

CAPITOLO SECONDO

Molto rumore per nulla: come le leggi possono nascere dal Nulla

Il nulla è straordinariamente fecondo. Nell'infinito spaziare del nulla potenzialmente si trova tutto, ma è un tutto sospeso, ancora lontanissimo dalla realizzazione. Naturalmente queste affermazioni sono enigmatiche di proposito, perché al momento quello che mi interessa è catturare il vostro sguardo e stuzzicare la vostra curiosità. C'è forse un richiamo alla filosofia induista, secondo cui l'essere è l'assenza del non essere: definizione incontestabile, ma insoddisfacente. Per non incorrere nello stesso tranello, elaborerò queste affermazioni per illustrare la potenza fruttifera del nulla, mostrando che contemplarlo non è un esercizio futile, più vicino alla teologia che alla fisica; dimostrerò che, nell'ambito della scienza, dal nulla si possono trarre conclusioni verificabili, e proverò a convincervi che si può risolvere questo enigma e trovarvi un contenuto significativo. Desidero individuare nel

nulla l'idea centrale, su cui si basa ogni possibilità di capire le leggi della natura, e quindi tutti gli enti che esistono e agiscono su altri enti. In breve, voglio mostrare che il nulla è il fondamento di tutto.

Per portarvi a capire il nulla assoluto e le sue conseguenze, e aiutarvi a riconoscere il notevole ruolo della pigrizia nel creare l'infrastruttura meccanicistica del mondo, come prima cosa vorrei che concepiate il nulla in maniera del tutto arcaica e intuitiva. A tempo debito bisognerà passare a una visione più sofisticata, ma per l'inizio del nostro viaggio andrà benissimo immaginare il nulla come uno spazio vuoto. Fino a che non darò indicazioni diverse, rilassatevi e immaginate chilometri e chilometri di spazio uniformemente vuoto, e anni e anni di un tempo che si estende dall'epoca più remota a un futuro inimmaginabile. Pensate a un vuoto uniforme e senza tempo, che riempie ogni luogo e ogni istante.

In questa immagine piatta di una desolazione spaziale e temporale devo far entrare un'unica figura. La matematica tedesca Emmy Noether (1882-1935), straordinaria e piena d'immaginazione, nacque a Erlangen, studiò a Gottinga (risentendo della misoginia dell'epoca) e in seguito si rifugiò al Bryn Mawr College in Pennsylvania per sfuggire alla persecuzione nazista. Lì morì fin troppo giovane, lasciando una copiosa eredità di teoremi e concetti matematici astratti. Noether è considerata «la più grande matematica mai vissuta» (come disse nel 1935 Norbert Wiener, anch'egli matematico di rilievo); anche Einstein ne era affascinato. La sua

figura è assolutamente essenziale per il mio ragionamento, e per la fisica teorica, grazie a un teorema che lei elaborò nel 1915 e che pubblicò un paio d'anni dopo. Ovviamente qui non posso ripercorrerne i dettagli tecnici, ma la conclusione è semplicissima. Noether ha stabilito che *ogni simmetria è associata a una corrispondente legge di conservazione*¹. Elaborerò ora questo risultato e spiegherò cosa sono le leggi di conservazione, le simmetrie e il legame tra i due concetti individuato da Noether.

Si chiama *legge di conservazione* una legge della natura secondo cui nonostante il verificarsi di vari eventi, una certa quantità rimane invariata (ovvero «si conserva»). Ho già citato una legge del genere, la conservazione dell'energia; inizierò riesaminandola anche qui.

Che cos'è l'energia

L'energia è uno di quei concetti che, pur citati in lungo e in largo nel linguaggio quotidiano, rimangono difficili da identificare e definire con precisione. Ciascuno di noi compra molta energia, ma faticherebbe a esprimere cos'è che ha comprato. Il termine è entrato nella fisica a inizio Ottocento; risultò così utile che si diffuse in tutta la scienza, spodestando ragionamenti come quelli di Newton che si concentravano sul concetto, più tangibile, di *forza*. Quando comparve l'idea di energia, la sua efficacia colpì tutti a tal punto che si arrivò a riscrivere interi libri di testo. La forza è quasi letteral-

mente tangibile; l'energia invece è astratta. È proprio questa l'origine della sua importanza, perché in genere i concetti astratti hanno un'applicabilità più ampia rispetto a quelli concreti. I concetti astratti sono lo scheletro teorico che si può rimpolpare con varie osservazioni differenti; i concetti concreti sono come isole intellettuali.

La radice etimologica della parola *energia* ne suggerisce il significato: essa deriva da termini greci per «lavoro dentro». L'energia è la capacità di compiere lavoro. Forse questa definizione «operativa» non farà capire molto cos'è davvero l'energia, ma permette almeno di identificarla: il lavoro è facilmente riconoscibile perché ci riporta al concetto tangibile di forza. Il lavoro è ciò che si compie quando si realizza un movimento opponendosi a una forza contraria, per esempio sollevando un peso contro l'azione della gravità, o sfruttando una batteria per far circolare la corrente in un circuito elettrico. Maggiore è l'energia disponibile, maggiore è la quantità di lavoro che si può compiere. Una molla compressa racchiude più energia di una a riposo: soltanto la prima può compiere lavoro. Un serbatoio pieno d'acqua contiene più energia quando la temperatura del liquido è maggiore. Si potrebbe escogitare una sorta di macchina che compia lavoro sfruttando l'energia presente nell'acqua calda, ma non dopo che l'acqua si è raffreddata.

Esistono vari tipi di energia. Alcuni esempi sono l'energia cinetica, cioè quella dovuta al moto, per esempio nel movimento di una palla; l'energia potenziale, relativa alla posizione, come quella legata

all'attrazione gravitazionale che la Terra esercita su qualsiasi corpo; l'energia radiante, quella trasportata dalle radiazioni, come il calore emesso dal Sole che arriva fino a noi e alimenta la fotosintesi: alla cascata delle sue conseguenze diamo il nome di *biosfera*². È possibile convertire ogni tipo di energia in qualsiasi altro tipo. Sembra però che la seguente sia una legge inviolabile della natura: *la quantità totale di energia nell'universo è costante*. Se diminuisce la quantità di energia di un certo tipo, quell'energia deve ritrovarsi magari sotto un altro aspetto, o nella stessa forma in un luogo diverso. Un esempio familiare di questa conservazione è il lancio in aria di una palla. Subito dopo il lancio, la palla ha molta energia cinetica; mentre si innalza sempre più vincendo l'attrazione della gravità, la sua energia potenziale aumenta e quella cinetica diminuisce. Al vertice della traiettoria la palla è stazionaria per un istante; a quel punto la sua energia cinetica è nulla, e tutta l'energia che aveva all'inizio si ritrova sotto forma di energia potenziale. Mentre ricade verso la Terra, accelerando via via, la sua energia potenziale diminuisce e quella cinetica aumenta. In ogni fase della traiettoria, dall'inizio alla fine, rimane costante l'energia totale della palla, cioè la somma della sua energia cinetica e potenziale. La legge di conservazione dell'energia riassume questo fatto stabilendo che *l'energia non può essere creata né distrutta*.

Nel primo capitolo ho accennato che la legge di conservazione dell'energia è potentissima, tanto che ha consentito di prevedere l'esistenza di nuove particelle fondamentali, grazie al rilevamento

di fenomeni che sembravano violare quella legge. Niels Bohr (1885-1962), fisico teorico danese che ha formulato una delle prime versioni della meccanica quantistica, riflettendo su alcune osservazioni bizzarre in certi processi nucleari studiati da poco si era chiesto se non violassero la legge di conservazione. La realtà era diversa: una parte dell'energia era trasportata da una particella ancora sconosciuta, il *neutrino*, la «piccola particella neutra». L'esistenza dei neutrini fu ipotizzata da Wolfgang Pauli nel 1930; furono cercati e infine osservati in un esperimento³ svolto nel 1956. In base a questo episodio, la legge fa pensare all'atteggiamento di David Hume verso i miracoli: non fidarsi della persona che li riferisce è più ragionevole che credere a quanto riferito. Gli scienziati possono quindi opporre un estremo scetticismo a qualsiasi presunta smentita della conservazione dell'energia. Come in questo caso, la legge è stata messa in discussione, sottoposta a nuove analisi e riconfermata. Ovviamente non è inconcepibile che in recessi inesplorati del cosmo si nascondano draghi, e che la legge sia violata da eventi ancora sconosciuti.

A tempo debito, per essere precisi nell'ottavo capitolo, ritornerò su questa eventualità a proposito del principio di Heisenberg, che rappresenta una grande chiarificazione nel pensiero umano ma è spesso travisato: alcuni ritengono che permetta di aggirare la legge, dato che l'energia potrebbe fluttuare su scale temporali brevissime. Su dimensioni più vaste, e in maniera più convenzionale, la conservazione dell'energia implica l'impossibilità del

moto perpetuo, cioè vieta di compiere lavoro senza che si bruci carburante. Anzi, uno degli indizi a favore della legge è la mancata realizzazione del moto perpetuo, a dispetto di tentativi sempre più disperati. In effetti, malgrado quanto sostengano regolarmente vari ciarlatani, non si è mai realizzato il moto perpetuo, ormai ritenuto impossibile. Questa osservazione, in un certo senso equivalente ad abbandonare la chimera dell'energia infinita senza sforzi, cioè quella di ricchezze infinite, costituisce uno dei fondamenti di un grande gruppo di leggi naturali, i principi della termodinamica, su cui tornerò nel quinto capitolo. Come muli ingolositi da una carota, simbolo di una prospettiva di un'abbondante ricchezza, i successori di quei ciarlatani hanno insistito a presentare macchinari elaborati sostenendo che producano lavoro dal nulla, ma non hanno ottenuto altro che smascheramenti, derisione e una maggior fiducia nella legge. In una certa misura dovremmo essere grati a simili personaggi (e senz'altro ai loro omologhi che, faticando onestamente, si sono presi la briga di sconfessarne gli annunci menzogneri), perché il fallimento degli attacchi continui e aggressivi diretti alla legge ha rinforzato l'accettazione della sua validità.

Ci sono anche molti altri indizi a favore della legge, perché tutti i calcoli del moto delle particelle basati sulla meccanica newtoniana fanno affidamento sulla conservazione dell'energia, e certi casi che pure si discostano dalle previsioni di Newton si giustificano in maniera diversa, ben nota. Anche i calcoli della meccanica quantistica si basano sulla

conservazione dell'energia, e hanno sempre successo, cioè forniscono dati in accordo precisissimo con le osservazioni sperimentali. Rimangono scarse possibilità di dubitare che l'energia si conservi, e in maniera esatta.

La conservazione dell'energia è chiaramente di importanza enorme dal punto di vista tecnologico ed economico, e per risolvere gli esercizi nei libri di testo, ma in realtà è anche più importante di quanto potrebbe sembrare. Su di essa si basa la *causalità*, l'osservazione apparentemente innegabile che ogni evento è causato da un altro che l'ha preceduto. Senza la causalità, gli eventi sarebbero imperscrutabili e l'universo sarebbe un cumulo disordinato di fenomeni sconnessi. La causalità permette di capirci qualcosa, collegando le cause ai propri effetti e questi ultimi alle cause rispettive; essa dà modo di scoprire l'ordine e i comportamenti sistematici. Questi ultimi, espressi dalle leggi della natura, spianano la strada alla forma di comprensione rappresentata dalla scienza. La conservazione dell'energia svolge un ruolo centrale nella causalità imponendo vincoli fortissimi su cosa può avvenire: in ogni evento l'energia totale non può variare. Questa legge somiglia a una forza di polizia scrupolosa, vigile e incorruttibile: fa rispettare la legge che vincola l'energia a un valore singolo, fissato e presumibilmente invariabile in tutto l'universo. Se l'energia non si conservasse, ci sarebbero meno vincoli su quali azioni potrebbero essere causate da un evento precedente, e forse non avremmo affatto la causalità. È vero che esistono anche altri vincoli,

ma l'energia è così essenziale nei fenomeni fisici, e di applicabilità così generale, che la sua conservazione è di importanza suprema. Come ho osservato nel primo capitolo, questa legge è un'imperatrice, la matriarca delle leggi maggiori.

Perché l'energia si conserva

Dunque, come mai l'energia si conserva? Qual è l'origine di questa legge, la più imperiale di tutte? È qui che entra in gioco Noether, e con il suo teorema geniale getta luce sul vuoto desolato che vi ho chiesto di immaginare. Noether ha dimostrato che la conservazione di una certa grandezza deriva dalla simmetria di una grandezza connessa; il fatto cruciale è che la *conservazione dell'energia*, caso specifico di cui ci stiamo occupando ora, *deriva dall'uniformità del tempo*. Questa uniformità corrisponde alla «simmetria» rilevata dal teorema di Noether nel nostro contesto.

In pratica, che cosa significa questa uniformità? A prima vista, l'uniformità temporale significa semplicemente che si ottiene lo stesso risultato svolgendo un esperimento identico di lunedì o di giovedì (o in qualsiasi altro momento). In altri termini, il pendolo oscilla allo stesso modo e la palla segue la stessa traiettoria, mantenendo identiche tutte le condizioni dell'esperimento, a prescindere dall'istante in cui si osservano questi fenomeni. Per esprimere questa uniformità, questa indipendenza dal momento in cui si verificano le leggi della

natura, si dice che esse mostrano un'*invarianza temporale*. In pratica, data l'equazione che descrive un certo processo in un dato istante, ciò significa che la stessa equazione rimane valida in qualsiasi altro momento. In altri termini, le leggi della natura non cambiano con il tempo. Le loro *conseguenze* potrebbero cambiare: per esempio un pianeta potrebbe essersi lentamente spostato arrivando a seguire un'orbita appena diversa, o magari avrete lanciato la palla a velocità maggiore del previsto, ma le leggi stesse sono invarianti.

Ora andiamo oltre la prima impressione. Perché le leggi della natura mostrino l'invarianza temporale, *il tempo stesso deve progredire in maniera uniforme*. Non può cioè rallentare, poi accelerare, e inchiodarsi bruscamente un istante dopo. Immaginate che cosa succederebbe al volo di una palla o, su scale maggiori, all'orbita di un pianeta, se il tempo si comprimesse su parte della traiettoria e si dilatasse su un'altra parte: è difficile credere che saremmo riusciti a elaborare una teoria della dinamica del volo della palla, per esempio. La palla avrebbe dato l'impressione di accelerare, rallentare, fermarsi a mezz'aria senza l'intervento apparente di nessuna forza. Di lunedì avrebbe obbedito a una certa legge, di martedì a una legge diversa. Anche se il tempo non si fosse comportato in maniera caotica e imperscrutabile ma avesse oscillato con regolarità, con accorciamenti e allungamenti periodici, il volo della palla sarebbe stato un mistero, persino un Newton avrebbe avuto scarse possibilità di comprenderlo, e probabilmente la dinamica del

mondo sarebbe rimasta un fenomeno sconcertante. Perché le leggi della natura siano indipendenti dal momento in cui le si applica, il tempo deve scorrere in maniera uniforme: tic, tic, tic... e così via, a ritmo regolare e costante.

Prevedo alcune possibili obiezioni a questa giustificazione dell'uniformità del tempo. Una è che, durante il volo della palla, anche gli strumenti usati per studiare il tempo si allungherebbero e accorcerebbero in sincronia con esso. A quel punto la sua non uniformità potrebbe sfuggire al nostro esperimento, magari ci sarebbe proprio impossibile coglierla; in un modo o nell'altro la fisica degli strumenti di misura (inclusi gli occhi e le orecchie umani) varierebbe in sincronia rispetto al tempo, e rimarremmo ciechi e sordi davanti alla sua variazione. Penso di poter controbattere osservando che le equazioni da noi scritte e risolte per descrivere il moto non sono entità che si dilatano e restringono mentre le osserviamo (nel senso che il «tempo», il parametro con quel ruolo che vi compare, non varia in tale maniera); da questo punto di vista sono perciò una descrizione del moto oggettiva, non soggettiva. In effetti, benché l'inverso del teorema di Noether (che dalla conservazione di una certa proprietà deduce l'esistenza di una simmetria connessa) non sia a prova di bomba quanto la formulazione originale (secondo cui dall'esistenza di una simmetria deriva la conservazione di una grandezza connessa), si può inoltre sostenere che, sapendo che l'energia si conserva, possiamo cautamente dedurre che il tempo debba essere uniforme.

Potreste inoltre obiettare che, una volta salito sulle spalle di Newton, Einstein ebbe la visione di un cosmo in cui il tempo è distorto localmente (è questo il significato della relatività generale: essa riconosce che lo spaziotempo si distorce in presenza di oggetti massicci come i pianeti); a livello locale, perciò, il tempo non è uniforme, e il teorema di Noether non può affatto dire se l'energia si conserva. Questa è un'obiezione importante, e sollevandola siete in buona compagnia: anche David Hilbert (1862-1943), matematico tedesco straordinariamente profondo e autorevole, riteneva che andasse affrontata. Sembra anzi che proprio l'osservazione di Hilbert abbia spinto Noether a dimostrare il suo teorema; la studiosa ne uscì escogitando un teorema supplementare (*il secondo teorema di Noether*). Svicolerò dall'obiezione accampando due scuse (il che è sempre una strategia sospetta, nella scienza come nella vita: devo ammettere infatti che due scuse non fanno una spiegazione).

La cosa più importante è che, come nel teorema originale di Noether, mi limiterò ad applicare il suo ragionamento al caso globale, all'intero universo. Persino una volta che la materia si era formata e si era raggrumata in pianeti, sistemi solari e galassie, distorcendo lo spaziotempo nei loro paraggi, in complesso, a livello globale, c'era uniformità: le dilatazioni da una parte erano compensate altrove da accorciamenti. Visto nella sua interezza, lo spaziotempo, e la sua componente temporale, sono quasi certamente piatti. In secondo luogo, qualsiasi regione abbastanza piccola dello spaziotempo è

localmente piatta, e quindi vi si applica la conservazione dell'energia⁴.

Spero che ora accetterete, con cautela, che il tempo è uniforme su scala globale (e anche localmente, in regioni abbastanza piccole), e che perciò, di conseguenza (secondo il primo teorema di Noether), l'energia si conserva. Come ho osservato, se potessi tendere l'orecchio al passaggio del tempo, sentiremmo un perpetuo tic, tic, tic... Se invece avvertissimo un tic tic... tic... tic tic e così via, il tempo non sarebbe uniforme; di conseguenza l'energia non si conserverebbe, il mondo sarebbe incomprensibile e la scienza un'impresa vana.

Il tempo avanza in linea retta. O forse no...

Ma perché il tempo è uniforme? Qui, per la prima volta in questo capitolo, invocherò la pigrizia e la mia ipotesi che alla Creazione non sia successo granché. Bisogna ripensare al principio dell'universo, al momento della cosmogenesi, ma prima di arrivarci occorre fare piazza pulita di varie osservazioni preliminari, al solo scopo di sbarazzarcene prima che vi vengano in mente.

Prima di tutto, è concepibile che questo universo sia figlio di un universo precedente, che a sua volta potrebbe essere figlio di un universo «nonno», e così via a ritroso negli abissi del tempo. Ma moltissimo tempo fa ci deve essere stato un *Ur-universo*^{III}, chiamiamolo così, che emerse per primo dal nulla assoluto. L'universo attuale, il nostro,

potrebbe essere quell'Ur-universo, nato esso stesso dal nulla (e nel futuro potrebbe avere discendenti, anzi magari ne ha già avuti). Mi concentrerò sull'Ur-universo, che coincida con il nostro o con un suo antenato. In ogni caso, sembra che a un certo punto il nulla si sia trasformato in qualcosa, anche se ciò avvenne in un universo separato dal nostro da un certo numero di generazioni. Anche se il numero di generazioni è infinito, è comunque possibile che dalla nascita dell'Ur-universo sia trascorso un intervallo finito di tempo⁵. Qui ignoro una simile eventualità, visto che non ho indizi a favore o contro di essa, e che il mio intuito (comunque irrilevante) tace al proposito. Né il problema ha importanza per questo resoconto.

In secondo luogo, un'estrapolazione che risale tanto indietro nel tempo è magari semplicistica. È possibile che il tempo sia una grande circonferenza della vita, richiusa su sé stessa in maniera da non avere un inizio, come la superficie terrestre. In un futuro remoto arriverà forse un istante che si trova nel passato lontano, rispetto al nostro presente, che a quel punto si troverà situato nel futuro. Al momento la nostra esperienza riguarda qualche miliardo di anni, e ci siamo convinti che il tempo proceda essenzialmente in linea retta. Non abbiamo indizi a favore o contro la possibilità che quella linea retta rappresenti in realtà un piccolo frammento di una circonferenza più vasta. Attualmente va di moda prendere in giro i terrapiattisti, che non si accorgevano della curvatura terrestre; in futuro noi «tempopiattisti» forse subiremo la stessa sorte.

In breve, potrebbe essere ingenuo supporre che ci sia stato un inizio, comunque lo concepiamo. Anche qui il mio intuito irrilevante tace, e non posso fare altro che menzionare l'eventualità e passare oltre. Essa però esiste, malgrado l'assenza di indizi a suo favore, e potrebbe dimostrarsi un esempio di ciò a cui accennavo nel primo capitolo, cioè l'abilità della scienza di fare progressi dimostrando che un certo problema è privo di significato. In questo caso, se il tempo è circolare, non esisterebbe alcun inizio identificabile, perché dove mai ha inizio una circonferenza? L'indagine scientifica potrebbe allora rivendicare una sorta di vittoria di Pirro, sostenendo di aver eliminato l'enigma dell'inizio di tutto, perché il tutto non ebbe inizio. In altri termini: il suo inizio è nella sua fine.

La circolarità del tempo non è l'unico problema possibile. A tempi brevissimi dopo la nascita dell'universo, Ur- o meno, e anche oggi se l'analisi è abbastanza accurata, il concetto di tempo rischia di andare in pezzi. Ciò potrebbe succedere in vari modi. Una possibilità è che a distanze brevissime, alla cosiddetta «lunghezza di Planck», scompaia la presunta e familiare continuità dello spazio, e si perda la distinzione tra esso e il tempo⁶. Qui neanche la fisica contemporanea sa cosa dire, e per ora nessuno ha la più pallida idea di come affrontare una simile eventualità. A quelle scale, lo spaziotempo non è più un mezzo continuo e regolare come un fluido, somiglia più a una schiuma o a un mucchio di sabbia. Anche questo è un problema che ho accantonato.

All'inizio non accadde granché

In assenza di indizi convincenti a sostegno dell'ipotesi opposta, immaginiamo che ci sia stato un inizio, e consideriamo il momento in cui il nulla diventò qualcosa, su cui si concentrano tante speculazioni filosofiche, mitologiche e teologiche (e in questo libro, devo ammettere, speculazioni non del tutto scientifiche). Finora ho suggerito di concepire il nulla semplicemente come uno spazio e un tempo vuoti; in breve, come uno spaziotempo vuoto. Bisogna ora superare quella concezione primitiva. D'ora in poi con il termine «nulla» intenderò il nulla assoluto, meno dello spazio svuotato, meno del vuoto. Se volete, sarà l'«assenza di essere» degli indù. Per sottolineare l'assoluta vuotezza di ciò che bisogna immaginare, lo chiamerò *Nulla*. Questo Nulla non ha spazio e non ha tempo; davvero, non è assolutamente nulla. Un vuoto privo di spazio e di tempo, un'assoluta mancanza di qualsiasi cosa, vuotezza oltre la vuotezza. Non ha altro che un nome⁷.

Al principio dell'universo (in particolare mi riferisco all'Ur-universo, ma per semplicità non lo preciserò più), questo Nulla si dispiegò in qualcosa e il nostro universo nascente si ritrovò dotato di spazio e tempo. La conseguenza immediata di quel dispiegamento è ciò che chiamiamo Big Bang, ma in questa fase vorrei evitare di concepirlo come uno scoppio, e invece considerarlo un evento che si verificò dopo il dispiegamento di cui sopra, che in un certo senso consentì poi al Big Bang di avvenire. Al momento la scienza tace sul meccanismo che

portò alla trasformazione del Nulla in qualcosa, e magari tacerà per sempre, benché si siano fatte alcune ipotesi. Chi apprezza una visione religiosa, o anche laica ma poetica, si accontenterà forse di immaginare un Creatore che, trovandosi al di fuori del Nulla, lo spinse o forse urtò senza volere, provocandone la trasformazione (e forse, se fu un caso, è ora sbigottito dalle conseguenze); ma la scienza non procede così.

Concentriamoci sulla trasformazione e accantoniamo l'importante problema di come si sia verificata, rimandandolo a un altro momento⁸. Come sapete, la mia ipotesi è che non sia successo granché quando il Nulla diventò qualcosa. Credo riusciate ad ammettere che il Nulla è assolutamente uniforme: non possono trovarvisi grumi, lacune, buche, dilatazioni e schiacciamenti, perché altrimenti non sarebbe Nulla. Poi quando l'universo si dispiegò iniziando a esistere, senza che sia successo granché, mi sembra plausibile che quell'uniformità del Nulla si sia conservata. Ne deriva che lo spazio e il tempo apparsi in seguito a questo evento sono uniformi. In particolare lo è il tempo, e perciò (come dice Noether) l'energia si conserva. Così appare questa legge primaria della Natura, seguita dalla causalità, dalla scienza e dalla comprensibilità del mondo fisico. Essa spiana anche la strada perché, a tempo debito, appaiano l'agricoltura, la guerra, lo sport, e quelle attività che solleticano e stimolano i sensi e l'intelletto: la letteratura, la musica e le arti visive. Quel «non granché» era meravigliosamente fecondo.

Riconosco che il «non granché» avvenuto al principio dell'universo è soltanto un'ipotesi, un'illazione che sembra cozzare con la struttura della realtà. Ma le ipotesi diventano sempre più valide quando se ne scoprono conseguenze in accordo con le osservazioni. In questo caso, l'ipotesi che sia successo «non granché» ha dato luogo a un'osservazione verificata, quindi è forse corretta. Non sbagliarsi non è però affatto una garanzia di essere nel giusto, perché alternative diverse potrebbero giungere alla stessa conclusione. La scienza è severa: basta una singola implicazione in conflitto con gli esperimenti per condannare un'ipotesi alla discarica, in crescita costante, dove nel corso della storia si sono accumulate le idee spazzatura; un'unica conseguenza verificata è un mero incoraggiamento a continuare le ricerche, non una garanzia di validità. Le ipotesi maturano fino allo stadio di teorie quando le loro implicazioni, e a volte previsioni, si moltiplicano risultando in accordo con gli esperimenti, ma anche una teoria che è sopravvissuta placida fino alla mezza età può essere condannata a morte da un'unica conseguenza falsa.

Nella scienza tutte le idee vivono sull'orlo dell'abisso. Una conseguenza corretta è senz'altro una soddisfazione, e forse niente di più, ma la mia ipotesi ha o no conseguenze verificate dagli esperimenti, che la mantengano almeno temporaneamente lontana dal braccio della morte della scienza?

La quantità di moto si conserva perché lo spazio è uniforme

Ho sfruttato lo spazio per analizzare il tempo; ora sfrutterò il tempo per analizzare lo spazio. Quest'ultimo, che è la nostra casa e il terreno di gioco di tutti gli eventi, iniziò a esistere al principio dell'universo. Nello stesso spirito del ragionamento appena svolto, mentre il Nulla si è dispiegato in qualcosa, l'uniformità di quel Nulla si è tramandata allo spazio appena comparso. In questo caso la simmetria che, secondo la scoperta di Emmy Noether, va collegata a una legge di conservazione è l'uniformità dello spazio, ereditata da quella del Nulla.

Che cosa significa «uniformità dello spazio»? Ricordando come abbiamo interpretato l'uniformità del tempo, bisogna ragionare in maniera analoga: l'uniformità dello spazio significa che un esperimento svolto qui avrà lo stesso risultato di uno svolto altrove, in un laboratorio diverso. Le leggi della natura non dipendono da dove ci si trova. Potrebbero avere conseguenze diverse, perché le condizioni possono variare, ma le leggi stesse sono identiche. Quindi, benché la legge che governa le oscillazioni dei pendoli non cambi, lo stesso pendolo oscillerà con periodi che variano a seconda se si trova al livello del mare o in cima a una montagna, dove la gravità è più debole. Spostandosi da un punto a un altro, non è necessario cambiare l'equazione che esprime quella legge. Le leggi presentano un'uniformità spaziale.

Poiché non c'è una distinzione intrinseca tra lo spazio e il tempo (secondo la relatività, sono due facce della stessa cosa: lo spaziotempo), ogni osservazione valida per il tempo si applica anche allo spazio. Come succedeva per il tempo, se una legge non varia da un punto all'altro, lo spazio stesso deve essere uniforme. In altri termini, non è schiacciato da una parte, dilatato dall'altra e così via. Come per l'analogia distorsione del tempo, è difficile concepire che si sarebbe potuta elaborare una teoria per la dinamica del volo della palla se le cose non stessero così. Si applicano gli stessi avvertimenti citati per il tempo: ci concentriamo sull'uniformità globale dell'universo o di una piccola regione localmente piatta, in modo da poter applicare il primo teorema di Noether (quello che collega le simmetrie alle leggi di conservazione), invece di fare ricorso al suo secondo teorema (quello relativo allo spaziotempo distorto). Faccio l'ipotesi che globalmente lo spazio sia piatto.

Ora entra in azione il teorema di Noether: nel nostro contesto, dall'uniformità dello spazio deriva la conservazione della *quantità di moto*. Occorre qualche parola su questa grandezza e la sua conservazione.

La quantità di moto è il prodotto della massa di un corpo per la sua velocità⁹. Per esempio, una palla di cannone pesante in volo rapido ha una notevole quantità di moto, mentre la stessa grandezza è bassa per una palla da tennis, più leggera, che si muove lentamente. Malgrado una certa imprecisione del termine della vita quotidiana, nella scien-

za il termine «velocità» specifica sia il valore numerico assoluto di quella grandezza (cioè la rapidità con cui cambia la posizione) sia la direzione di quel cambiamento. Di conseguenza, se la posizione di un corpo (per esempio un pianeta in orbita attorno al Sole) cambia a ritmo costante, ma la traiettoria si incurva, si considera che la velocità stia cambiando di continuo, benché il suo valore assoluto sia invariato. Una palla colpita da una mazza da baseball ripartirà forse mantenendo invariato il valore assoluto della velocità, che però si è invertita, e altrettanto vale per la quantità di moto. Pensando a quest'ultima grandezza, ricordate sempre di considerarne la direzione. Ciò complica leggermente la sua conservazione, cioè la legge che stabilisce l'invarianza della quantità di moto totale in qualsiasi evento, perché bisogna tenere presenti varie direzioni dello spostamento (il problema non si poneva esaminando la conservazione dell'energia, in cui le direzioni non svolgono alcun ruolo); rimane comunque facile visualizzare quel che succede.

Negli urti tra particelle la quantità di moto si conserva. Un esempio semplice è quello di due palle da biliardo identiche in rotolamento una verso l'altra, con velocità che hanno lo stesso valore assoluto. La quantità di moto totale è zero (perché le due velocità sono uguali ma opposte, quindi si annullano nella somma), e nello scontro entrambe le palle si fermano; a quel punto la quantità di moto totale è sempre zero. Se invece non si muovono entrambe lungo la stessa retta, così che lo scontro frontale è escluso, la quantità di moto totale non è

più zero. Dopo l'urto rotolano via e si allontanano l'una dall'altra. Risulta che le nuove traiettorie sono tali da mantenere invariata la quantità di moto totale. Qualunque sia l'angolo fra le traiettorie prima dell'urto, i valori eventualmente diversi delle masse e delle velocità iniziali o il numero di palle coinvolte, la quantità di moto totale rimane invariata prima e dopo l'urto. Questa grandezza in effetti si conserva, e ciò segue dall'uniformità dello spazio.

La conservazione della quantità di moto prevista dall'ipotesi che succeda «non granché», associata al teorema di Noether, è corroborata dagli esperimenti e gravida di conseguenze: rappresenta il fondamento di tutta la meccanica di Isaac Newton, ora chiamata «meccanica classica». Si trova quindi alla base delle traiettorie dei corpi, e degli eventi che si verificano quando essi collidono o si influenzano a vicenda tramite le forze che esercitano; alla base della pressione dovuta a un gas quando le sue molecole urtano le pareti del contenitore; alla base della descrizione classica di pianeti, stelle e galassie. Si trova anche alla base del funzionamento dei jet e dei motori dei razzi.

L'alleanza tra il Nulla e la pigrizia ci ha fatto fare molta strada. Spiegando la conservazione dell'energia ha gettato le basi della causalità, e ha fornito i presupposti perché nell'ambito dello spaziotempo inizino a svolgersi gli eventi, spiegando le ipotesi fondamentali della fisica newtoniana. C'è forse dell'altro? La pigrizia primordiale ha ulteriori conseguenze?

La conservazione del momento angolare

Ho parlato della quantità di moto, la grandezza associata al moto dei corpi, cioè alla loro massa e alla velocità di spostamento nello spazio. Bisogna ora citare un'altra quantità associata al moto: il *momento angolare*, legato alle rotazioni. Tutti i corpi rotanti hanno un momento angolare, anche se non si spostano nello spazio. La Terra, girando su sé stessa, ha un momento angolare dovuto al moto quotidiano attorno ai poli, alla rotazione sul proprio asse. Ha inoltre un momento angolare dovuto all'orbita che descrive annualmente attorno al Sole. La Luna ha un momento angolare associato all'orbita che descrive mensilmente attorno alla Terra; ne ha anche uno dovuto alla rotazione su sé stessa, che si svolge a ritmo identico al moto attorno alla Terra (così che in tutto il mese lunare il nostro satellite ci rivolge sempre la stessa faccia). Ora, un'altra legge della natura ben stabilita è che, come la quantità di moto, *il momento angolare si conserva*. Se mettete un corpo in rotazione, per esempio facendo girare una ruota o una palla, dotandola così di momento angolare, da qualche parte si sarà prodotto un momento angolare che lo compensa. Ogni volta che ve ne andate in bicicletta verso est, fate diminuire il momento angolare della Terra (quello legato alla rotazione sul suo asse) di una quantità equivalente, ma del tutto trascurabile vista la massa terrestre. Per quanto sia piccola questa diminuzione, la polizia del momento angolare se ne accorge. Ogni volta che pedalate verso ovest, accelerate la rotazione

terrestre e il giorno si accorcia, in maniera del tutto impercettibile per chiunque, tranne la polizia del momento angolare, che non ammette trasgressioni.

Proprio come nel caso della quantità di moto, per valutare e comprendere il significato della conservazione del momento angolare bisogna tenere presente la direzione della velocità, oltre al suo valore numerico assoluto. Ma che cosa si intende per *direzione* in questo caso, visto che la traiettoria dei pianeti, o di qualsiasi oggetto rotante, non è una linea retta? Per individuare una direzione bisogna immaginare che il moto rotatorio segua una circonferenza su un piano, poi gli si associa una freccia, perpendicolare al piano e fissata al centro della circonferenza. Se la traiettoria, vista dal basso, segue la circonferenza in senso orario, la freccia punta verso l'alto rispetto al piano. Se invece la traiettoria si svolge in senso orario quando è vista dall'alto, la freccia punta verso il basso rispetto al piano. Questa convenzione ricorda il verso di un normale cavatappi: in effetti esso penetra nel tappo se lo si gira in senso orario; cioè, secondo la nostra convenzione, avanza nel senso della freccia. Quando si viaggia in automobile, tutte le ruote girano in senso orario se sono guardate dall'esterno, vicino al fianco destro del mezzo; si può quindi immaginare che al mozzo di ogni ruota sia fissata una freccia che punta verso il fianco sinistro dell'auto. Se questa accelera, le frecce immaginarie si allungano in proporzione all'aumento del valore assoluto della velocità; durante una frenata si accorciano. Se l'auto si ferma e riparte a marcia indietro, le frecce

spuntano dalla parte opposta, cominciando ad allungarsi verso il fianco destro dell'auto. Se le frecce fossero taglienti, come le lame fissate alle ruote del carro di Boudicca^{IV}, avanzando si falcerrebbero i nemici a sinistra, e tornando indietro quelli a destra.

C'è ancora una cosa da tenere presente. La quantità di moto è legata alla velocità dalla moltiplicazione per la massa, che misura la resistenza alle variazioni dal moto rettilineo e uniforme. Maggiore è la massa, maggiore è questa inerzia opposta ai cambiamenti applicati. Allo stesso modo, la resistenza alle variazioni di momento angolare è legata a una quantità detta *momento d'inerzia*, termine che non si riferisce a un breve sonnellino, ma alla resistenza ai cambiamenti nel moto rotatorio invece che rettilineo. (In fisica il termine «momento» denota un'azione che si esercita a un certo angolo piuttosto che lungo la traiettoria; un esempio è un dado stretto con una chiave inglese, che esercita una torsione, un *momento torcente*). Due corpi possono avere la stessa massa ma diversi momenti d'inerzia. Immaginate, per esempio, due ruote con la stessa massa ma distribuita in modo diverso: in una è concentrata vicino all'asse di rotazione, e nell'altra vicino al bordo. È più facile mettere in rotazione la prima ruota, che ha quindi un momento d'inerzia minore. Un corpo con un grande momento d'inerzia in rapida rotazione (come un volano) ha un momento angolare maggiore rispetto a un corpo che ruota alla stessa velocità ma ha un momento d'inerzia più piccolo. Il volano, che serve a mantenere un moto rotatorio regolare, ci

riesce proprio perché, dato il suo alto momento d'inerzia, è difficile fermarlo. Abbiamo visto che la quantità di moto di un corpo si calcola numericamente moltiplicando la massa e la rapidità con cui cambia la sua posizione lungo una retta. Per analogia, il valore numerico del momento angolare di un corpo rotante è il prodotto del suo momento d'inerzia e della rapidità con cui ruota¹⁰.

La legge di conservazione del momento angolare esprime il fatto sperimentale che *il momento angolare non si crea né si distrugge*. È possibile trasferirlo da un oggetto all'altro, come nell'urto di due palle in rotazione o quando si accelera andando in bicicletta. Ma il momento angolare totale di tutti i corpi nell'universo è costante (e probabilmente nullo). Poiché questa grandezza si conserva, se aumenta il momento angolare di un oggetto in seguito a una torsione che lo fa accelerare, diminuisce il momento angolare di un altro oggetto collegato al primo. Se dopo un urto una palla rotola su sé stessa, il fenomeno sarà compensato altrove tramite la modifica del momento angolare di un altro oggetto (per esempio la Terra). Forse l'immagine più evidente è quella di una pattinatrice sul ghiaccio che ruota su sé stessa, e accelera se riduce il proprio momento d'inerzia avvicinando le braccia al corpo; il suo momento angolare rimane comunque costante.

E perché si conserva il momento angolare? Ormai sapete che per capire l'origine di qualsiasi legge di conservazione bisogna ricorrere al teorema di Noether, e cercare la simmetria fondamentale

associata alla quantità conservata. In questo caso il suo teorema la identifica con l'*isotropia* dello spazio. Questa parola, che deriva dai termini greci «uguale» e «rotazione», indica l'uniformità dello spazio per spostamenti attorno a un punto. Immaginate un punto, allontanatevi un po', infine percorrete un cerchio attorno al punto originale; se lungo quella traiettoria non riscontrate variazioni nello spazio (comunque definite), esso è isotropo nei dintorni del punto scelto. Le palline da ping-pong sono isotrope, e anche quelle da golf se ignoriamo le fossette. La conservazione del momento angolare si giustifica quindi se scopriamo perché lo spazio è dotato di uniformità rotazionale.

Ormai avrete probabilmente capito come procede il ragionamento. Bisogna ripensare al Nulla; esso è isotropo. In altri termini, deve esserlo il nulla assoluto che precedeva il nostro universo (o l'Ur-universo). In caso contrario, se ci fossero stati grumi e cavità, non si sarebbe trattato del Nulla. Quando il Nulla si dispiegò e diventò qualcosa, non successe granché (secondo la mia ipotesi). L'isotropia del Nulla, perciò, si è conservata quando sono comparsi lo spazio e il tempo, e di conseguenza lo spazio che abbiamo ora è isotropo. Da quell'isotropia discende la conservazione del momento angolare. Un'altra legge fondamentale della natura è apparsa senza che ci fosse bisogno di imporla.

A proposito, va menzionato un altro aspetto del Nulla. Quando osserviamo il cielo (con questo «noi» mi riferisco all'insieme degli astronomi e dei cosmologi, i nostri osservatori), e non soltan-

to le singole stelle, ma le galassie che si affollano nell'universo visibile, troviamo che esse ruotano e quindi sono dotate di momento angolare. Ma la rapidità delle rotazioni varia e l'orientamento delle frecce che rappresentano le direzioni di rotazione sembra casuale. Quando si valuta il momento angolare totale dell'universo visibile (consentendo l'annullamento reciproco di valori opposti del momento angolare), si scopre che il risultato è zero. In complesso, l'universo visibile ha un momento angolare nullo, nonostante la rotazione delle sue singole componenti. È proprio il risultato che bisogna aspettarsi in seguito al dispiegamento del Nulla, che sembra aver dato luogo a qualcosa. Il Nulla è un'entità priva di momento angolare; non c'è allora da sorprendersi se il qualcosa che ne derivò ha ereditato questa caratteristica. Nessuna quantità di momento angolare è stata creata durante la Creazione; oggi (in complesso) questa grandezza rimane nulla. Il nostro attuale qualcosa ha semplicemente ereditato le proprietà del Nulla che lo generò.

A che punto siamo? Spero sia chiaro il modo in cui l'ipotesi che non sia successo granché alla nascita dell'universo ha condotto a tre leggi fondamentali della natura: la conservazione dell'energia, della quantità di moto e del momento angolare. In ciascun caso, sembra che il nostro universo abbia semplicemente ereditato l'uniformità del vuoto che l'ha preceduto, manifestando l'eredità sotto forma di quelle tre grandi leggi. Non c'è stato bisogno di imporle: queste leggi sono dovute semplicemente

alla discendenza da uno stato precursore primordiale, quello del nulla assoluto. Esistono altre leggi di conservazione (per esempio quella relativa alla carica elettrica), e a ciascuna è associata una simmetria. Per scovarle bisogna dare uno sguardo più approfondito alla natura della Natura; ne ripareremo in un capitolo seguente. Ci sono anche molte leggi piccole, che ho chiamato minori; non ne ho ancora esaminato l'origine. Verrà anche il loro momento. Adesso è tempo di fare spazio perché la pigrizia possa riposare e si instauri il regno dell'anarchia.