma e nello spazio cosmico vengono scagliati a una velocità di alcune migliaia di km/s manganese, neon, ferro, zolfo ecc. Ora la stella brilla dieci miliardi di volte più del Sole: la sua forza luminosa può raggiungere quella di un'intera galassia.

Il 23 febbraio 1987 è stata osservata una supernova in una galassia prossima alla nostra, la Grande Nube di Magellano. L'esplosione era avvenuta a una distanza di 165.000 anni luce.

2.3. Buchi neri

All'inizio del XX secolo, lo scrittore Gustav Meyrink aveva descritto con rara maestria le componenti

irrazionali e le profondità nascoste dell'animo umano. Il racconto *La sfera nera* narra appunto di una sfera nera che, oscillando nello spazio, risucchia tutto quel che la circonda: fogli, tazze, vasi, un paio di guanti da donna e persino la stessa aria della stanza. Tutto sparisce all'interno della sfera misteriosa.

A quel tempo Meyrink non poteva neppure immaginare che nell'universo esistono davvero oggetti misteriosi di questo tipo; sono i «buchi neri».

Ma che cos'è un buco nero? Sulla Terra, quando lancio un oggetto verso l'alto, ad esempio una palla, esso raggiunge una certa altezza, poi ricade. Se lo lancio con una velocità maggiore, esso sale più in alto. Supponiamo che io lo lanci con una velocità talmente alta da fargli superare il campo della gravità, ossia la forza di attrazione esercitata dalla Terra; in quel caso il mio oggetto non ricade indietro, ma si perde nell'universo. Questa velocità viene detta «velocità di fuga»; quella della Terra è di 11,2 km/s, mentre nel caso della Luna, molto più leggera della Terra, è appena di 2,3 km/s, e su Marte di 5 km/s.

Già 200 anni fa l'erudito inglese John Michell rifletteva su quanto sarebbe dovuta essere alta la velocità di fuga sul Sole. Nelle sue riflessioni si interrogava anche sulla velocità di fuga in condizioni diverse, ad esempio qualora aumentassero (anche solo ipoteticamente) le dimensioni del Sole. La velocità crescerebbe al crescere del raggio, e a un certo punto arriverebbe a coincidere con la velocità della luce. Continuando ad aumentare le dimensioni del Sole, la luce non riuscirebbe più a staccarsene ed esso ci apparirebbe buio. Nel 1784 Michell presentava queste sue riflessioni nelle *Philosophical Transactions* della Royal Society.

Simili considerazioni vennero fatte da Subrahmanyan Chandrasekhar, uno studente indiano che negli anni

Trenta del Novecento lasciò l'India per l'Inghilterra per studiare con il celebre astronomo e fisico Arthur Eddington. Diversamente da quanto aveva fatto Michell, i suoi esperimenti mentali non ipotizzavano l'accrescimento, ma il rimpicciolimento del Sole. Comprimeando il Sole, la materia diviene sempre più densa, finché alla fine la densità assume valori enormi. Anche questo conduce a un aumento della velocità di fuga: a un certo punto il Sole non è più in grado di liberare luce.

Stelle di questo tipo, con una densità talmente alta da non riuscire più a lasciar andare la luce, esistono eccome nell'universo e sono dette «buchi neri». Uno di essi si trova nel mezzo della nostra galassia e ha 4 milioni di masse solari. Nella Nebulosa di Andromeda, lontana 2 milioni di anni luce, è stato scoperto un buco nero con una massa 50 milioni di volte superiore a quella del nostro Sole. A tutt'oggi, il colosso più imponente di questa categoria è quello scoperto nel 2012 nella galassia NGC 1277, distante 220 milioni di anni luce dalla Terra, nella costellazione di Perseo, il quale possiede una massa incredibilmente grande: 17 miliardi di volte superiore a quella del Sole. Per farci un'idea dell'ordine di grandezza, si pensi che se il Sole avesse la massa di questo gigante, avrebbe un diametro 5.000 maggiore di quello che ha e coprirebbe l'intero nostro sistema planetario.

L'astrofisico tedesco Karl Schwarzschild, professore a Gottinga e successivamente direttore dell'Osservatorio di astrofisica di Potsdam, nel 1916, poco prima di morire a causa di una malattia che aveva contratto in guerra, scoprì l'equazione che consente di calcolare la misura in cui deve essere compresso il raggio di una stella per trasformarla in un buco nero. Questo raggio viene detto «raggio di Schwarzschild»; quello della Terra misura 8,9 mm, quello del Sole circa 3 km.

Man mano che un astronauta si avvicina a un buco nero, il suo orologio di bordo procede più lentamente. Cionondimeno per lui il tempo continua a scorrere in maniera assolutamente normale. Ma se noi sulla Terra potessimo osservare l'astronauta e la sua navicella, noteremmo che si muovono al rallentatore. Non appena raggiunto il margine del buco nero, il tempo si ferma. Tuttavia l'astronauta non potrebbe mai spingersi fino a quel punto, perché l'enorme forza di gravità lo disintegreerebbe prima.

2.4. L'evoluzione dell'universo in time-lapse

Comprimiamo tutta l'evoluzione dell'universo – dal Big Bang a oggi – in un solo anno. Ogni mese corrisponde pressappoco a un miliardo di anni. Il 1° gennaio, alle ore 00:00, in seguito all'esplosione iniziale si generano lo spazio, il tempo e la materia. Lo spazio è interamente riempito da una radiazione originaria con una densità e una temperatura estremamente elevate. Già nel primo secondo da questo materiale originario si generano le particelle elementari della materia e, poco dopo, i primi atomi leggeri come l'idrogeno e l'elio. Entro la metà di gennaio si formano le prime stelle a massa elevata (le stelle massicce) e i primi buchi neri. A partire dalla fine del mese prendono forma le galassie che oggi sappiamo essere le più antiche. Nei mesi successivi si originano nelle stelle processi di fusione dell'idrogeno in elio – come accade nel Sole – e, più tardi, dell'elio in carbonio e in elementi nobili. Gli atomi, nella forma in cui sono presenti nei pianeti, vengono generati attraverso una violenta esplosione (supernova) e vengono lanciati nello spazio.

Soltanto a metà agosto si forma il nostro sistema solare e nel corso di un solo giorno il sole giunge nella posizione in cui si trova ancor oggi. Con una temperatura di 6.000 gradi irradia energia nello spazio e in direzione della Terra.

All'inizio di settembre sul nostro pianeta compaiono i primi minerali; verso la metà del mese le prime formazioni rocciose compatte. Di lì a pochi giorni si generano i primi organismi monocellulari e la vita ha inizio. Le alghe azzurre (cianobatteri) che compaiono intorno alla fine del mese incominciano ad arricchire l'atmosfera di ossigeno. Alla metà di novembre nelle acque terrestri si generano man mano alghe, piante e, successivamente, animali acquatici. Soltanto intorno alla metà di dicembre le piante colonizzano la Terra, ma già il 20 del mese i continenti sono ricoperti di foreste. Dai pesci si formano i primi anfibi, da cui si sviluppano i rettili e i sauri. I primi mammiferi fanno la loro comparsa sulla scena terrestre il 25 dicembre, il giorno di Natale. La sera del 29 incominciano a sollevarsi le Alpi. Durante la notte del 31 dicembre compaiono i primi ominidi e a un quarto d'ora dalla mezzanotte il primo uomo si aggira per le lande africane. Quando mancano 4,6 secondi alla mezzanotte nasce Gesù Cristo, e un secondo dopo Carlo Magno viene incoronato imperatore.

3. Il futuro dell'universo

3.1. Se il Sole esplodesse

Il nostro Sole non farà la fine di una supernova: è troppo piccolo e pertanto il suo campo gravitazionale è eccessivamente limitato perché in esso possano veri-

ficarsi tutte le fasi di combustione delle supernove. Il Sole si trasformerà in una nana bianca.

Sul Sole oggi come oggi il processo di combustione dell'idrogeno produce elio, in quanto due atomi di idrogeno si fondono in un atomo di elio. Questo processo libera un'enorme quantità di energia che viene emanata nell'universo sotto forma di calore e di luce. Il Sole produce in un secondo l'energia che due miliardi di centrali atomiche producono in un anno.

Il Sole è formato da gas; in linea di principio la gravità dovrebbe comportare il collasso e la distruzione di una stella gassosa. Ma nel caso del Sole ciò non accade perché l'idrogeno contenuto al suo interno esercita una pressione contraria alla gravitazione. Se però la scorta di idrogeno si esaurisse – e a un certo punto si arriverà anche a questo – cesserebbe anche quella sua pressione contraria e tutta la materia verrebbe risucchiata all'interno del Sole, aumentandone drammaticamente la pressione interna. È un po' come se ci fossero palle di gomma che rimbalzano all'interno di una cesta che però diventa sempre più piccola. La pressione sulle pareti della cesta cresce progressivamente, e con essa aumenta la temperatura.

A un certo punto la temperatura interna diventerebbe talmente alta da produrre una nuova combustione: l'elio che si era prodotto si fonde in carbonio. L'energia che ne deriva aumenterebbe l'estensione del Sole, che ci apparirebbe rossiccio. Il Sole produrrebbe ora molta più energia di prima e si presenterebbe come un gigante rosso i cui confini si estendono fino alla Terra. E che cosa accade a quel punto sul nostro pianeta? Dapprima si produce un continuo aumento della temperatura; tra i 60 e i 70 °C i ghiacci della Groenlandia e dell'Antartide si sciolgono e le quantità di acqua prodotte vanno ad aumentare i livelli dei mari

fino a 60 metri. Città costiere come Amsterdam, New York o San Francisco – da tempo spopolate e prive di forme di vita – spariscono sotto le acque. Ma è solo l'inizio. A 150 °C i mari evaporano e la Terra diventa un colosso desertico. A 1.500 °C brucia tutto quel che resta ancora da bruciare. Il Sole copre già una grossa parte dell'orizzonte, la luce è più rossa che gialla. I pianeti Venere e Mercurio sono già stati risucchiati dal Sole. Alla fine il sole copre l'intero orizzonte visibile. La Terra frena la sua corsa e infine si schianta sul Sole. Il processo si compie in miliardi di anni – ma per fortuna tutto ciò accadrà soltanto tra alcuni miliardi di anni.

A un certo momento, una volta che tutto l'elio si è fuso in carbonio, il Sole raggiunge il suo stadio terminale. Il guscio esterno si spacca e il Sole diventa una nana bianca.

Questo è il destino di tutte le stelle dell'ordine di grandezza del Sole. Molte hanno già raggiunto il loro stadio terminale e continuano a vegetare come nane bianche da qualche parte nel firmamento.

3.2. La fine della Via Lattea

Neppure la nostra galassia, la Via Lattea, è eterna. Come si è già ricordato, la galassia che ci è più vicina, Andromeda, ci sfreccia accanto a una velocità di 400.000 km/h. Oggi le due galassie distano 2,5 milioni di anni luce, e tra circa 4 miliardi di anni entreranno in collisione. Questo scontro è noto da tempo agli astronomi. Quel che però finora non si sapeva con precisione era se le galassie si sarebbero soltanto sfiorate o se ci sarebbe stato una vera e propria collisione. Anni di misurazioni compiute dal telescopio spaziale Hubble



FIG. 3.5. Questa simulazione al computer mostra la collisione imminente tra la Via Lattea (a sinistra) e la Galassia di Andromeda (a destra).

hanno rilevato che i due sistemi solari si muovono su un binario in rotta di collisione diretta. Dopo lo scontro ci vorranno due miliardi di anni prima che dai loro frammenti si formi una nuova grande galassia.

Ora come ora la Nebulosa di Andromeda ci appare ancora come una macchiolina; nel corso dei prossimi millenni si ingrandirà progressivamente fino a coprire l'orizzonte come un grosso nastro. Quel che accadrà poi è quel che gli scienziati cercano di capire con le simulazioni al computer. Non vi sarà nessuna collisione diretta tra le stelle, poiché esse si trovano a distanze eccessivamente grandi. Cionondimeno le nubi gassose si scontreranno tra loro e la materia che produrranno per condensazione darà vita ad altre stelle. Si formerà un nuovo centro della nuova galassia e il Sole continuerà a esistere come un gigante rosso collocato molto

all'esterno da questo centro, trasformandosi successivamente in una nana bianca. Ne sorgerà una nuova supergalassia.

3.3. La dissoluzione dell'universo

Fino agli inizi degli anni Novanta si pensava che a un certo punto l'universo sarebbe nuovamente collassato e che si sarebbe distrutto. La sua fine sarebbe stata verosimilmente un buco nero ultradimensionale.

Dal 1998 si sa qualcosa di più: due gruppi di ricercatori negli USA e in Australia hanno eseguito delle misurazioni su stelle luminose molto lontane. Si trattava di supernovae. Come abbiamo visto, questo tipo di stelle è estremamente luminoso. Sulla base di determinate regolarità fisiche è possibile calcolarne la luminosità assoluta. Ovviamente una fonte di luce molto lontana è più debole di una fonte vicina. Sicché, confrontando la luce che arriva sulla Terra con la luminosità assoluta, si può dedurre la distanza della supernova. I due gruppi di ricercatori stabilirono pertanto – e in maniera assolutamente indipendente – che le supernovae molto distanti si allontanano dalla Terra molto più velocemente di quanto si pensava sulla base della teoria standard. Per questa scoperta ottennero, nel 2011, il premio Nobel per la fisica.

La conseguenza di ciò è che l'universo si espande in maniera sempre più veloce. A oggi non si riescono ancora a spiegare le ragioni di questo fenomeno. Lo si riconduce a un'energia sconosciuta, solitamente indicata come «energia oscura», che rappresenta la maggior parte dell'energia cosmica. Quando l'accelerazione dell'espansione si arresterà, in un lontano futuro l'universo si perderà e si dissolverà nell'infinità dello spazio.

4. *Le coincidenze esorbitanti nell'universo*

4.1. *Il cosmo è sovradimensionato?*

Se il cosmo fosse stato prodotto esclusivamente allo scopo di consentire il sorgere della vita sul nostro pianeta, esso sembrerebbe sovradimensionato in maniera quasi grottesca. La sua gigantesca estensione contiene svariati miliardi di stelle.

Ma in questa forma questo argomento non è sostenibile. La struttura dinamica fondamentale del cosmo consiste nel continuo incremento dell'espansione nello spazio e del raffreddamento della materia a partire dall'esplosione originaria (il Big Bang). All'inizio si sono formati gli elementi più semplici, ossia idrogeno e elio. Perché si potessero successivamente formare gli elementi pesanti come il carbonio, l'ossigeno, il fosforo ecc. occorre innanzitutto che l'idrogeno e l'elio formassero le stelle. Alcune di esse esplosero come supernovae, immettendo nuovi elementi nella galassia.

Tutto questo processo è durato svariati miliardi di anni. In quel tempo il cosmo si espandeva in maniera da impedire alla forza d'attrazione della materia (la gravitazione) di disintegrarlo di nuovo. L'enorme lasso di tempo ha fatto sì che il cosmo assumesse dimensioni gigantesche.

Una volta che nelle galassie incominciarono a essere presenti elementi pesanti, ci vollero di nuovo altri miliardi di anni prima che questa materia potesse raccogliersi e formare i pianeti. Solo a quel punto poteva sorgere il fenomeno della vita. Anche questo richiese una quantità di tempo notevole. L'universo continuò così a espandersi fino a raggiungere le dimensioni attuali.

Riassumendo si può dire così: affinché possa sorgere la vita a partire dal carbonio occorrono, sulla

base delle leggi fisiche vigenti, molti miliardi di anni. In questo lasso di tempo il cosmo deve espandersi per non collassare anzitempo – il che impedirebbe a priori qualsiasi possibile evoluzione. Un'espansione della durata di molti miliardi di anni produce però necessariamente un universo che appare del tutto sovradimensionato per noi abitanti del minuscolo pianeta Terra.

Il fatto che noi esistiamo presuppone quindi che il cosmo abbia le dimensioni enormi che ha, con i suoi miliardi di galassie e i suoi spazi immensi. Altrimenti non sarebbe mai potuta nascere la vita. Il cosmo pertanto non è affatto sovradimensionato, ma ha precisamente le dimensioni giuste affinché sul nostro pianeta potesse sorgere la vita. Anche nel caso in cui la Terra fosse l'unico pianeta abitato e abitabile, un creatore che avesse voluto introdurre la vita nel rispetto delle leggi fisiche vigenti avrebbe dovuto creare esattamente questo universo gigantesco.

Detto altrimenti: un universo che, dalla nostra prospettiva, avesse dimensioni più ridotte dovrebbe avere tutt'altre leggi fisiche per poter consentire la nascita della vita a partire dal carbonio.

Nel trattato *The Constant of Nature* Brandon Carter, un fisico teorico australiano, ha indagato quale dovrebbe essere la misura di tempo minima sufficiente a consentire l'evoluzione dell'*homo sapiens*. Il risultato a cui è pervenuto coincide con l'età del cosmo.

4.2. *L'universo: fatalità o creazione?*

Le persone inclini alle spiegazioni razionali tendono a ritenere che le origini ultime dell'essere possano venir spiegate sulla base di considerazioni scientifiche ed empiriche, ancorché non vi siano certezze

assolute e neppure ce ne possano essere. Al contrario le persone con un temperamento più emotivo sono inclini a una spiegazione del mondo di tipo mitologico o religioso.

Tuttavia, fino a ora nessuno dei due orientamenti è riuscito ad affermarsi in maniera assoluta, al di là di ogni possibile dubbio. Il punto di vista razionale si fonda sul concetto di «caso»: la vita è interamente nata da cause fortuite favorevoli. Tuttavia le ricerche degli ultimi decenni mostrano che il ruolo del caso è diventato una questione problematica all'interno dell'evoluzione dell'universo e pure della nascita della vita. Molti fenomeni e molte leggi di natura sembrano predisposti in maniera tale da rendere necessario il sorgere della vita (l'universo antropico). Ed è proprio di queste «cause fortuite» che ci occuperemo ora.

Una spiegazione che poggia esclusivamente sul concetto di caso è discutibile. Deve esserci un principio superiore che noi non conosciamo (o che non conosciamo ancora?). Questo principio non rappresenta affatto la dimostrazione dell'esistenza di un creatore, ma può fungere da segnaposto per un'idea di quel tipo. Lo stesso riferimento ai multiversi, a cui ci si richiama sempre più di frequente, non rappresenta una soluzione definitiva, come si potrà vedere.

Incominciamo con le contingenze nell'evoluzione dell'universo. Il cosmo si espande. Durante questa espansione ogni particella di materia è provvista di un'energia cinetica che la spinge verso l'esterno. Come nelle esplosioni, tutte le particelle tendono a muoversi verso l'esterno. La gravitazione agisce in direzione contraria, come una forza di rallentamento che vorrebbe tenere insieme la materia. Sulle particelle materiali agiscono pertanto due forze contrapposte. Se ci fosse stata soltanto la gravità, la materia sarebbe implosa su

Un'altra «causa fortuita» è rappresentata dalla durata della vita dei neutroni. Come si è detto, i nuclei atomici sono formati da protoni con una carica elettrica positiva, grazie a cui gli elettroni si mantengono nella loro orbita, e da neutroni che garantiscono la stabilità del nucleo atomico. Sicché i neutroni hanno un'importanza fondamentale per l'esistenza dell'atomo. Senza neutroni non ci sarebbero atomi.

Dopo il Big Bang la temperatura del cosmo era talmente alta da non consentire la formazione di atomi. Le componenti atomiche – come i protoni e i neutroni – viaggiavano come particelle libere nello spazio. Ma già dopo undici minuti i neutroni liberi incominciarono a disintegrarsi; undici minuti dopo l'esplosione originaria, in effetti, si sarebbero dovuti disintegrare tutti i neutroni e non si sarebbero mai potuti formare atomi stabili. L'unica possibilità di salvare i neutroni stava in un crollo significativo della temperatura, in maniera che in quei primi undici minuti si potessero formare atomi con neutroni nel nucleo. Una volta che sono «legati» nell'atomo, i neutroni non si disintegrano più: sono salvi! Si tratta pertanto nuovamente di un'altra felice contingenza: il cosmo si è raffreddato e puntualmente si sono formati atomi con neutroni nel nucleo.

Ma riflettiamo ancora un momento sul nesso tra la forza di gravità e la forza elettrica. La prima è 10^{-36} volte quella elettrica, e in confronto a essa è straordinariamente debole. Immaginiamoci di poter regolare la forza di gravità girando una manovella. La aumentiamo tanto da portarla al 10^{-26} . Questi calcoli mostrano che le stelle sarebbero significativamente più piccole di quanto sono. All'incirca 10 milioni di stelle avrebbero tutte insieme la massa della Luna. I processi si svolgerebbero tutti più velocemente. Già dopo un anno le stelle si sarebbero fuse e il tempo non sarebbe suffi-

ciente a consentire che si sviluppasse la vita. Il cosmo sarebbe nato morto e non ci sarebbe nessuno a chiedersi come si è formato.

Supponiamo di essere degli ingegneri che, appena dopo il Big Bang, sono in possesso di uno strumento che consente di regolare le costanti fondamentali del cosmo. Modifichiamo una delle grandezze e ci rendiamo conto che in quelle condizioni non può sorgere la vita. Se vogliamo «salvare» il cosmo che abbiamo precedentemente modificato con l'aiuto del nostro strumento, regolando cioè in altra maniera le grandezze dell'universo, ci troveremmo sempre e comunque in una landa desolata. Alla fine getteremmo la spugna. Sembra proprio che tutte le costanti in natura siano state regolate con estrema precisione. Evidentemente nell'universo vige un'armonia perfetta che consente che si formino strutture sempre più complesse, fino alla vita. Esattamente come in una melodia: se si cambia una nota, si distrugge l'armonia.

5. Problemi insoluti

5.1. La materia oscura

Immaginiamoci un'enorme disco piatto che gira come una giostra. Se ci troviamo al centro del disco non ci succede niente; se invece stiamo sui bordi, la forza centrifuga ci spinge verso l'esterno e, nel caso peggiore, ci scaraventa via.

Una cosa simile accade anche nella Via Lattea. La nostra galassia ruota come un disco piatto e le stelle poste sui margini estremi subiscono una spinta centrifuga talmente grande che di fatto dovrebbero venir scaraventate fuori dalla galassia.

Per questa ragione un tempo si pensava che le stelle poste ai margini della galassia si muovessero più lentamente di quelle nel centro, giacché per queste ultime la forza centrifuga è decisamente inferiore e riescono facilmente a mantenersi al loro posto. Sorprendentemente nel 1970 si è scoperto che le cose non stanno così. La velocità di rotazione (o, meglio: la velocità angolare) ai margini della Via Lattea non è minore che al centro. E sebbene le stelle situate alla periferia della galassia dovrebbero a rigore venir espulse, ciò – sorprendentemente – non accade. Occorre che ci sia una forza che le trattiene e che le mantiene nella loro posizione.

Si è calcolato che la gravità normale, che agisce sempre verso l'interno, non è sufficiente a questo scopo. Occorre che ci sia pertanto dell'altra materia, invisibile, che esercita una forza d'attrazione aggiuntiva. Da qui l'espressione «materia oscura».

Calcoli più precisi hanno rivelato che per spiegare i movimenti delle stelle e delle galassie non si deve ammettere soltanto l'esistenza di questa materia «oscura», ma anche di un'energia «oscura». Infatti l'energia che riusciamo a vedere nelle stelle, nei pianeti e nelle radiazioni non è che una piccola parte dell'energia complessiva dell'universo.

I cosmologi non sono in grado di spiegare la materia oscura. Mentre la materia normale è formata di atomi, può emettere e assorbire radiazioni e sappiamo come si forma, nel caso della materia oscura non sappiamo proprio nulla. Questa materia non emette radiazioni, quindi è invisibile; per questo viene detta «oscura». Possiamo dedurre l'esistenza soltanto a partire dai suoi effetti gravitazionali sulla materia visibile. Non sappiamo pertanto se sia anch'essa formata da particelle elementari. Ipoteticamente si assume che sia

formata da particelle dette WIMPs (*Weakly Interactive Massive Particles*). La materia oscura non è distribuita uniformemente nel cosmo, ma si agglomera come una struttura reticolare con enormi spazi vuoti tra gli ammassi delle galassie visibili.

I cosmologi cercano di rappresentarla mediante esperimenti, tuttavia finora senza nessun successo. Cionondimeno non è possibile spiegare l'evoluzione dell'universo senza ipotizzarne l'esistenza. Senza la materia oscura noi – che riflettiamo su questi problemi – non esisteremmo affatto.

5.2. L'energia oscura

Nel 1988 Saul Perlmutter e il suo team del Lawrence Berkeley National Laboratory californiano incominciarono a misurare l'espansione dell'universo. Nello stesso periodo Brian P. Schmidt dell'Australian National University di Canberra lavorava sul medesimo problema. Entrambi i gruppi misurarono la luminosità di supernovae molto lontane. Dalla luminosità era possibile stabilirne la distanza. Entrambi i gruppi stabilirono con grande stupore che i valori della luminosità a cui erano giunti erano inferiori del 25% rispetto a quelli attesi. Ciò poteva significare soltanto che le supernovae erano molto più distanti di quanto non avesse previsto la teoria standard. Perlmutter e Schmidt pubblicarono i risultati delle loro ricerche nel 1998 e nel 2011 vennero insigniti del premio Nobel per la fisica.

Se le parti lontanissime dell'universo sono di fatto più distanti di quanto non ci si aspettasse, vuol dire che l'universo si espande più velocemente di quanto si pensava. Un'indagine più precisa dei dati ha rive-

lato che la velocità d'espansione cresce continuamente e che pertanto si è di fronte a un'espansione accelerata.

La ragione di ciò è ignota. Evidentemente deve esserci un'energia responsabile di questo fenomeno. Frattanto si è preso a parlare di «energia oscura». Le misurazioni hanno rivelato un alto fatto sorprendente: l'equilibrio energetico dell'universo è dato per il 73% dall'energia oscura. Se consideriamo che la materia oscura fornisce all'incirca il 23% dell'apporto energetico, alla materia visibile, quella che riusciamo a vedere, a conoscere e di cui siamo fatti, non resta che il 4%. Tutto il resto è ignoto.

Si è cercato di spiegare l'energia oscura sulla base dell'energia del vuoto di cui abbiamo trattato nel cap. II.9. Tuttavia i calcoli attestano che in quel caso l'energia per m^3 arriverebbe a valori drammaticamente alti, il cui equivalente in massa andrebbe ben al di là di quello dell'energia oscura, facendo naufragare questo tentativo di spiegazione.

È interessante osservare che Albert Einstein senza saperlo aveva presupposto l'energia oscura, che poi però aveva smentito. Le equazioni della sua teoria della relatività generale presentavano un universo in espansione. Allora però l'espansione era ancora sconosciuta, e si pensava che l'universo fosse statico. Per questa ragione Einstein introduceva nelle sue equazioni una costante aggiuntiva, poi divenuta celebre come «costante cosmologica», che impediva una falsa formulazione delle equazioni. Aveva scelto la costante in maniera tanto sofisticata da escludere del tutto un'eventuale espansione dell'universo. Quando successivamente venne scoperto che l'espansione esisteva davvero, Einstein rettificò la propria correzione e la qualificò come «la più grande sciocchezza della mia vita». Oggi la co-

stante cosmologica si presenta come un mezzo elegante per descrivere l'energia oscura.

Due terzi della superficie terrestre sono coperti di acqua. Sarebbe inimmaginabile concepire questa proporzione se non sapessimo che cosa è l'acqua. In cosmologia le cose non stanno purtroppo così: due terzi dell'energia dello spazio cosmico è oscura e davvero non abbiamo idea di che cosa sia. Ma consideriamo ancora il caso della materia oscura: la materia visibile e misurabile rappresenta meno del 5% dell'energia totale. La costituzione di tutto il resto ci appare misterioso e inspiegabile.

6. *Multiversi*

Se cerchiamo il termine «multiverso» su google, i risultati sono davvero tantissimi. Ma che cos'è un multiverso? Si tratta dell'idea che vi siano molti universi – forse addirittura infiniti – e che il nostro non sia che quello su cui si è casualmente sviluppata la vita. Il nostro potrebbe essere uno tra i molti universi che si dispiegano incessantemente in uno spazio infinito, come gocce di vapore in una pentola di acqua bollente.

Che cosa ha portato a pensare che il nostro universo non fosse l'unico? Già nel 1957 il fisico Hugh Everett aveva cercato di spiegare alcuni paradossi della fisica quantistica per mezzo di universi paralleli. Quest'idea era puramente ipotetica. Successivamente si prese a speculare sulla faccenda, chiedendosi, ad esempio, se prima dell'esplosione originaria ci fosse un universo precedente che non si è espanso, ma che al contrario si è compresso e da cui, con il Big Bang, si è poi formato il nostro universo (la cosiddetta *Big Bounce Theory*, la *Teoria del grande rimbalzo*). Infine

sapendo che le costanti in natura sono talmente armonizzate tra loro che era necessario che si sviluppasse la vita, si giunse all'idea del multiverso. Il punto di partenza è la supposizione che esistono molti universi con svariate costanti naturali che però, nel loro complesso, non rendono possibile che si sviluppi la vita. Per la maggior parte sono pertanto universi «nati morti». Del tutto casualmente noi viviamo in un universo le cui costanti naturali erano adatte alla nascita della vita.

L'esistenza di multiversi non contraddice né la teoria della relatività, né altre teorie scientifiche. Ma da ciò non si può dedurre che questi costrutti mentali esistano realmente.

Albert Einstein si era espresso in questo modo sulle speculazioni del tempo: «chi scopre qualcosa guarda ai risultati della propria fantasia come a qualcosa di necessario, offerto direttamente dalla natura; pertanto non li concepisce, né vuole che vengano concepiti come semplici oggetti di pensiero, ma come realtà effettive». È legittimo chiedersi se i multiversi non rientrino proprio nella categoria di pensieri descritti da Einstein.

Poiché finora nessuno è riuscito a dimostrarne l'esistenza, l'ipotesi di altri universi rimane una questione di fede. Non pochi fisici si mostrano scettici a riguardo. Martin Bojowald della Pennsylvania State University, che si era occupato della Big Bounce Theory, riteneva che «Il multiverso fosse [un concetto] eccessivamente speculativo». Hermann Nicolai, direttore del Max-Planck-Institut per la fisica gravitazionale di Potsdam dichiarava: «può anche darsi che la teoria rimanga eternamente una teoria e che non la si possa verificare».

L'astrofisico Brian Schmidt è uno degli scopritori dell'espansione accelerata dell'universo e, di conse-

guenza, dell'energia oscura. Quando gli venne conferito il premio Nobel per la fisica, un intervistatore gli domandò quale fosse la sua opinione sui temi dei multiversi; lo scienziato si definì a questo proposito «un antagonista» e disse, letteralmente: «In campo scientifico mi rifiuto di formulare ipotesi su cose che non posso verificare [...]. Chi lavora alle teorie dei multiversi sapendo che queste teorie non si potranno mai verificare, non è un vero scienziato».

Appendice

Appendice

In questa appendice affrontiamo la generazione degli insiemi di Mandelbrot (figg. 1.5 e 1.6) per mezzo del computer. Qualsiasi programmatore amatoriale in possesso di conoscenze di base sui numeri complessi è in grado di generare questo tipo di immagini. La prima parte dell'appendice tratta dell'addizione, della sottrazione, della moltiplicazione, della divisione, nonché del piano complesso di Gauß. Se sapete già tutto, potete tranquillamente passare oltre. Nella seconda parte descriveremo invece il procedimento matematico mediante cui si costruiscono le immagini frattali.

A. I numeri complessi

Se moltiplichiamo tra loro due numeri uguali otteniamo sempre un numero positivo (oppure 0). Ciò significa che $a \cdot a = a^2 = b$ non può mai essere un numero negativo. La conseguenza è che non si può estrarre la radice di un numero negativo. L'espressione $\sqrt{-1}$ non ha quindi nessun senso. Così perlomeno si pensava nel XVII secolo, quando si diceva che le radici dei numeri negativi erano immaginarie. Fu Cartesio, nel 1637, il primo a menzionare questi numeri. È interessante che proprio questi numeri «immaginari» possano produrre immagini così belle e meravigliose come quelle presentate nella figura 1.6 e come quelle prodotte dall'insieme di Mandelbrot.

Nel XVIII secolo si sapeva che i numeri immaginari potevano produrre soluzioni attendibili di operazioni matematiche. Nel 1830 Gauß spiegava la maniera corretta per servirsi sensatamente di questi numeri nei calcoli.

Nella matematica moderna un numero complesso è un'espressione della forma

$$z = a + b \cdot \sqrt{-1}$$

dove a e b sono numeri reali. Per indicare $\sqrt{-1}$ si usa il simbolo i , così possiamo scrivere: $z = a + b \cdot i$.

Esempi di numeri complessi sono:

$$w = 2 + 4i; r = -3.4 + 6i; z = 1 - 5i.$$

Evidentemente

$$i^2 = -1.$$

Nell'espressione

$$z = a + b \cdot i$$

a è la parte reale di z , mentre b ne è la parte immaginaria.

I numeri complessi si possono addizionare, sottrarre, moltiplicare e dividere. Per generare l'insieme di Mandelbrot occorrono soltanto addizione e moltiplicazione; sicché possiamo limitarci a queste due operazioni.

L'addizione funziona secondo questo principio:

se

$$z = a + b \cdot i$$

e

$$w = u + v \cdot i$$

allora

$$z + w = (a + u) + (b + v) \cdot i.$$

Un esempio: $(3 + 2i) + (-1 + 5i) = 2 + 7i$.

La moltiplicazione funziona secondo questo principio:

se

$$z = a + b \cdot i$$

e

$$w = u + v \cdot i$$

allora

$$z \cdot w = a \cdot u + a \cdot v \cdot i + b \cdot i \cdot u + b \cdot v \cdot i^2$$

Se si considera che

$$i^2 = -1,$$

si ottiene:

$$z \cdot w = (a \cdot u - b \cdot v) + (a \cdot v + b \cdot u) \cdot i$$

Un esempio:

$$(3 + 2i) \cdot (1 + 4i) = -5 + 14 \cdot i.$$

B. Costruzione dell'insieme di Mandelbrot

Occorre qui introdurre il piano complesso di Gauß. In questo piano possiamo pensare tutti i numeri complessi come punti. Si tratta di un comune sistema di coordinate con x che indica l'asse delle ascisse e y che indica l'asse delle ordinate. Il numero $z = x + y \cdot i$ lo pensiamo in un punto del piano (x, y) . Ovviamente qualsiasi numero complesso sta su un punto del piano e ogni punto del piano rappresenta un numero complesso.

La distanza di un numero complesso $z = x + y \cdot i$ dall'origine del sistema di coordinate (il punto di intersezione degli assi) si ottiene mediante la formula:

$$|z| = \sqrt{x^2 + y^2} \text{ (Pitagora)}$$

dove con $|z|$ si indica il valore del numero complesso z .

A questo punto possiamo iniziare a costruire l'insieme di Mandelbrot sul piano di Gauß.

Assegniamo un colore a ogni punto (x, y) . Quando ogni punto ha un suo colore, l'immagine (ossia l'insieme di Mandelbrot) è pronta.

L'assegnazione dei colori ai singoli punti (x, y) avviene in questo modo: al punto (x, y) corrisponde il numero complesso $z = x + y \cdot i$. Prendiamo $w_0 = 0$ e calcoliamo $w_1 = w_0^2 + z$, poi $w_2 = w_1^2 + z$, poi $w_3 = w_2^2 + z$. Quindi, in generale:

$$w_{k+1} = w_k^2 + z \text{ dove } k = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Se per molti k assumiamo i valori w_k , otteniamo la serie (teoricamente infinita) $w_1, w_2, w_3, w_4, \dots$

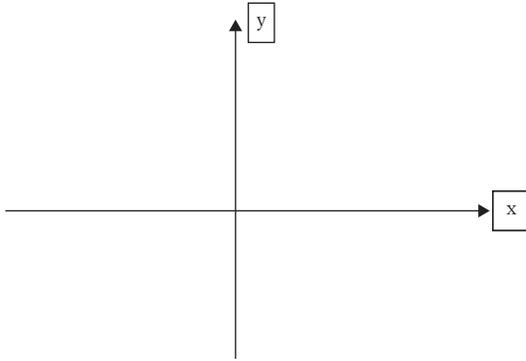


FIG. A.1.

A questo punto vediamo come si comportano i valori della serie:

$$|w_1|, |w_2|, |w_3|, |w_4|, |w_5|, \dots$$

C'è la possibilità che i numeri convergano verso un valore finito (la cosiddetta «convergenza»). Ma può anche accadere che i numeri $|w_i|$ crescano a piacere, al crescere di i . La serie converge quindi all'infinito.

Il comportamento della serie $|w_i|$ determina il colore nel punto (x,y) se $z = x + y \cdot i$, dove z è il numero scelto all'inizio. Se la serie converge, nel luogo (x,y) si indica un punto colorato. Il colore dipende dal valore limite raggiunto dalla serie. Per esempio, si attribuisce il colore verde a un valore limite grande, il rosso a un valore medio. Si può scegliere un colore anche per la non convergenza. Si può differenziare ulteriormente, se ad esempio si considerano i primi cento (o cinquecento) membri numerici e il colore dipende dall'ultimo valore.

Un esempio, quando w_{100} è il centesimo valore:

$$\begin{aligned} |w_{100}| < 50 &\rightarrow \text{colore verde} \\ 50 \leq |w_{100}| < 100 &\rightarrow \text{colore blu} \\ 100 \leq |w_{100}| < 500 &\rightarrow \text{colore rosso} \\ 500 \leq |w_{100}| &\rightarrow \text{colore giallo} \end{aligned}$$

Con il calcolatore si può eseguire un'operazione del genere per ogni punto del piano di Gauß e determinarne il colore. Si genera in questo modo un'immagine dell'insieme di Mandelbrot.

Se sul piano di Gauß si considerano superfici limitate ai margini dell'insieme di Mandelbrot si ottengono immagini particolarmente belle (fig. 1.5).