

LICEO SCIENTIFICO STATALE A. TASSONI

---

# La crisi della scienza

**Lorenzo Baraldi**

TESI DI MATURITÀ SCIENTIFICA

Anno Scolastico 2007/2008

La domanda se sia necessaria la verità, non soltanto deve avere avuto già in precedenza risposta affermativa, ma deve averla avuta in grado tale da mettere quivi in evidenza il principio, la fede, la convinzione che *«niente è più necessario della verità e che in rapporto a essa tutto il resto ha soltanto un valore di secondo piano»*.

---

Friedrich Wilhelm Nietzsche, La Gaia  
scienza §344

Contatti: [baraldi.lorenzo@gmail.com](mailto:baraldi.lorenzo@gmail.com)

## Sommario

Lo sviluppo delle discipline scientifiche dalla seconda metà del XIX secolo ha causato profonde ripercussioni sull'immagine generale della scienza delineatasi a partire dal Seicento e consolidatasi con il positivismo. Sono entrati in crisi i fondamenti della matematica, la fondazione intuitiva della geometria euclidea, l'idea dello spazio, la completezza del modello meccanicistico: un secolare sistema di riferimento e di organizzazione del sapere si è dissolto. Si è affermato così un nuovo modello di scienza che ha rivalutato le funzioni del soggetto nella ricerca e la nozione di relatività delle teorie scientifiche, mettendo in dubbio la possibilità stessa, per la scienza, di conoscere in modo oggettivo la struttura del reale.

Come e perchè è avvenuta questa frattura, e come ha cambiato la scienza? Ci si può fidare della scienza, ed è vero che essa spiega il mondo così come esso è per davvero? E infine, esiste veramente un mondo «reale» che è possibile indagare oggettivamente e indipendentemente dal soggetto?

# Indice

<b>1</b>	<b>Le trasformazioni nella matematica</b>	<b>2</b>
1.1	La nuova geometria . . . . .	2
1.2	La nuova logica matematica . . . . .	3
1.2.1	Il logicismo . . . . .	4
1.2.2	L'intuizionismo e il formalismo . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Spazio e Tempo</b>	<b>6</b>
2.1	Da Aristotele alla relatività Galileiana . . . . .	6
2.2	La relatività ristretta . . . . .	8
2.2.1	La fine dello spazio e del tempo assoluti . . . . .	9
2.2.2	La dilatazione del tempo e la contrazione delle lunghezze . . . . .	10
2.2.3	Effetti sulla permanenza della materia . . . . .	11
2.3	La relatività generale . . . . .	12
2.3.1	La massa è l'energia . . . . .	12
2.3.2	Il nuovo spazio-tempo . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Eresie cosmiche</b>	<b>15</b>
3.1	I primi modelli cosmologici . . . . .	15
3.2	Verso i nuovi modelli cosmologici . . . . .	17
3.2.1	Il ruolo del principio cosmologico e delle equazioni di Friedmann . . . . .	17
3.2.2	Tre modelli diversi . . . . .	18
3.2.3	Le lacune del Big-Bang . . . . .	19
3.3	Oltre la relatività generale . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Dio gioca a dadi</b>	<b>24</b>
4.1	I modelli atomici . . . . .	24
4.1.1	L'atomo di Bohr . . . . .	25
4.2	La meccanica quantistica . . . . .	26
4.2.1	La fine del determinismo . . . . .	26
4.2.2	Onda e corpuscolo . . . . .	28

<b>5</b>	<b>La scienza della palude</b>	<b>29</b>
5.1	La perdita della certezza: Popper . . . . .	29

# Capitolo 1

## Le trasformazioni nella matematica

Tra la fine del XIX secolo e i primi decenni del XX gli sviluppi delle matematiche misero in crisi i principi fondamentali della scienza moderna. Ancora ai tempi di Kant la geometria euclidea appariva come il modello del rigore scientifico: la sua struttura rispecchiava l'architettura stessa della realtà. Ora, cambiamenti rivoluzionari nella matematica portavano alla nascita di *geometrie non euclidee*.

Era necessario riconoscere il fallimento della ragione scientifica, incapace di cogliere le vere strutture del reale? Oppure si doveva ammettere che una particolare forma di scienza, cui era stato attribuito in precedenza un valore assoluto, era invece solo una rappresentazione particolare della realtà, valida entro certi limiti per lo studio di particolari sistemi? Il dibattito che si avviò nella filosofia e nella scienza a partire da queste domande è noto come *crisi dei fondamenti*.

Nel corso del XIX secolo, nell'ambito delle discipline matematiche, si erano registrati grandi progressi e si era avviata una discussione sui fondamenti della matematica. Questi progressi apparivano, infatti, difficilmente inquadrabili entro il modello classico di questa scienza, che era ancora essenzialmente fondata sull'intuizione e su una forma logica ambigua e imprecisa, ricalcata sul linguaggio comune. Filosofi e scienziati, di fronte a tali difficoltà, si chiesero se denunciare il fallimento della matematica in quanto tale, oppure se riconoscere apertamente i limiti del modello classico di scienza, per approfondirne i concetti e i metodi. La seconda strada fu intrapresa da matematici e logici, quali Frege, Hilbert, Brouwer. Questi autori tracciarono una netta delimitazione tra la matematica e le altre scienze a cui il positivismo aveva affidato in precedenza il compito di definire i principi della razionalità scientifica.

### 1.1 La nuova geometria

La *geometria euclidea*, con la sua struttura deduttiva, aveva rappresentato per secoli il modello del rigore scientifico. Essa si basava su un ristretto numero di principi o di postulati, assunti come veri in modo *evidente*: essi erano, in questo senso, fonda-

ti *intuitivi* di questa geometria, e da essi venivano dedotte, dimostrate, tutte le altre proposizioni.

Tra questi principi, il quinto postulato appariva meno evidente degli altri. Esso affermava che, *per un punto esterno a una retta, passa una e una sola parallela alla retta data*. Consapevoli del carattere non intuitivo di questo postulato, già i matematici tardo-antichi avevano cercato di trasformarlo in un teorema, fornendone cioè una dimostrazione. Nel XVIII secolo, il gesuita Gerolamo Saccheri, per esempio, aveva scoperto una dimostrazione per assurdo.

Da un punto di vista cronologico, la crisi del modello scientifico ottocentesco si manifestò, prima di tutto, nella geometria, cioè nella scienza dello spazio, con la scoperta delle geometrie *non-euclidee*. Nel XIX matematici come Gauss, Bolyai e Riemann sostituirono al quinto postulato dei postulati non-euclidei: i primi assunsero che per un punto esterno a una retta passano più parallele alla retta data (*geometria iperbolica*); Riemann affermò invece che non ne passa alcuna (*geometria ellittica*).

Con l'intento di fondare una geometria alternativa a quella classica di Euclide, vennero così create le cosiddette geometrie non-euclidee, in cui venivano dimostrate proposizioni apparentemente strane e controintuitive e a cui venne, tuttavia, ben presto riconosciuta pari dignità scientifica rispetto alla geometria euclidea.

Sulla loro interpretazione si accese un vivace dibattito filosofico: si trattava di diverse ipotesi sulla struttura dello spazio reale? E in questo caso era possibile decidere quale fosse vera e in che modo? Oppure si doveva parlare di convenzioni teoriche che descrivevano in modo diverso la stessa realtà? Quale che fosse la soluzione di questi problemi, *la geometria non poteva più essere considerata una scienza apodittica*: la certezza millenaria dell'unicità e dell'assolutezza dello spazio era stata ormai messa in discussione. Esclusa l'evidenza intuitiva, l'unica garanzia della legittimità scientifica dei vari sistemi geometrici era rappresentata dalla correttezza logica delle dimostrazioni, mediante le quali i teoremi venivano dedotti dai postulati.

## 1.2 La nuova logica matematica

A partire dalla metà dell'Ottocento, gli sviluppi della logica e quelli della matematica si intrecciarono strettamente. La logica, servendosi degli strumenti matematici, si emancipa dalle ambiguità del linguaggio comune e raggiunge un rigore formale mai raggiunto prima. Essa, d'altra parte, fornendo alla matematica problemi nuovi e stimolanti, apre la discussione sui *fondamenti della matematica* stessa, con l'obiettivo di dare una dimensione formalmente rigorosa a una disciplina dalle enormi applicazioni pratiche, ma ancora basata su concetti intuitivi, come il criterio di evidenza.

La storia della moderna logica matematica prende avvio a metà dell'Ottocento, attraverso il contributo di George Boole. Applicando l'analisi matematica allo studio delle operazioni del pensiero, Boole è il primo ad avere piena consapevolezza dell'applicabilità dell'algebra agli oggetti del linguaggio comune. Il *metodo simbolico* viene per la prima volta esteso così alle proposizioni del linguaggio naturale. La logica si avvia quindi verso la sua formalizzazione. Nella seconda metà del XX secolo, il matematico tedesco Georg

Cantor elabora una rivoluzionaria teoria degli insiemi, basata sull'intuizione che i numeri naturali sono definibili in termini di insiemi, di elementi finiti o infiniti. Egli si propone di fondare in modo rigoroso l'intera matematica sulla teoria degli insiemi, una volta stabilite per mezzo di assiomi le relazioni intercorrenti fra gli insiemi stessi.

### 1.2.1 Il logicismo

Frege tenta di pervenire alla definitiva fondazione della matematica sulla logica, alla logicizzazione della matematica, cioè. Convinto che la matematica abbia i caratteri di un sapere certo, egli si propone di fondarla sulle verità apodittiche della logica. In particolare, si propone di definire in termini puramente logici i concetti fondamentali della matematica, primo fra tutti quello di numero naturale, e di dimostrare a partire dai principi logici le verità della matematica, a cominciare dagli assiomi dell'aritmetica. La sua posizione è quella del cosiddetto *logicismo*, che sostiene che *tra logica e matematica non vi sono differenze essenziali*.

Per realizzare il programma logicista è necessario poter condurre dimostrazioni rigorose, esplicite in ogni passo. A questo scopo non ci si può servire del linguaggio ordinario: Frege costruisce così un linguaggio simbolico, corredato da esplicite regole logiche nella sua *Ideografia* (1879), testo in cui riscrive senza ambiguità tutta la logica e la matematica.

Frege si confronta anche con la filosofia kantiana. Per Kant la matematica si fonda non solo sulla logica, ma anche sull'intuizione pura: i suoi giudizi quindi sono sintetici a priori. Frege ritiene, invece, che le verità matematiche sono soltanto analitiche: nella loro dimostrazione «si fa esclusivamente uso di leggi logiche generali e di qualche definizione precisa».

Nel pensiero di Frege le classi sono sostanze, nel senso che esse, non meno degli individui, possono godere di attributi: è possibile formare classi di classi, cioè riunire in una tutte le classi che soddisfano particolari condizioni. Le classi hanno quindi un'esistenza in sé, indipendentemente dal fatto che noi le pensiamo oppure no: questa è la componente platonica del pensiero di Frege. Le classi, come le idee di Platone, sono sostanze, soggetti di attributi, esistenti indipendentemente dal pensiero umano, che non le costruisce, ma le scopre e le descrive.

Il programma logicista, ossia la fondazione della matematica sulla logica, viene messo in crisi dalla scoperta dei paradossi e antinomie direttamente derivabili dai principi su cui Cantor e Frege si erano basati. Questi principi erano apparsi ai due matematici semplici e naturali. Bertrand Russell, presentando una serie di paradossi, apre la crisi dei fondamenti: egli aveva scoperto che dall'assioma di astrazione, per cui ogni proprietà individua l'insieme degli oggetti che ne godono, è derivabile una contraddizione.

Russell espresse l'antinomia anche in un modo intuitivo: «un certo villaggio ha tra i suoi abitanti un solo barbiere. Egli è un uomo ben sbarbato, che rade tutti e solamente gli uomini del villaggio che non si radono da soli. Ora: chi rade il barbiere? È plausibile sostenere che egli si faccia la barba da solo. Se così fosse, però, sarebbe violata la premessa secondo cui il barbiere rade tutti coloro che non si radono da soli. Però, se non si rade da solo, dovrà essere rasato dal barbiere, cioè si raderà da sé stesso: il che è ancora contraddittorio».



L'impatto dell'antinomia di Russell è fortissimo. Russell individua la causa delle antinomie nell'autoriferimento, vale a dire nella possibilità di definire classi che includano se stesse come propri elementi. Da queste premesse, Russell elabora la *teoria dei tipi*, secondo la quale una classe non può appartenere a se stessa ma solo a un'altra classe superiore ad essa per estensione.

### 1.2.2 L'intuizionismo e il formalismo

Al logicismo si oppongono in primo luogo i matematici intuizionisti. In Francia il matematico e fisico Poincaré rifiuta ogni possibile fondazione della matematica su basi logiche: la matematica è, a suo parere, un'attività costruttiva, mentre la logica ha solo la funzione secondaria di permettere la comunicazione dei risultati del pensiero creativo. Le antinomie russelliane, la cui natura è logico-linguistica, non mettono affatto in crisi la matematica reale. Quest'ultima non si basa sulla logica, ma sull'*intuizione dello scorrere continuo del tempo*. Questa intuizione rende possibile la costruzione successiva e indefinita degli enti matematici, che non hanno una realtà esterna, ma sono costruzioni mentali.

Diversa sia dall'impostazione logicista sia da quella intuizionista è quella di David Hilbert. La logica, che fa uso di nozioni aritmetiche come quelle di insieme e numero, non può essere considerata più fondamentale della matematica, ma deve essere sviluppata parallelamente ad essa. Le diverse teorie matematiche, come la teoria degli insiemi, la geometria elementare e l'aritmetica, sono *strutture assiomatico-deduttive*. Ciascuna di esse risulta fondata qualora se ne provi la non contraddittorietà. Hilbert concentra dunque la sua attenzione sulla coerenza di un sistema formale.

Anche il formalismo, tuttavia, conosce una crisi clamorosa, quando nel 1931 il matematico austriaco Kurt Gödel dimostra due *teoremi di incompletezza*, secondo i quali un enunciato relativo alla non-contraddittorietà di un qualsiasi sistema formale logico o matematico è in realtà, all'interno del sistema stesso, un enunciato indecidibile: esso non può venire mostrato né come vero né come falso, attraverso il riferimento alle proposizioni del sistema. In tal modo, la fondazione dei sistemi formali, obbiettivo del formalismo, risulta impossibile.

Spesso i teoremi di incompletezza sono stati intesi come la dimostrazione dell'esistenza di insuperabili limiti per la ragione umana. Va notato che questi risultati sono stati ottenuti facendo uso della logica e della ragione e non contro di essa. Questi risultati di impossibilità, come analoghe dimostrazioni matematiche relative alla quadratura del cerchio o alla formula risolutiva delle equazioni di quarto grado, accrescono la nostra consapevolezza e il nostro controllo sui metodi logici e matematici di cui ci serviamo.

Infatti, Gödel dimostra che non è possibile un certo tipo di fondazione, ma non qualsiasi forma di giustificazione: se non è possibile fondare sul più semplice (l'aritmetica elementare) il più complesso (la matematica nel suo insieme), ciò non esclude, però, altre forme di giustificazione, ricorrendo a teorie più potenti di quelle che si vogliono fondare. *La scienza non è però più vista come un albero che cresce sulle salde radici della logica, ma come un complesso di teorie, che si sorreggono a vicenda, che si giustificano reciprocamente in un processo circolare.*

# Capitolo 2

## Spazio e Tempo

Spostiamoci ora sulla fisica: il primo nucleo tematico che affronteremo dal punto di vista fisico è quello dello spazio e del tempo. Analizzeremo come è cambiata dal punto di vista scientifico la concezione di queste due entità, che hanno trovato una loro unità nel concetto di spazio-tempo, che combina le nostre classiche nozioni tradizionalmente distinte di spazio e di tempo in un solo costruito unico e omogeneo. Singolarmente, si è scelto di condurre anche l'analisi delle concezioni di Aristotele e di Galileo secondo una prospettiva spazio-temporale: infatti, benchè generalmente si pensi che la nascita dello spazio-tempo sia una conseguenza diretta della teoria della relatività ristretta, va ricordato che lo spazio-tempo non è un'idea originale di Einstein, e che anzi, anche le teorie relativistiche di Galileo e Newton avrebbero potuto trarre grande vantaggio da una prospettiva di tipo spazio-temporale, e proprio da questo punto di vista verranno analizzate in questa sede.

### 2.1 Da Aristotele alla relatività Galileiana

Nella fisica di Aristotele, lo spazio fisico era rappresentato da uno spazio euclideo tridimensionale, cosicchè un qualsiasi punto dello spazio rimaneva lo stesso punto anche in un secondo istante, se l'oggetto situato in quel punto rimaneva fermo durante tale intervallo di tempo. Anche il tempo era rappresentato come uno spazio euclideo, ma ridotto ad una sola dimensione, qualcosa di simile a una retta dei numeri reali, ma senza un'origine definita, uno zero temporale, insomma. In termini meno intuitivi, ma più precisi, potremmo pensare lo spazio-tempo aristotelico  $\mathcal{A}$  come il prodotto cartesiano

$$\mathcal{A} = \mathbb{E}^1 \times \mathbb{E}^3$$

Dunque un punto in questo modello è definito nello spazio e nel tempo da una coppia  $(t, x)$ , dove  $t$ , il tempo, appartiene ad uno spazio euclideo di una sola dimensione, che abbiamo indicato con  $\mathbb{E}^1$ , e  $x$ , punto dello spazio, appartiene ad uno spazio euclideo di tre dimensioni  $\mathbb{E}^3$ , come mostrato nella figura 2.1.

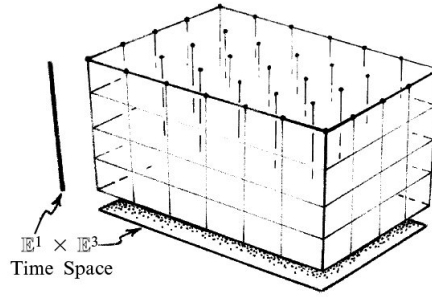


Figura 2.1: Lo spazio-tempo aristotelico

Questo comporta che, considerati due eventi diversi che si svolgono in questo spazio-tempo, abbiamo una precisa definizione della loro separazione spaziale, che è la loro distanza, e della loro separazione temporale. In particolare, sappiamo se due eventi accadono nello stesso luogo o nello stesso tempo; nel caso in cui due eventi si svolgano in tempi diversi abbiamo una chiara notazione dell'intervallo temporale che li separa.

Spostiamoci ora più avanti nel tempo, nel 1638, quando Galileo formula per la prima volta la sua relatività nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, e vediamo quale modello spazio-temporale possa definirla. La relatività galileiana è rappresentata, dal punto di vista matematico, da un sistema di equazioni che lega le coordinate di un sistema di riferimento con quelle di un secondo sistema di riferimento che si muove con velocità costante  $v$  rispetto ad esso; Galileo ha infatti cercato di capire come variassero le leggi fisiche al variare del punto d'osservazione e degli spostamenti relativi dei due sistemi di riferimento.

Ciò che Galileo ci insegna, in sostanza, è che le leggi del movimento rimangono esattamente le stesse se riferite a un qualsiasi sistema di riferimento che si muove di moto uniforme. Scrive infatti:

Rinserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran naviglio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti: siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vada versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca che sia posto a basso; e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza. [...] Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia mentre il vascello sta fermo non debbano succedere così: fate muovere la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur di moto uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti; né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina, o pure sta ferma. [3]

Dunque non possiamo distinguere un sistema di riferimento fermo da uno in moto uniforme, e di conseguenza, non possiamo più dire che un particolare punto dello spazio

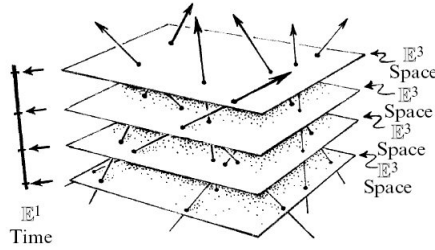


Figura 2.2: Lo spazio-tempo galileiano

è – o non è – lo stesso punto al variare del tempo. In altre parole, avremmo potuto raffigurare lo spazio-tempo di Aristotele come un grande schermo, ogni punto del quale rimane lo stesso indipendentemente da ciò che viene proiettato su di esso; nello spazio-tempo di Galileo non c'è più uno «schermo» che rimane fisso mentre il tempo passa. Non possiamo più dire, chiusi nel nostro sistema di riferimento, che un determinato punto  $P$  dello spazio rimane lo stesso al variare del tempo: se consideriamo ad esempio un punto fisso sulla superficie terrestre, esso dopo qualche secondo si sarà spostato in conseguenza del moto di rotazione terrestre in un'altra regione; allo stesso modo dovremmo considerare il moto di rivoluzione, il moto di rotazione della Terra intorno al centro della Galassia, e il moto della Galassia stessa nel gruppo Locale.

Se volessimo rappresentare lo spazio-tempo di Galileo in termini matematici, non avremmo più un unico spazio euclideo  $\mathbb{E}^3$  in cui si svolgono tutti i moti del mondo fisico al variare del tempo, ma avremmo più spazi euclidei per ogni istante del tempo. Nello spazio-tempo galileiano  $\mathcal{G}$  ogni evento ha una sua coordinata temporale, ma non ha una localizzazione spaziale in uno specifico spazio euclideo  $\mathbb{E}^3$  (figura 2.2).

## 2.2 La relatività ristretta

Il principio di inerzia richiedeva la definizione di un sistema di riferimento nel quale fosse valido: Newton risolse il dilemma asserendo che tutti gli spazi relativi si riferissero ad uno *spazio assoluto*, il solo esistente invariato e immutabile, e che l'immutabilità dello spazio assoluto fosse nient'altro che l'espressione dell'esistenza di un *tempo assoluto*, che scorre uniformemente, pervadendo tutto lo spazio assoluto.

La soluzione di Newton fu brillante e diventò un paradigma destinato a durare per secoli. Già Galileo, tuttavia, con i suoi tentativi di misurare la velocità della luce su base terrestre, esprimeva dubbi non risolti per l'epoca su come si dovesse intendere il principio di relatività e quindi il principio di inerzia ad esso strettamente correlato. Questi dubbi rimasero sopiti, offuscati dal fulgore del grande successo della meccanica newtoniana, fino al 1905, quando con l'avvento delle equazioni di Maxwell, delle trasformazioni di Lorentz e infine della teoria della relatività di Einstein viene meno il concetto, fino ad allora dato per scontato, di tempo assoluto.

Nel paragrafo precedente abbiamo già considerato uno degli ingredienti fondamentali

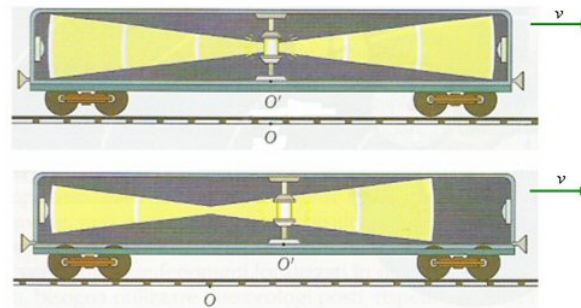


Figura 2.3: Due eventi possono essere giudicati simultanei da un osservatore, e possono essere invece giudicati non simultanei da un altro osservatore in moto uniforme rispetto al primo.

della relatività generale di Einstein, il principio di relatività, che ci dice che le leggi del moto non distinguono tra moto stazionario e uniforme. Un altro aspetto importante è il principio di equivalenza, secondo cui la massa inerziale (la proprietà intrinseca del corpo materiale di opporsi alle variazioni di moto) e la massa gravitazionale (la proprietà di un corpo di essere sorgente e di subire l'influsso di un campo gravitazionale) sono numericamente uguali. L'ultimo ingrediente di cui abbiamo bisogno per introdurre la relatività di Einstein è la velocità finita della luce.

La teoria ristretta infatti parte dall'assunto che se la velocità della luce è una costante allora il tempo e lo spazio sono delle variabili. Il tempo e lo spazio sono così legati insieme a formare un nuovo spazio-tempo: quando ci si muove rispetto ad un sistema di riferimento il tempo rallenta e la massa aumenta in maniera crescente man mano che ci si avvicina alla velocità della luce. Da qui si deduce il motivo per cui la teoria della relatività ristretta dice che non è possibile superare, o anche solo raggiungere, la velocità della luce; il tempo si fermerebbe e la massa diventerebbe infinita. La relatività generale postula invece l'uguaglianza della massa gravitazionale e della massa inerziale, e ne ricava la forma dello spazio-tempo, ovvero la sua metrica generale.

### 2.2.1 La fine dello spazio e del tempo assoluti

Il fatto che il tempo e lo spazio siano delle variabili comporta anche la fine del concetto di etere, non solo come mezzo che trasmette la luce (sostituito dal campo elettromagnetico), ma anche come riferimento assoluto: se ogni osservatore inerziale può dire a ragione di essere fermo rispetto all'etere, cade definitivamente il concetto di spazio assoluto.

Ma anche il concetto di simultaneità perde la sua absolutezza; infatti, se la velocità della luce è finita ed è la stessa per ogni osservatore, due eventi simultanei in un sistema inerziale non lo sono più se osservati da un altro sistema inerziale in moto rispetto a quello. Per spiegare tali concetti, Einstein ricorreva a degli «esperimenti mentali», uno dei quali è qui di seguito riportato. Se la luce emessa da due lampadine  $A$  e  $B$  equidistanti da un osservatore  $O$ , fermo rispetto ad esse, lo raggiunge allo stesso istante, allora  $O$  considera

i due eventi come simultanei. Ma un osservatore  $O'$  in un sistema di riferimento inerziale in moto rettilineo uniforme rispetto a quello in cui  $O$ ,  $A$  e  $B$  sono fermi, percepisce la luce delle due lampadine in istanti diversi. Anche la meccanica classica prevede che la luce abbia una velocità finita, dunque che a seconda della posizione di un osservatore l'informazione luminosa di due eventi distanti simultanei possa giungere prima o dopo.

Nell'ambito della meccanica classica, però, tutto si deve risolvere tenendo in conto la distanza dagli eventi e la velocità della luce: l'osservatore  $O'$ , sapendo di essere (ad esempio) più vicino ad  $A$  che a  $B$ , calcolando il tempo che intercorre tra il momento in cui riceve l'impulso luminoso di  $A$  e quello di  $B$ , e conoscendo le distanze relative e la velocità della luce, dovrebbe concludere che in realtà gli eventi erano contemporanei. Per fare un altro esempio, se noi vedessimo un semaforo accendersi a pochi metri da noi e, circa otto minuti dopo, vedessimo il Sole diventare blu, pur avendo percepito in istanti diversi la luce dei due eventi, concluderemmo secondo la meccanica classica (sapendo che la luce del Sole impiega proprio 8 minuti per giungere sulla Terra) che i due eventi sono avvenuti nel medesimo istante.

Ciò non risulta valido nell'ambito della Relatività speciale. Se  $O'$  è in moto rispetto a  $O$ ,  $A$  e  $B$  (ad una velocità sufficientemente alta da apprezzare gli effetti relativistici), anche tenendo in conto gli effetti della velocità della luce dovrà concludere (ad esempio) che  $A$  precede  $B$ . Un altro osservatore  $O''$ , con stato di moto opposto, dovrà invece concludere che  $B$  precede  $A$ . La situazione è apparentemente paradossale, a causa della concezione classica dell'esistenza di un tempo assoluto, uguale per tutti i sistemi di riferimento. Venendo a mancare quest'ultimo, sostituito dallo spazio-tempo relativistico, la simultaneità di due eventi distanti risulta essere legata allo stato di moto dell'osservatore di tali eventi, e non più assoluta.

Questa situazione si verifica soltanto tra eventi tra i quali intercorre un intervallo di tipo spaziale, tali cioè che è impossibile per un raggio di luce (o per qualcosa di più lento) essere presente ad entrambi gli eventi: nell'esempio delle lampadine, in effetti, se esse sono distanti tra loro  $d$ , e la loro accensione risulta contemporanea per un osservatore fermo rispetto ad esse, un raggio di luce non potrà essere presente sia all'accensione di  $A$  che a quella di  $B$ , avendo velocità finita.

Le coppie di eventi per i quali invece la luce (o qualcosa di più lento) può presenziare ad entrambi, sono dette separate da un intervallo di tipo temporale: questi eventi saranno visti da tutti gli osservatori, qualunque sia il loro stato di moto, nello stesso ordine cronologico (anche se l'intervallo di tempo potrà apparire più breve o più lungo ai diversi osservatori). Per queste coppie di eventi sussiste dunque una definita relazione cronologica di prima/dopo, indipendente dall'osservatore.

### 2.2.2 La dilatazione del tempo e la contrazione delle lunghezze

Secondo la teoria della relatività può mutare, oltre all'istante in cui avviene, anche la durata di un evento, a seconda delle condizioni dell'osservatore. Infatti, Se  $\Delta t'$  è l'intervallo di tempo fra due eventi, misurato da un osservatore per il quale essi accadono nello stesso punto dello spazio, l'intervallo di tempo  $\Delta t$  fra gli stessi eventi, misurato in un secondo sistema in moto rettilineo uniforme con velocità di modulo  $v$  rispetto al

primo è:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

dunque non solo viene meno la contemporaneità degli eventi, ma anche la durata degli eventi stessi rispetto a due sistemi di riferimento diversi: il tempo cioè si dilata, in aperto contrasto con la concezione di tempo assoluto che già abbiamo visto.

Per mostrare che anche lo spazio è una grandezza relativa, Einstein ricorreva ad un altro esperimento mentale. Supponiamo che un'astronave  $A$  viaggi con velocità  $v$  dalla Terra verso Plutone. L'osservatore  $O'$  che sta sull'astronave assegnerà al viaggio un tempo di durata  $\Delta t'$ , mentre un osservatore  $O$  situato sulla Terra registrerà, per quanto visto sopra, un tempo  $\Delta t$  più lungo. I due intervalli di tempo sono legati dalla relazione  $\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ .

Poichè le distanze Terra-Plutone  $l$  e  $l'$ , rispettivamente per  $O$  e per  $O'$  sono  $l = \Delta t v$  e  $l' = \Delta t' v$ , otteniamo la seguente relazione:

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

La precedente proprietà rappresenta la contrazione delle lunghezze, che si verifica solo nella direzione del moto e non riguarda dunque le dimensioni trasversali di un oggetto.

### 2.2.3 Effetti sulla permanenza della materia

Consideriamo in questo paragrafo un'affascinante applicazione della relatività in base alle recenti scoperte astronomiche: facciamo qui riferimento alla teoria che suppone esistere un orizzonte degli eventi astronomico costituito da galassie che si allontanano da noi ad una velocità molto vicina a quella della luce e che non sono quindi percepibili. Per questa osservazione consideriamo anche che, nel caso di due sistemi in moto relativo, non c'è modo di stabilire quale sia in stato inerziale e quale invece in movimento.

Quindi il rallentamento temporale quando ci si avvicina alla velocità della luce è imposto da ciascuno dei sistemi sull'altro: ossia ciascuno vedrà gli eventi accadenti sull'altro sistema accadere ad una velocità inferiore a quelli che avvengono sul proprio fino a vederli quasi fermi quando la velocità si avvicina a quella della luce - il semplice motivo è che la luce deve apparire ad entrambi avere la stessa velocità: ma per far ciò gli eventi nel sistema in moto rispetto a noi devono avvenire più lentamente che nel nostro sistema altrimenti sarebbe la luce a dover apparire più lenta nel loro sistema che nel nostro, ovvero apparire a noi più veloce quella nel loro sistema di quella nel nostro: in entrambe i casi ci troveremmo in contrasto con l'ipotesi di invarianza della velocità della luce.

Applicando queste considerazioni a noi ed alle galassie lontane che si muovono rispetto a noi a velocità vicine a quelle della luce possiamo osservare che, come noi rallentiamo il loro tempo, anche loro rallentano il nostro. Di conseguenza, secondo questa interpretazione, l'impressione di permanenza che abbiamo della materia accanto a noi è dovuta agli effetti relativistici che ci sono imposti da queste lontane galassie.

## 2.3 La relatività generale

Uno dei motivi che spinsero Einstein ad indagare nella direzione di quella che sarebbe diventata la relatività generale fu una questione di simmetria: la relatività ristretta aveva stabilito l'uguaglianza di tutti i sistemi inerziali, lasciando fuori i sistemi accelerati, che possono collegarsi solo tenendo conto di forze ben individuabili con vari esperimenti. Questo poneva i sistemi inerziali su una posizione privilegiata, diversa rispetto ai non inerziali, fatto che turbava Einstein dal punto di vista della completezza e dell'eleganza della struttura teorica.

In più, la relatività ristretta aveva mostrato che lo spazio ed il tempo devono essere trattati insieme se si vogliono ottenere risultati coerenti; il tempo era diventato una coordinata come le altre tre e ad impedire certi movimenti in questo spazio a quattro dimensioni c'era solo il principio di causalità.

Un celeberrimo esperimento ideale, noto come ascensore di Einstein, fu l'intuizione da cui prese le mosse tutto il successivo sviluppo della teoria: su un ascensore in caduta libera dovuta a un campo gravitazionale, senza possibilità di vedere all'esterno, un osservatore supporrebbe di essere in assenza di gravità; per provarlo, egli lascia cadere una moneta ed osserva che la moneta resta alla stessa altezza nella cabina ovvero non cade rispetto ad essa, che per l'osservatore è l'unico punto di riferimento. Questo porterebbe allora a dire che un sistema in caduta libera in un campo gravitazionale, è indistinguibile (almeno per un certo periodo) da un altro non sottoposto ad alcuna forza. D'altra parte, quando l'ascensore posto in un campo gravitazionale sta fermo, l'osservatore sente la forza di gravità (e una moneta lasciata libera cade ai suoi piedi); non appena l'ascensore inizia a cadere, la moneta resta a mezz'aria: in questo caso l'osservatore può pensare che sia comparso all'improvviso un campo gravitazionale dalla direzione del soffitto, che bilancia esattamente quello di partenza; di nuovo non può decidere quale delle due situazioni si sta verificando.

Da questi presupposti, Einstein cercò di costruire una visione della realtà parallela a quella della legge d'inerzia: mentre per la legge d'inerzia un corpo non sottoposto a forze si muove di moto uniforme (velocità costante in modulo e direzione e quindi lungo una retta), un corpo sottoposto alla sola gravità si muove nello spazio-tempo, deformato dal campo gravitazionale, lungo una traiettoria che costituisce il percorso più breve tra due punti (in uno spazio euclideo, quindi non deformato, tale traiettoria coincide proprio con il segmento rettilineo che unisce due punti).

Il fondamento della relatività generale – come abbiamo già detto – è l'assunto, noto come principio di equivalenza, che un'accelerazione sia indistinguibile localmente dagli effetti di un campo gravitazionale, e dunque che la massa inerziale sia uguale alla massa gravitazionale.

### 2.3.1 La massa è l'energia

Nella teoria della relatività generale, lunghezza e tempo non sono le sole grandezze relative. In fisica classica si ha, per il secondo principio della dinamica che  $F = m \cdot a$ , cioè che la forza è proporzionale alla massa, che è costante. Nella teoria della relatività



generale Einstein introduce il concetto di massa variabile: la massa varia nel tempo, e dunque dobbiamo parlare di variazione di massa:  $F = \Delta m \cdot a$ .

Infatti, Se  $m_0$  è la massa di un corpo nel sistema di riferimento in cui esso è in quiete, la sua massa in un sistema di riferimento rispetto al quale è in moto con velocità di modulo  $v$  è:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

la massa di un oggetto, che l'esperienza comune ci suggerisce essere stabile, in realtà varia e cresce con la velocità dell'oggetto stesso. Non solo: anche l'energia è correlata alla massa e alla velocità:

$$E = mc^2$$

questa formula suggerisce che quando un corpo è a riposo ha ancora dell'energia sotto forma di massa, al contrario di quanto proposto dal sistema Newtoniano secondo il quale un corpo libero fermo non ha energia. Per questa ragione la quantità  $mc^2$  è a volte chiamata energia a riposo del corpo. La  $E$  della formula può essere vista come l'energia totale del corpo, che è proporzionale alla sua massa solo se il corpo è a riposo.

Da un altro punto di vista, anche una nuvola di fotoni che viaggia all'interno di uno spazio vuoto, con ogni fotone privo di massa a riposo, ha comunque una massa propria, dovuta alla sua energia cinetica.

Diventa quindi facile capire come *massa ed energia si equivalgano* e come esse siano due facce della stessa medaglia. In sostanza la massa è una forma di energia estremamente concentrata: essa scompare quando compare energia e viceversa. In particolare se un corpo assorbe una quantità di energia  $E$  la sua massa non si conserva ma aumenta della quantità  $\frac{E}{c^2}$ ; viceversa la massa del corpo diminuisce se perde energia, per esempio emettendo luce.

L'enorme fattore di conversione che lega la massa e l'energia spiega come concentrando un grosso quantitativo di energia ( $= mc^2$ ) si possa creare una piccola quantità di materia (massa), e anche come partendo da una piccolissima massa ( $= \frac{E}{c^2}$ ) si possa ottenere un grandissimo quantitativo di energia.

La teoria della relatività ci fornisce, quindi, un'altra sorpresa: poiché la massa non è altro che una forma di energia, essa non si conserva separatamente, ma si aggiunge all'energia cinetica e all'energia potenziale nell'enunciare la conservazione dell'energia meccanica. Poiché la massa che si dematerializza diventa energia e l'energia si può materializzare, è sufficiente un unico principio di conservazione della massa-energia, secondo il quale la somma di tutte le energie e di tutte le masse dell'universo è costante.

### 2.3.2 Il nuovo spazio-tempo

Nella logica relativistica, non è più necessario ricorrere alla forza gravitazionale per spiegare l'attrazione tra corpi. La teoria della relatività generale afferma infatti che lo spaziotempo viene più o meno curvato dalla presenza di una massa; un'altra massa più piccola si muove allora come effetto di tale curvatura. Spesso, si raffigura la situazione

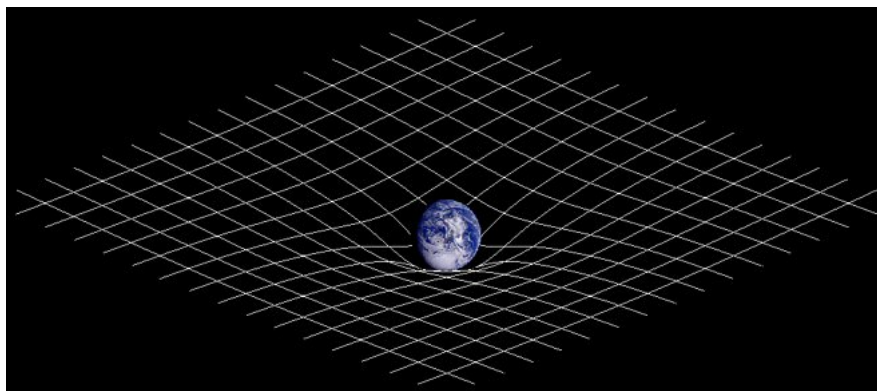


Figura 2.4: Rappresentazione della curvatura dello spaziotempo dovuta alla presenza di massa, rappresentata in questo caso dalla Terra.

come una palla che deforma un telo elastico teso con il suo peso, mentre un'altra pallina viene accelerata da questa deformazione del piano ed in pratica attratta dalla prima (vedi la figura 2.4). Questa è solo una semplificazione alle dimensioni raffigurabili, in quanto ad essere deformato è lo spazio-tempo e non solo le dimensioni spaziali, cosa impossibile da raffigurare e difficile da concepire.

L'unica situazione che riusciamo a raffigurare correttamente è quella di un universo a una dimensione spaziale ed una temporale. Un qualunque punto materiale è rappresentato da una linea (linea di universo), non da un punto, che fornisce la sua posizione per ogni istante: il fatto che sia fermo o in moto farà solo cambiare l'inclinazione di questa retta. Ora pensiamo di curvare tale universo usando la terza dimensione: quello che prima era la retta che descriveva un punto, ora è diventata una superficie.

Su una superficie curva non vale la geometria euclidea, in particolare è possibile tracciare un triangolo i cui angoli sommati non forniscono  $180^\circ$  ed è anche possibile procedere sempre nella stessa direzione, ritornando dopo un certo tempo al punto di partenza.

Torneremo su alcuni aspetti della relatività generale, e in particolare sulle sue implicazioni in campo cosmologico, nel capitolo che segue.

# Capitolo 3

## Eresie cosmiche

L'origine dell'universo è forse il tema più profondo e più problematico di tutta l'esperienza religiosa, filosofica e scientifica dell'uomo, e il mito della creazione è in questo senso un primo tentativo di risposta, largamente diffuso agli albori della civiltà e nel pensiero prefilosofico. Naturalmente, quando il pensiero abbandona il mito e la religione ed entra in una fase scientifica, abbandona le risposte informali e imprecise tipiche del mito e della religione e scopre la necessità di argomenti formalizzanti e matematizzanti, cosicché il problema passa dal campo della religione a quello della fisica, e qui ci accingiamo a seguirlo.

Come nel caso del tempo e dello spazio, anche questa volta procederemo cronologicamente, citando per sommi capi i primi modelli cosmologici delle epoche passate, da Pitagora fino a Kant e Laplace, per poi concentrarci più in dettaglio sulle ipotesi cosmologiche della scienza di oggi. Anche per questo secondo nucleo tematico cercheremo di evidenziare le implicazioni filosofiche dell'evoluzione dei diversi modelli scientifici, per poi tirarne le fila in una prospettiva più globale all'interno dell'ultimo capitolo.

### 3.1 I primi modelli cosmologici

Il primo tentativo di costruire un modello cosmologico quantitativo dell'universo, da cui si potesse eventualmente dedurre un'informazione sulla sua origine e sul suo destino, risale a Pitagora. La coincidenza fra musica, matematica e natura da lui postulata fornì per la prima volta gli strumenti scientifici necessari: la metafisica guidava l'ispirazione concettuale per la costruzione del modello, la matematica offriva lo strumento per descriverlo formalmente, e la fisica forniva i dati per la sua verifica empirica. I dettagli dell'impostazione pitagorica sono oggi ovviamente superati, e non vale la pena di soffermarvisi. Ma non si deve dimenticare che il modello, trasmesso attraverso il *Timeo*, arrivò fino a Keplero, che ne elaborò una visione aggiornata ne *L'armonia del mondo*, dove attraverso ragionamenti musicali e matematici che oggi ci appaiono sconcertanti, egli riuscì a elaborare le tre famose leggi sul moto dei pianeti, che costituiscono i pilastri su cui si poggiò la cosmologia newtoniana.

Un fatto nuovo per la cosmologia fu la legge di gravitazione universale. Legge che Newton stesso giustificò, nei *Principia*, sulla base di considerazione musicali, e di cui attribuì la scoperta a Pitagora stesso. Newton cercò di risolvere il problema cosmologico applicando la sua legge, ma incontrò serie difficoltà che misero la fisica classica in stallo fino al Novecento. La prima difficoltà fu la scoperta che l'universo non poteva essere infinito e contenere una distribuzione uniforme di materia: questo avrebbe provocato in ciascun punto un'attrazione infinita. Una riformulazione di questo problema, più accattivante e più nota, è il cosiddetto *Paradosso di Olbers*: se ci fossero infinite stelle, uniformemente distribuite, la loro luce congiunta dovrebbe essere infinita e il cielo notturno non potrebbe essere buio.

A scanso di equivoci, è bene precisare che gli argomenti di Newton e Olbers sono collegate da ragionamenti basati su calcoli, precisi e quantitativi, per quanto semplici. Riportiamo come esempio l'argomento di Olbers. Si considerino le stelle contenute sulla superficie di una sfera a una certa distanza dalla Terra: se sono distribuite uniformemente, il loro numero è proporzionale alla superficie della sfera, e dunque al quadrato della distanza; ma poichè la luminosità di una stella è inversamente proporzionale al quadrato della distanza, i due fattori si equilibrano, e ogni sfera produce la stessa luminosità; se l'universo è infinito, allora la somma di infinite sfere, tutte luminose allo stesso modo, produce una luminosità infinita. La soluzione del paradosso è duplice. Anzitutto, se l'universo ha avuto un inizio, a noi finora è giunta soltanto la luce delle stelle che distano meno di quanto la luce ha potuto percorrere da quell'istante ad oggi. Inoltre, se l'universo è in espansione, la luminosità delle stelle decresce con la loro distanza da noi, e non è costante.

La seconda difficoltà in cui Newton si imbattè fu che non solo l'universo non poteva essere infinito: non poteva neppure essere finito. L'osservazione sembra infatti mostrare una distribuzione uniforme di stelle, ma l'unico modo di distribuire uniformemente una quantità finita di materia in uno spazio infinito è che essa sia talmente dispersa da apparire nulla. La cosmologia newtoniana così si bloccò: per avanzare era necessaria una nuova fisica, basata su principi diversi, e per questo si dovette attendere fino al 1915, quando Einstein introdusse la relatività generale di cui abbiamo già parlato, e di cui, come abbiamo visto, la meccanica di Galileo e di Newton è solo una prima approssimazione. La teoria newtoniana era tuttavia riuscita a descrivere la formazione del mondo in maniera evolutiva, mostrando che era possibile confinare l'intervento del divino al solo istante della creazione.

La descrizione prese le mosse dall'ipotesi della «nebulosa primitiva» proposta da Kant nel 1755, in *Teoria dei cieli*, e sviluppata da Laplace nella *Esposizione del sistema del mondo*. Questi mostrò che la meccanica celeste era in grado di rendere conto dell'evoluzione del cosmo come se esso fosse un gigantesco meccanismo che, una volta messo in moto, procede autonomamente e automaticamente senza alcun intervento esterno. La cosa fu sufficientemente innovativa da stupire Napoleone: dopo aver ascoltato Laplace e i dettagli della teoria, l'imperatore gli domandò perchè non avesse fatto menzione del nome di Dio. Laplace rispose: «Perchè non ho bisogno di quell'ipotesi». Pochi giorni dopo Napoleone ne ricevette conferma da Lagrange, che aggiunse: «Però era una bella

ipotesi, che spiegava facilmente molte cose».

Nel 1931 l'abate Lemaître propose, sotto il nome di «atomo primitivo», un modello letteralmente esplosivo dell'universo, la quale i suoi detrattori diedero il fortunato nome di Big Bang, e che altro non è che una versione riveduta e corretta della «nebulosa primitiva» di Kant e Laplace. Questo modello costituisce oggi l'ortodossia cosmologica, al punto che gli viene dato il nome di teoria standard, ed è derivato da un'ipotesi alla quale rivolgeremo ora la nostra attenzione.

## 3.2 Verso i nuovi modelli cosmologici

### 3.2.1 Il ruolo del principio cosmologico e delle equazioni di Friedmann

Si può affermare che la cosmologia moderna nasca tra il 1915 e il 1929: nel 1915 infatti Einstein pubblica il primo articolo sulla teoria della relatività generale, e nel 1929 Hubble scopre la sua famosa legge, che implica che l'universo è in espansione. In un altro articolo, destinato a fare storia, Einstein enunciava implicitamente il *principio cosmologico*, già presagito da Nicola Cusano e Giordano Bruno: l'universo è omogeneo e isotropo, da qualunque punto e in qualunque direzione lo si guardi.

Tale principio fu enunciato per semplificare le equazioni della relatività generale e non venne inizialmente verificato tramite l'osservazione degli oggetti cosmici (quando venne enunciato da Einstein non si conoscevano ancora corpi celesti esterni alla Via Lattea), ma in seguito si poté verificare come l'universo osservabile (del diametro di vari miliardi di anni luce) fosse effettivamente omogeneo e isotropo.

Una prima conseguenza del principio cosmologico è l'esistenza di un *tempo cosmico*, che si ottiene identificando tra loro gli istanti in cui i vari osservatori vedono l'universo allo stesso modo. Se l'universo fosse statico, il tempo cosmico collapserebbe a un solo istante, in accordo con l'idea che lo scorrere del tempo viene testimoniato dal cambiamento, e quindi che senza cambiamento il tempo si fermerebbe.

Una seconda conseguenza è l'*isotropia dello spazio*, cioè la dipendenza della sua struttura soltanto dal tempo e non dalla direzione. Dal punto di vista matematico l'isotropia si traduce nella legge di Hubble<sup>1</sup>, enunciata nel 1929: il fatto cioè che, in ciascun istante fissato, la velocità delle galassie rispetto al centro dipende soltanto dalla loro distanza da esso, attraverso una costante di proporzionalità, detta di Hubble. Tale legge pulì il campo da tutti i modelli statici di universo, e le osservazioni di Hubble al telescopio di Monte Wilson mostrarono che tale costante è positiva e che dunque l'universo è in espansione.

Un'ultima conseguenza del principio cosmologico è l'*omogeneità della materia*, cioè la dipendenza della sua densità soltanto dal tempo e non dalla posizione. Dal punto di vista matematico, l'omogeneità si traduce nel fatto che la densità di materia è anch'essa una costante dell'universo, in ciascun istante della sua storia.

Poco tempo dopo la pubblicazione della sua teoria Einstein si accorse subito che, assumendo il principio cosmologico, anche un universo infinito tenderebbe a collapsare su

---

<sup>1</sup> $v = H \cdot d$ , dove  $v$  è la velocità della galassia e  $d$  la sua distanza dal centro.

sé stesso. Visto che però era opinione comune che l'universo fosse statico, Einstein aggiunse nelle equazioni del campo gravitazionale una costante, detta *costante cosmologica*, per controbilanciare questa contrazione. Questa costante non modificava minimamente le predizioni della teoria in tutti gli altri campi, ma la sua introduzione si prestava ad un altro genere di critica. Infatti, esiste un unico valore della costante cosmologica che consente di avere un universo in equilibrio statico, ed anche in questo caso l'equilibrio risulta instabile; ciò significa che per avere un universo eternamente statico il valore fisico della costante cosmologica dovrebbe essere esattamente quello richiesto dalla condizione di staticità. Ogni altro valore, anche estremamente prossimo a quello indicato da Einstein, conduce ad un universo in collasso o in espansione.

Così dalle equazioni della teoria di Einstein si possono ricavare le cosiddette equazioni cosmologiche, trovate da Friedmann nel 1922, le cui soluzioni forniscono i possibili modelli dell'universo. La bella notizia sta nella pluralità delle soluzioni, il che segnala la possibilità di vari universi, e dunque la contingenza del nostro. La cattiva notizia sta invece nel fatto stesso che queste sono soluzioni, il che indica la necessità di risolverle: cosa che, come spesso in fisica, può non essere affatto agevole.

### 3.2.2 Tre modelli diversi

A questo punto la cosa più ovvia era formulare un'ipotesi semplificatrice, e cioè rafforzare in una nuova versione il principio cosmologico, da cui tutte le equazioni di Friedmann hanno tratto origine. Questa versione infatti asserisce che l'universo appare nello stesso modo *da qualunque punto e in qualunque direzione lo si guardi*; essa è detta *principio cosmologico perfetto*, e riduce il film della storia cosmica a una sola istantanea, e asserisce che l'universo appare allo stesso modo in ciascun istante, da qualunque punto, e in qualunque direzione lo si guardi. La trattazione matematica diventa allora particolarmente semplice, e si scopre che la soluzione è del tipo che in matematica viene chiamato esponenziale.

Dall'espansione esponenziale dell'universo deriva una conseguenza interessante: *se vale il principio cosmologico perfetto, l'universo non ha avuto un inizio, e non avrà una fine*. Infatti, la crescita esponenziale non si annulla mai. Ma non basta: come conseguenza del principio cosmologico perfetto, la densità della materia deve anche rimanere costante. E l'unico modo di mantenere una densità costante in un universo in espansione, in cui quindi il volume cresce costantemente, è che ci sia una continua creazione di materia.

La creazione continua di materia però fa a pugni con la prima legge della termodinamica, una delle cui formulazioni è appunto che nulla si crea e nulla si distrugge, benché tutto si trasformi. Se non siamo disposti a rinunciarvi, dovremo fare marcia indietro e ritornare alla visione di partenza del principio cosmologico, e aggiungere esplicitamente l'ipotesi della conservazione della materia. E da questa, unita al principio cosmologico, derivano soluzioni diverse delle equazioni cosmologiche di Friedmann.

In tutte queste soluzioni l'universo ha avuto un inizio, che viene chiamato Big Bang, ma esso può evolvere in tre modi diversi. Nel primo l'universo si espande, raggiunge un massimo, e poi si contrae, andando in contro alla catastrofe chiamata Big Crunch.

Nel secondo e nel terzo si espande indefinitamente, senza mai arrivare a invertire la sua evoluzione. I tre modelli si distinguono per le proprietà dello spazio, cioè per il tipo di geometria: nel primo caso abbiamo una geometria sferica: lo spazio è chiuso, e curvo come la superficie di una sfera, solo a una dimensione in più; nel secondo la geometria è euclidea: lo spazio è aperto, piatto come un piano; nel terzo infine abbiamo una geometria iperbolica: lo spazio è aperto, di nuovo curvo, ma in maniera analoga a una sella di cavallo.

A causa dell'esplosione primordiale, le masse dell'universo sono soggette a una forza centrifuga: esse tendono tanto più ad allontanarsi reciprocamente, quanto più l'esplosione è stata violenta. Le stesse masse sono però anche soggette a una forza centripeta, dovuta alla gravitazione: l'espansione viene tanto più frenata quanto maggiore è la densità di materia dell'universo. Tutto dipende dunque dal rapporto reciproco fra le due forze: se la seconda è grande abbastanza, prende il sopravvento e riesce a invertire l'espansione in una contrazione; altrimenti, l'espansione continua indefinitamente.

In tutti i casi però, il principio cosmologico, combinato con il principio di conservazione della materia, implica un inizio dell'universo, anche se non necessariamente una sua fine.

### 3.2.3 Le lacune del Big-Bang

Per quanto dopo il 1970 il modello del Big Bang sia rimasto praticamente senza serie alternative, esso presentava e presenta alcune rilevanti lacune. È utile segnalare qui due fra le più importanti, che hanno condotto all'introduzione di due significative modifiche alla teoria. Entrambe queste lacune emersero poco dopo la scoperta della radiazione cosmologica di fondo, e riguardavano l'estrema uniformità su tutto il cielo della radiazione stessa.

Il primo problema (problema dell'orizzonte) è che nei modelli standard del big bang due regioni di cielo sufficientemente lontane fra loro (ad una distanza angolare superiore a circa un grado) non possono essere entrate in contatto fra loro prima dell'epoca alla quale la radiazione di fondo è stata emessa, per cui non possono aver raggiunto un equilibrio termico alla medesima temperatura; sarebbe quindi logico attendersi disomogeneità molto più accentuate nella radiazione che osserviamo.

Il secondo problema è che nella teoria originale del big bang le fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo sono molto più piccole di quanto sarebbe necessario per spiegare la formazione delle galassie in un tempo più breve dell'età dell'Universo.

Per risolvere il problema dell'orizzonte è stata introdotta un'idea teorica nota come *inflazione*, secondo la quale subito dopo il Big Bang l'universo avrebbe attraversato una fase di espansione estremamente accelerata; due regioni di cielo estremamente lontane fra loro potrebbero quindi essere state in contatto (ed avere avuto il tempo di entrare in equilibrio termico) prima dell'inflazione.

Per quel che riguarda la crescita delle fluttuazioni fino a formare le galassie, la soluzione comunemente accettata è che esista la cosiddetta *materia oscura*, ovvero una forma di materia che non abbiamo ancora osservato in quanto sarebbe elettricamente neutra (e quindi non sarebbe in grado di emettere od assorbire luce); la fisica delle

particelle fornisce diversi tipi di particelle di cui la materia oscura potrebbe essere costituita, ad es. i neutrini, o più probabilmente i cosiddetti WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*, particelle massive debolmente interagenti). Poiché la materia oscura non sarebbe influenzata dalla radiazione di fondo, essa ha potuto iniziare il suo collasso gravitazionale (dal quale sarebbero nate le galassie) molto prima della materia normale, eliminando quindi il problema del tempo di formazione delle galassie. Anche la materia oscura spiegherebbe diverse altre osservazioni, fra cui le misurazioni delle curve di rotazione delle galassie, che furono il motivo per cui fu originariamente introdotta.

Inflazione e materia oscura sono ormai entrate a far parte del cosiddetto *modello standard* della cosmologia, ovvero il modello accettato dalla maggior parte della comunità scientifica. Tuttavia entrambe non sono ancora considerate dimostrate, anche se ci sono concrete speranze di poter giungere ad una scoperta decisiva (ad esempio l'individuazione della particella elementare che costituirebbe la materia oscura) in tempi non troppo lunghi.

Il problema forse più importante che affligge il modello del Big Bang è attualmente quello della cosiddetta *energia oscura*. Infatti alla fine degli anni Novanta alcune osservazioni compiute su supernovae hanno evidenziato che, contrariamente a quanto atteso, l'espansione dell'universo non sta rallentando, bensì accelerando. Per quanto la relatività generale fornisca un meccanismo (lo stesso che viene utilizzato da alcuni decenni per spiegare l'inflazione) attraverso il quale è possibile spiegare forme di energia che producono una sorta di gravità repulsiva, questa scoperta ha colto di sorpresa la maggior parte dei cosmologi.

Al momento attuale non esiste una teoria accettata che possa spiegare da cosa derivi l'energia (subito battezzata energia oscura) che sarebbe responsabile di questa accelerazione, e che sarebbe la forma dominante di energia nel nostro universo: infatti l'energia oscura costituirebbe il 73% dell'universo, la materia oscura il 23% e la materia barionica (elettroni, protoni, neutroni, ecc.) il 4%.

Si spera di poter distinguere fra i molti modelli teorici che si propongono di spiegare le proprietà dell'energia oscura (fra cui la cosiddetta quintessenza, il Chaplygin gas, i modelli DGP e KKLT e molti altri) attraverso la misura del parametro  $w$  (che caratterizza la relazione fra pressione e densità di energia dell'energia oscura,  $P = w\rho$ ). I modelli con  $w = -1$  differiscono qualitativamente da quelli con  $w < -1$ . Nei primi l'Universo si espanderebbe più rapidamente che nel caso senza energia oscura, ma l'espansione avverrebbe sempre a velocità finite. Nei secondi invece l'accelerazione dovuta all'energia fantasma (espressione che indica forme di energia oscura con  $w < -1$ ) sarebbe così forte che l'Universo finirebbe per morire nel cosiddetto *Big Rip*, (Grande Strappo), poiché l'espansione raggiungerebbe una velocità infinita. Le misure di  $w$  sono ancora più incerte di quelle riguardo all'energia oscura e al momento entrambe le possibilità sono compatibili con gli scarsi dati sperimentali disponibili.



### 3.3 Oltre la relatività generale

Non dobbiamo però dimenticare un dettaglio fondamentale: che il principio cosmologico non è un'evidenza scientifica, anzi, come già aveva fatto notare Hume nei *Dialoghi sulla religione naturale*, esso rappresenta una fortissima ipotesi metafisica.

Da un punto di vista cosmico l'umanità si situa in un solo punto dell'universo e in un solo istante della sua storia, e non ha modo di sapere come effettivamente l'universo si presenti in altri luoghi e tempi. Insomma, non dobbiamo dimenticarci che la cosmologia ha l'obiettivo di costruire un'intera geografia universale a partire da osservazioni fatte da un unico punto particolare.

Viene spontaneo, ad esempio, chiedersi che cosa succede se si lascia cadere il principio cosmologico, ad esempio abbandonando l'isotropia dello spazio, pur mantenendo il tempo cosmico e l'omogeneità della materia. La scelta non è fatta a caso: le osservazioni del satellite COBE hanno portato nel 1992 a quella che Stephen Hawking ha chiamato «la scoperta del secolo, e forse della storia», e cioè il fatto che la radiazione di fondo dell'universo non è appunto distribuita isotropicamente.

Un modo di abbandonare l'isotropia consiste nel supporre che l'universo abbia non soltanto un'espansione, ma anche una rotazione. Ebbene, dalle equazioni cosmologiche risulta allora che *un universo omogeneo e in rotazione a velocità costante non ha avuto inizio e non avrà fine*.

Quello che succede in questo universo in rotazione è che durante le fasi di espansione l'effetto centrifugo della rotazione diminuisce, e l'effetto centripeto della gravitazione prende il sopravvento: quest'ultima frena l'espansione, fino a che non riesce ad invertirla in una contrazione. Ma in un universo in contrazione l'effetto centripeto della gravitazione diminuisce, mentre l'effetto centrifugo della rotazione aumenta: quest'ultimo frena la contrazione, fino a che non riesce ad invertirla in una espansione. Dunque un universo omogeneo in rotazione è ciclico, e passa con continuità dall'espansione alla contrazione e viceversa.

Le osservazioni precedenti mostrano che il principio cosmologico, oltre ad essere soltanto un'ipotesi, è anche una condizione piuttosto stretta per l'inizio dell'universo: basta forzarlo un poco, ad esempio rendendo la costante di espansione dipendente dal tempo, o indebolirlo un poco, ad esempio inserendo una rotazione oltre all'espansione, per far scomparire il Big Bang, che risulta così essere una singolarità nella storia non solo dell'universo ma anche della cosmologia.

La teoria cosmologica standard accetta l'esistenza del Big Bang: benchè non immune da problemi e difetti, come abbiamo visto, essa permette di calcolare l'età dell'universo sulla base delle osservazioni astronomiche, che attualmente si stima sia intorno a 15 miliardi di anni.

Le osservazioni sperimentali non sono invece ancora in grado di decidere se, in base alla teoria standard, l'universo sia aperto o chiuso, e se quindi vada verso una fine oppure no. Per ora i dati sembrano lasciare aperte entrambe le possibilità, o meglio, sembra che l'universo sia piatto: in altre parole, che delle infinite possibili combinazioni di potenza

esplosiva iniziale e di densità di materia, si sia verificata proprio l'unica che porta ad un universo euclideo e separa gli universi sferici da quelli iperbolici.

Che l'universo abbia avuto un'origine è però più una verità di fede che una deduzione necessaria dai dati sperimentali, e il fatto non è per nulla accettato da tutti i cosmologi, benchè esso rappresenti in qualche modo l'ortodossia scientifica. Il dissidente storico è Fred Hoyle, autore di *La nuvola nera*. Egli ha proposto nel 1948 il modello stazionario, in cui l'universo si espande indefinitamente ed esponenzialmente, senza inizio nè fine, e la materia viene continuamente creata. Il modello fu messo temporaneamente in crisi nel 1965 dalla scoperta della radiazione di fondo dell'universo a microonde, che dovrebbe essere la traccia lasciata da un'esplosione primordiale.

Hoyle ha recentemente proposto un'edizione aggiornata e corretta della sua teoria, in cui fra l'altro la creazione di materia, invece di essere continua, avviene solo occasionalmente: ad esempio, nei quasar, o nelle violente e inspiegate esplosioni di raggi gamma che sono state osservate nell'universo. È rilevante notare che Hoyle ha espressamente dichiarato che il suo rifiuto della teoria standard ha radici ideologiche: il Big Bang gli sembra fornire un illecito supporto scientifico alla religione, che egli vede come «un disperato tentativo di trovare una via d'uscita dalla angosciante situazione in cui ci troviamo».

Motivi più profondi e generalizzati di dissidenza nascono non tanto dalla scelta del particolare modello cosmologico da adottare, quanto da obiezioni più radicali. Da un lato, il principio cosmologico reintroduce una nozione di tempo cosmico che sembra in aperto contrasto con lo spirito della teoria della relatività su cui si basano i modelli. Dall'altro lato, l'attuale teoria della gravitazione, codificata appunto nella relatività generale, non è proponibilmente definitiva, ed è in attesa di essere unificata con la teoria dell'elettromagnetismo e dei fenomeni nucleari e quantistici.

Una delle speranze che si ripongono nella futura teoria unificata è che determini univocamente la struttura dell'universo e della sua storia, e non lasci più aperte diverse possibilità. Già Einstein aveva espresso questa speranza, in seguito alla profusione dei modelli che risultarono compatibili con la relatività generale. Ed essa è oggi largamente condivisa, in particolare dai due più noti divulgatori scientifici del momento: Stephen Hawking, autore di *Dal big bang ai buchi neri*, e Roger Penrose, autore di *La mente nuova dell'imperatore* e di *La strada che porta alla realtà*.

In particolare, benchè Hawking e Penrose abbiano dimostrato nel 1970 che *le equazioni di campo della relatività generale, insieme ad alcune naturali ipotesi aggiuntive, implicano l'esistenza di un Big Bang*, entrambi ritengono che il loro risultato non sia altro che una prova dell'inadeguatezza della relatività generale e della necessità di una sua integrazione con la meccanica quantistica.

Nel 1983 Hawking ha appunto proposto, insieme a Jim Hartle, una teoria unificata in cui lo spazio-tempo è finito ma illimitato, e dunque senza inizio. Anzi, poichè il modello prevede la sostituzione del tempo fisico  $t$  con un tempo immaginario  $it$ , la peculiarità del tempo rispetto allo spazio svanisce, e l'universo di Hartle e Hawking non diviene ma semplicemente è.

In conclusione, per determinare quale universo sia quello reale, fra i tanti possibili,

nè la rivelazione nè la ragione sono sufficienti, ma è necessaria l'osservazione.

Poichè però il percorso di affinamento del pensiero non è certo concluso, altrettanto si può immaginare per il problema della natura spazio-temporale dell'universo: infatti *soltanto il dieci per cento della massa calcolata dell'universo è visibile*, mentre il rimanente novanta per cento non si sa dove sia: essa è trasparente ai mezzi ottici e radio, e la sua presenza è dedotta solo da effetti gravitazionali. Ipotesi contrapposte ritengono che questa massa oscura sia concentrata in massicci buchi neri, o dispersa sotto forma di neutrini, in entrambi i casi prodotti dall'esplosione iniziale.

Analogamente, non si sa dove sia finita l'antimateria che, presumibilmente, era presente in quantità pari alla materia agli inizi dell'universo. Una ipotesi possibile è che, così come le galassie quali la nostra sono costituite di sola materia, altre galassie siano invece costituite da sola antimateria: il che introdurrebbe però un nuovo problema, cioè la spiegazione di questa separazione.

# Capitolo 4

## Dio gioca a dadi

Le teorie fin qui viste presentavano molteplici aspetti innovativi rispetto alla concezione meccanicistica. Esse conservavano tuttavia un carattere che era stato considerato, fin dai tempi dell'aristotelismo, l'essenza stessa della scienza: tali teorie si fondavano cioè sulla convinzione che la natura fosse retta da leggi rigorose, deterministiche, universali. La scienza doveva quindi innanzitutto caratterizzarsi per la ricerca di un determinismo negli eventi naturali.

Nel Novecento la *meccanica quantistica* mette in discussione anche questo pilastro rimasto saldo per millenni, proponendo una scienza che si occupa di corpi che non sembrano essere soggetti al determinismo e non sembrano obbedire a leggi rigorose. L'elaborazione di questa nuova teoria apparve a molti una inaccettabile rottura con la fisica tradizionale, assai più grave di quella prodotta con la relatività einsteiniana. Proprio Einstein, infatti, fu un suo critico tenace, e non accettò mai il suo aspetto probabilistico: in una lettera del 1926 a Niels Bohr a questo proposito scrisse «*Non posso credere che Dio giochi a dadi*».

### 4.1 I modelli atomici

Ancora alla fine dell'Ottocento, l'atomo era considerato una costruzione del pensiero, una convenzione utile a organizzare un gran numero di dati sperimentali, soprattutto in chimica, tuttavia pochissimi scienziati erano disposti ad ammettere che a tale concetto corrispondesse una realtà oggettiva. Nel 1808, John Dalton spiegò i fenomeni chimici secondo i quali le sostanze sono formate dai loro componenti secondo rapporti ben precisi fra numeri interi, ipotizzando che la materia fosse costituita da atomi. Nel corso dei suoi studi Dalton si avvale delle conoscenze chimiche che possedeva (la legge della conservazione della massa e la legge delle proporzioni definite) e formulò la sua teoria atomica, che partiva dal presupposto che la materia fosse formata da particelle elementari, chiamate atomi, indivisibili e indistruttibili.

Con la scoperta della radioattività naturale, si intuì successivamente che gli atomi non erano particelle indivisibili, bensì erano oggetti composti da parti più piccole. Nel 1902, Joseph John Thomson propose il primo modello fisico dell'atomo: aveva infatti scoperto

un anno prima l'elettrone. Egli immaginò che un atomo fosse costituito da una sfera di materia caricata positivamente (protoni e neutroni non erano stati ancora scoperti) in cui gli elettroni – negativi – erano immersi.

Nel 1911, Ernest Rutherford fece un esperimento cruciale per mettere alla prova il modello di Thomson. Bombardò un sottilissimo foglio di oro, posto fra una sorgente di particella alfa. Le particelle, passate attraverso la lamina, sarebbero rimaste impresse sullo schermo. L'esperimento portò alla constatazione che i raggi alfa non venivano quasi mai deviati. Sulla base di questo fondamentale esperimento, Rutherford propose un modello di atomo in cui quasi tutta la massa dell'atomo fosse concentrata in una porzione molto piccola, il nucleo (caricato positivamente) e gli elettroni gli ruotassero attorno così come i pianeti ruotano attorno al sole (modello planetario). L'atomo era comunque largamente composto da spazio vuoto, e questo spiega il perché del passaggio della maggior parte delle particelle alfa attraverso la lamina. Nel modello atomico di Rutherford non compaiono i neutroni, perché queste particelle furono successivamente scoperte da Chadwick nel 1932.

Il modello di Rutherford aveva incontrato una palese contraddizione con le leggi della fisica classica: secondo la teoria elettromagnetica una carica che subisce una accelerazione emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. Per questo motivo, gli elettroni dell'atomo di Rutherford, che si muovono di moto circolare intorno a nucleo, avrebbero dovuto emettere onde elettromagnetiche e quindi, perdendo energia, annichilire nel nucleo stesso, cosa che evidentemente non accade. Inoltre un elettrone, nel perdere energia, potrebbe emettere onde elettromagnetiche di qualsiasi lunghezza d'onda, operazione preclusa nella teoria e nella pratica dagli studi sul corpo nero di Max Planck e, successivamente, di Albert Einstein. Ciò portò i fisici a introdurre una nuova e rivoluzionaria teoria: la quantizzazione dell'energia.

#### 4.1.1 L'atomo di Bohr

Nel 1913, Niels Bohr propose un modello che superava alcune di queste difficoltà pagando, però, un prezzo altissimo: fu necessario ipotizzare che *i corpuscoli in movimento all'interno dell'atomo non obbedissero a tutte le leggi della fisica classica*. Pur accettando l'idea del modello planetario, postulò che gli elettroni avessero a disposizione orbite fisse nelle quali non emettevano né assorbivano energia (questa infatti rimaneva costante): in particolare, un elettrone emetteva od assorbiva energia sotto forma di onde elettromagnetiche solo se effettuava una transizione da un'orbita all'altra, e quindi passava ad uno stato a energia minore o maggiore. Questo passaggio è caratterizzato da una sostanziale discontinuità: l'elettrone, infatti, può passare da un'orbita stazionaria all'altra, ma non collocarsi in modo stabile nelle orbite intermedie; esso «scompare» da un'orbita e «riappare» in un'altra. Inoltre, quando un elettrone si muove su un'orbita che gli è permessa non emette radiazione elettromagnetica, come vorrebbero le equazioni di Maxwell, perché altrimenti, perdendo continuamente energia sotto forma di radiazione, l'atomo non risulterebbe stabile.

Fu abbandonato il concetto di orbita e fu introdotto il concetto di orbitale. Secondo la meccanica quantistica non ha più senso infatti parlare di traiettoria di una particella:

da ciò discende che non si può neanche definire con certezza dove un elettrone si trova in un dato momento. Ciò che si poteva conoscere era la probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto dello spazio in un dato istante di tempo. Un orbitale quindi non è una traiettoria su cui un elettrone (secondo le idee della fisica classica) poteva muoversi, bensì una porzione di spazio intorno al nucleo definita da una *superficie di equiprobabilità*, ossia entro la quale c'è il 95% della probabilità che un elettrone vi si trovi. In termini prettamente matematici un orbitale è definito da una particolare funzione d'onda, l'equazione di Schrödinger, in tre variabili, i numeri quantici, ciascuna delle quali è associata rispettivamente all'energia, alla forma e all'orientamento nello spazio dell'orbitale.

Nel modello di Bohr l'energia degli elettroni non può quindi variare con continuità, cioè per aggiunta o per sottrazione di quantità di energia infinitesimale; essa può cambiare solo per scalini, per salti, per pacchetti di energia non divisibili: i quanti. La quantizzazione dell'energia rappresenta una rottura con la millenaria convinzione circa la sostanziale *continuità* dei processi naturali. L'antica massima secondo cui «la natura non fa salti» è violata dal comportamento dell'elettrone che muta il proprio stato con repentine discontinuità.

## 4.2 La meccanica quantistica

Pur problematico dal punto di vista della rappresentazione concettuale, il modello di Bohr rimase il punto di riferimento fondamentale per gli studi sui modelli atomici per circa un decennio, dando origine a quella che viene chiamata *vecchia meccanica quantistica*. La nuova meccanica viene elaborata da diversi studiosi, come de Broglie, Heisenberg, Born, Bohr, Schrödinger, scienziati che partivano da prospettive profondamente diverse tra di loro. I fondamenti teorici elaborati in quegli anni hanno rappresentato il pilastro su cui è stata costruita tutta la fisica atomica del Novecento. La nuova meccanica quantistica suscitò un dibattito scientifico e filosofico amplissimo, in quanto rivoluzionava le concezioni scientifiche, ma anche del senso comune, consolidate da secoli.

### 4.2.1 La fine del determinismo

La teoria quantistica non è in grado di determinare con precisione il comportamento di una particella atomica, descritto da una *funzione d'onda*: essa può soltanto effettuare una *previsione statistica* circa il movimento in determinate condizioni. L'elettrone quindi sembra non essere soggetto a leggi deterministiche, appare dotato di una sorta di capacità di scelta tra vari percorsi possibili.

Cadeva così l'idea di una legge che è scientifica in quanto non ammette eccezioni. Proprio per questo motivo, grandi scienziati come Einstein, Schrödinger e Plank si rifiutarono di ammettere che la nuova fisica fosse una teoria scientifica completa, definitiva, non superabile da una ulteriore teoria atomistica capace di ripristinare il determinismo degli eventi naturali.

Per Heisenberg i problemi interpretativi che si associavano alla meccanica quantistica dipendevano dall'abitudine ad usare immagini e analogie ricavate dal mondo dell'espe-

rienza macroscopica per rappresentare oggetti del mondo atomico. Dal punto di vista scientifico, cioè, non ha alcun senso parlare di grandezza o di forma delle orbite quando queste non sono date nella comune esperienza dei sensi. Meglio allora rinunciare a ogni visualizzazione, a ogni rappresentazione analogica degli oggetti atomici, per limitarsi a trattare teoricamente solo quei dati che l'esperienza ci consente di raccogliere.

Nella meccanica classica è possibile prevedere il comportamento futuro di un corpo se si conoscono in un dato istante due informazioni del suo stato, cioè due coordinate canoniche. Le più semplici fra queste coppie di coordinate sono la posizione e la velocità. Nelle esperienze che riguardano gli oggetti macroscopici si era sempre ammesso che fosse possibile raccogliere dati circa le coordinate canoniche senza perturbare lo stato degli oggetti esaminati: si ammetteva ad esempio che si potesse calcolare in un certo istante la posizione e la velocità di un corpo, con precisione grande a piacere, senza alterare il suo movimento.

Prendendo in esame i dati sulla struttura dell'atomo accumulati dalle esperienze degli scienziati che lo avevano preceduto, Heisenberg giunse a formulare il *principio di indeterminazione*: se invece di considerare un corpo macroscopico si considera un oggetto atomico non è possibile misurare, con precisione grande a piacere, le coordinate canoniche dell'oggetto.

Nel caso di un elettrone in movimento, i tentativi di misurarne posizione o velocità alterano inevitabilmente il suo stato di moto, a causa della quantizzazione dell'energia tanto delle particelle quanto delle radiazioni luminose, quantizzazione che impedisce che si possa rendere piccolo a piacere il disturbo prodotto dalla interazione fra particella e apparato di misura.

Questa perturbazione avviene in modo tale che, se si cerca di diminuire l'incertezza della misurazione di una delle due coordinate, si interagisce con l'elettrone in maniera da aumentare l'incertezza con la quale si può misurare l'altra coordinata. La precisione nella misurazione di una coordinata canonica va necessariamente a discapito della precisione nella misurazione dell'altra.

Questa conclusione condusse Heisenberg a enunciare il suo principio: nella misura delle coordinate canoniche di un oggetto atomico l'incertezza dei risultati di misura non si può rendere piccola a piacere. Non è possibile conoscere contemporaneamente con precisione assoluta i valori delle due coordinate canoniche.

Il principio di indeterminazione spiega, secondo Heisenberg, la *natura statistica* della nuova teoria. Infatti, se non siamo in grado di avere informazioni precise sullo stato di un oggetto, non potremo neppure fare previsioni precise sul suo comportamento futuro. La meccanica classica compie previsioni deterministiche solo a patto che siano disponibili informazioni sui valori delle coordinate canoniche dell'oggetto in esame. Il principio di indeterminazione invece esclude che si possa prevedere con precisione il comportamento di un oggetto.

Dunque è l'interazione tra oggetto e apparato di osservazione a generare il comportamento apparentemente indeterministico degli oggetti microscopici. Sarebbe però insensato, dice Heisenberg, chiedersi come si comportino questi oggetti quando nessuno li osserva, quando nessuno strumento li disturba. Non ha senso, cioè, chiedersi se in

realtà il loro comportamento è di tipo deterministico oppure no, in quanto è evidente che lo scienziato non ha nulla da dire circa quello che fa la natura quando nessuno la osserva.

#### 4.2.2 Onda e corpuscolo

Strettamente connesso al principio di indeterminazione è un altro aspetto della meccanica quantistica sul quale si concentrò la discussione scientifica e filosofica: il *dualismo onda-corpuscolo*. Secondo la fisica classica un'onda è radicalmente differente da un corpuscolo e da sempre i concetti fondati sulla nozione di onda erano stati distinti da quelli fondati sulla teoria corpuscolare.

Cominciò a porre in discussione questa dicotomia Einstein, esponendo una teoria della luce, per la spiegazione dell'effetto fotoelettrico, nella quale il raggio luminoso è considerato come un treno di fotoni. In quel periodo era universalmente accettata la visione ondulatoria della luce imperniata sulla teoria di Maxwell, che identificava la radiazione luminosa con un'onda che si propaga in un campo elettromagnetico. Ma ora era necessario che la luce non fosse considerata un fenomeno ondulatorio ma un insieme di corpuscoli luminosi. Einstein aveva così introdotto una evidente anomalia.

La contraddizione si allargò quando de Broglie propose di risolvere i problemi del modello atomico di Bohr immaginando che se le onde luminose si comportano a volte come particelle allora anche le particelle devono comportarsi a volte come onde. De Broglie avanzò l'ipotesi che all'elettrone rotante fosse associata un'onda che si propagava lungo un'orbita. Dopo alcuni tentativi di intendere l'elettrone come se fosse un fenomeno puramente ondulatorio divenne chiaro che il concetto di onda non poteva sostituire completamente quello di corpuscolo, che l'elettrone, come la luce, richiedeva per la propria comprensione *entrambe* le concezioni: in determinate circostanze esso sembrava presentarsi come un perfetto corpuscolo, in altre manifesta indubbi caratteri ondulatori.

Nel 1927 Bohr enunciò il *principio di complementarità*: i concetti di onda e corpuscolo sono entrambi necessari se si vuole comprendere la totalità delle manifestazioni degli oggetti atomici, ma il loro uso conduce a contraddizioni poichè l'esperienza dimostra che i due concetti non devono mai venire impiegati contemporaneamente nella descrizione dello stesso esperimento. Negli esperimenti in cui prevalgono i caratteri ondulatori delle particelle quelli corpuscolari sono trascurabili, e viceversa. Da un lato dunque i due concetti di onda e corpuscolo sono entrambi necessari per spiegare i fenomeni atomici, dall'altro si escludono reciprocamente nella comprensione di una singola esperienza.

Questa visione degli oggetti atomici rompe radicalmente con la nozione di oggetto propria della fisica classica e del senso comune, per i quali risulta incomprensibile la natura duplice delle particelle. Questa duplicità venne ricondotta da Bohr al principio di indeterminazione: in ogni esperienza sugli oggetti atomici ha luogo una interazione tra soggetto e strumento di misura che altera lo stato dell'oggetto. Questo spiega la diversità di comportamento che si rileva nei diversi apparati sperimentali.



## La scienza della palude

Abbiamo visto come l'immagine della scienza sia cambiata a partire dalla metà dell'Ottocento. Sono entrati in crisi i fondamenti della matematica, la geometria euclidea, lo spazio, il tempo, il modello meccanicistico; è entrato in crisi insomma un sistema di riferimento e di organizzazione del sapere secolare. Il nuovo modello di scienza ha rivalutato le funzioni del soggetto, il concetto di certezza scientifica, e la nozione di relatività della teoria.

Cartesio sosteneva la necessità di costruire la scienza sulla roccia, ne *La gaia scienza* Nietzsche, rivolgendosi agli uomini della conoscenza, scrive: «*Costruite la vostra città sul Vesuvio*». Un grande epistemologo contemporaneo come Popper, che legge Nietzsche e lo cita nel suo *La società aperta* scrive: «La scienza è costruita sulle palafitte che affondano nella sabbia mobile della palude». Costruire la casa della scienza su un terreno vulcanico significa non esser sicuri che sia robusta, forte, stabile, ma pensare che sia destinata, prima o poi, a franare. Da qui deriva, ancora una volta, lo scardinamento totale della fisica classica o matematica, che pretendeva di esprimersi con proposizioni universali ed oggettive: Nietzsche anticipa, in questo senso, il crollo di alcuni punti fissi della fisica classica.

Anche Kant si era accorto, nella *Critica della ragion pura* che le cosiddette scienze della natura organica non sono assolutamente riducibili allo stesso statuto epistemologico cui sono ridotte le scienze della natura inorganica. Lo stesso Kant avverte, quindi, la crisi del modello meccanicistico della scienza, e Nietzsche, che legge la *Critica del Giudizio*, avverte la crisi di tale visione del mondo.

### 5.1 La perdita della certezza: Popper

Karl Popper è uno dei più importanti filosofi della scienza dell'età contemporanea. Severo critico della metodologia neopositivistica, incentrata sul principio della verifica e sull'accettazione dei processi induttivi, Popper propone il metodo di falsificazione come modello dell'impresa scientifica e come paradigma di discussione e confronto per tutte le scienze.

La ricerca scientifica, secondo Popper, non va in cerca di verificazioni, bensì di prove cruciali in grado di confutare la teoria sotto esame. Compito dello scienziato allora non è trasformare le proprie idee in verità dimostrate, ma considerarle come ipotesi, come *congetture* sempre e comunque *falsificabili*, ossia considerate valide fino a quando non vengano smentite.

Il bersaglio polemico di Popper è la fiducia dei neopositivisti di poter caratterizzare le scienze mediante l'uso di metodi induttivi. Per i neopositivisti, l'induzione è la via che consente di stabilire empiricamente la verità della scienza: se non fosse possibile alcun principio di induzione, crollerebbe l'idea di verità scientifica e «*la scienza non avrebbe più il diritto di distinguere le sue teorie dalle creazioni fantastiche della mente del poeta*» (Reichenbach).

Secondo Popper, invece, *l'induzione non esiste*, non è cioè logicamente giustificato inferire asserzioni universali da asserzioni singolari, per quanto numerose siano queste ultime. Una volta ammessa l'inesistenza di procedure induttive che consentano di stabilire la verità di ipotesi e teorie, mediante l'impiego di proposizioni empiriche che descrivono eventi singoli, *va lasciata cadere anche la pretesa di poter attribuire alle affermazioni scientifiche una verità stabilita una volta per tutte tramite l'esperienza*. La scienza non è verificabile empiricamente: risulta da respingere la proposta neopositivistica di distinguere la scienza dalla metafisica, caratterizzando la prima come l'insieme delle proposizioni empiricamente verificabili.

Il rapporto fra teoria ed esperienza deve essere posto invece in una prospettiva migliore, cioè la *prospettiva falsificazionista*. Infatti, mentre le asserzioni universali non sono verificabili da un numero comunque grande di asserzioni singolari, è sufficiente una sola asserzione singolare per falsificarle. Se la verifica empirica è impossibile, la falsificazione tramite l'esperienza è invece possibile. La scienza dunque è *l'insieme delle proposizioni falsificabili*.

Quindi l'esperienza non ci può dire come è fatto il mondo, ma almeno ci può inviare segnali chiari su come il mondo non è. Tuttavia, la perdita della certezza non riguarda solo le procedure di verifica, ma investe anche quelle di falsificazione. È vero infatti che basta una sola osservazione per falsificare un'ipotesi, ma per poter applicare lo schema con sicurezza occorre un'osservazione sicura. Se il risultato di ogni esperimento è sempre dipendente da presupposti teorici, se non esiste quell'affidabile mondo di fatti in cui riponevano la loro fiducia i positivisti, se le evidenze empiriche sono sempre problematiche, cariche a loro volta di ipoteticità, allora non solo non è possibile verificare un'ipotesi attraverso l'esperienza, ma *non è neppure possibile falsificarla senza far intervenire altre ipotesi*. Vale a dire che anche le procedure di falsificazione non sono mai certe, conclusive. Oltre che la verità, neppure la falsità di un'ipotesi può ritenersi certa.

La base empirica della scienza, quindi, non è garantita per sempre, ma è destinata a mutare con il progredire delle ricerche, è una base perennemente incerta e in mutamento. La scienza, scrive Popper, «non posa su un solido strato di roccia. L'ardita struttura delle sue teorie si eleva, per così dire, su una *palude*. È come un edificio costruito su palafitte. Le palafitte vengono conficcate dall'alto, giù nella palude: ma non in una base naturale o data; è il fatto che desistiamo dai nostri tentativi di conficcarle più a fondo

non significa che abbiamo trovato un terreno solido. Semplicemente ci fermiamo quando siamo soddisfatti e riteniamo che almeno per il momento i sostegni siano abbastanza stabili da sorreggere la struttura».

Va però notato che l'approccio falsificazionista non esclude affatto che esistano verità scientifiche. Esso richiede, anzi, una *nozione di verità oggettiva* come corrispondenza tra fatti e teorie: la nozione di falso non sarebbe comprensibile senza la nozione di vero.

Il falsificazionista, quindi, non nega che il compito della scienza sia la ricerca della verità, di teorie vere. *Egli nega che esista un criterio di riconoscimento della verità.* Ogni scienziato cerca sempre di costruire teorie vere, ma non sarà mai in grado di dimostrare che lo sono; egli potrà soltanto mostrare che le proprie teorie hanno superato positivamente severi tentativi di falsificazione. Il fatto che una data ipotesi abbia superato questi controlli è un segnale della possibile verità, ma non abbiamo modo di dimostrare che le cose stiano proprio così.

# Bibliografia

- [1] ROGER PENROSE, *The road to reality*, Jonathan Cape, 2004.
- [2] Appunti di fisica del Prof. Rodolfo Guidotti e del Prof. Marco Turrini.
- [3] GALILEO GALILEI, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*.
- [4] PIERGIORGIO ODIFREDDI, *Il Vangelo secondo la scienza*, Einaudi, 1999.
- [5] PIERGIORGIO ODIFREDDI, *Culture: una, nessuna o centomila?*, 1997, <http://www.vialattea.net/odifreddi/culture.htm>.
- [6] Appunti di meccanica quantistica e astrofisica della Prof.ssa Caterina Bortolani.
- [7] Appunti di filosofia della Prof.ssa Marisa Zanon.
- [8] CIOFFI, LUPPI, VIGORELLI, ZANETTE, BIANCHI, DE PASQUALE, *I filosofi e le idee*, Mondadori, 2004.
- [9] KATJA GALIMBERTI, *Nietzsche: una guida*, Feltrinelli, 2000.
- [10] Intervista a ANTIMO NEGRI, *La sentenza di Nietzsche: Non fatti ma interpretazioni*, 1944, <http://www.emsf.rai.it/interviste/interviste.asp?d=489>.

Sono state incluse, in particolare nell'ultimo capitolo, anche riflessioni personali suscitate dalla lettura dei testi indicati nella bibliografia oppure da confronti con i docenti.

*Stampato il 15 giugno 2008*