

LA GRAVITAZIONE: Introduzione

*Io stimo più il trovar un vero benché di cosa leggiera
ché il disputar lungamente delle massime questioni
senza conseguir verità nissuna.*

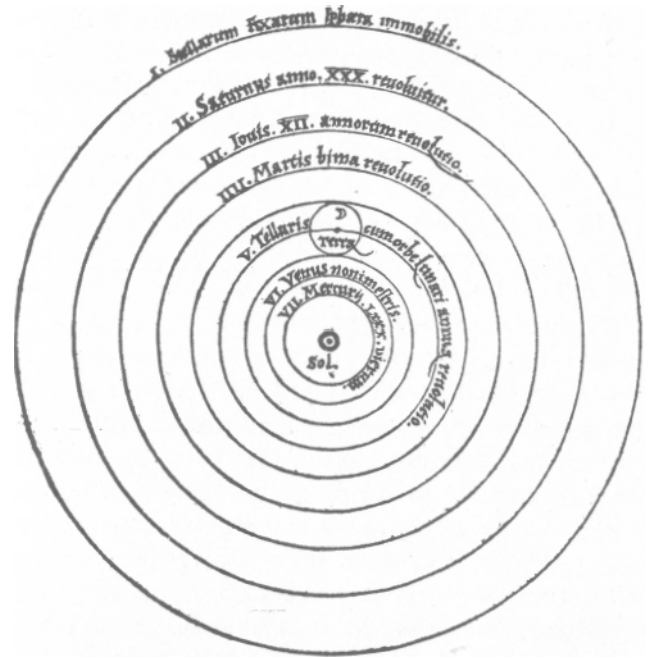
Galileo Galilei

Questo libro parla di un singolo fatto, anche se certamente non piccolo. Quando un pianeta, o una cometa, o qualunque altro corpo si muove nello spazio sotto l'influsso della gravità, la curva che esso descrive è sempre un cerchio, o un'ellisse, o una parabola, o un'iperbole. Queste curve molto particolari sono note come sezioni coniche. Perché mai la natura sceglie di tracciare nei cieli queste eleganti figure geometriche, e soltanto queste? Il problema non ha soltanto un profondo significato scientifico e filosofico, ma anche un'immensa importanza storica.

Nell'agosto del 1684, Edmund Halley (in onore del quale è stato scelto il nome della celebre cometa) si recò a Cambridge per parlare di meccanica celeste con un matematico famoso ma un po' bizzarro, Isaac Newton. Nei circoli scientifici era diffusa l'idea che il moto dei pianeti potesse essere la conseguenza di una forza esercitata dal Sole, inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra questo e i pianeti, ma nessuno aveva ancora potuto darne una dimostrazione soddisfacente. Sì, si lasciò sfuggire Newton, egli era riuscito a dimostrare che una forza di questo tipo avrebbe dato luogo ad orbite ellittiche, proprio lo stesso tipo di orbite che Johannes Kepler aveva dedotto a partire da osservazioni astronomiche. Halley sollecitò Newton a rivelargli la dimostrazione. Newton, a quanto sembra, si schermì, dicendo di averla smarrita, ma promise di ricostruirla e di inviarla a Halley. In effetti, qualche mese più tardi, nel novembre del 1684, Newton spedì a Halley un saggio di nove pagine nel quale dimostrava che una legge della gravità dipendente dall'inverso del quadrato, insieme ad alcuni principi di base di meccanica, poteva rendere conto non solo delle orbite ellittiche, ma anche delle altre leggi di Kepler sul moto dei pianeti e di altri aspetti ancora. Halley si rese conto di avere in mano niente di meno che la chiave per comprendere l'universo com'era allora concepito. Chiese a Newton di permettergli di provvedere senz'altro alla pubblicazione del suo lavoro. Ma Newton non ne era del tutto soddisfatto e decise di rinviare, in modo da poter rivedere il manoscritto. Il rinvio durò quasi tre anni, durante i quali sembra che Newton, ormai completamente assorbito dal problema, non abbia fatto altro che lavorare alla soluzione. Il risultato finale, apparso nel 1687, è costituito dai *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, il capolavoro di Newton, il libro che diede origine alla scienza moderna. La dimostrazione di Newton della legge delle ellissi è uno spartiacque che separa il mondo antico dal mondo moderno. È il culmine della rivoluzione scientifica. Rappresenta un coronamento e una conquista dello spirito umano, paragonabile alle sinfonie di Beethoven, ai drammi di Shakespeare, o alla Cappella Sistina di Michelangelo. A parte la sua immensa importanza nella storia della fisica, essa è la dimostrazione definitiva di un fatto straordinario che ha confuso e affascinato i pensatori più profondi fin dai tempi di Newton: la natura obbedisce alla matematica.

Da Copernico a Newton Nel 1543, mentre giaceva sul letto di morte, il chierico polacco Nicolò Copernico vide le prime copie del suo libro *Sulle rivoluzioni delle sfere celesti*. Copernico aveva ritardato di proposito la pubblicazione, fino al momento in cui non avrebbe più dovuto affrontarne le conseguenze. Il libro proponeva l'impensabile: che il Sole, e non la Terra, fosse al centro dell'universo. Il titolo alludeva alle rivoluzioni, reali, che i pianeti descrivono nei cieli, e diede inizio a quella che fu chiamata, metaforicamente, la Rivoluzione Scientifica. Oggi, quando chiamiamo rivoluzioni i sommovimenti politici o di altro genere, rendiamo omaggio a Copernico, il cui libro sulle rivoluzioni diede inizio alla prima rivoluzione. Prima di Copernico, la nostra visione del

mondo era modellata su quella degli antichi filosofi e matematici greci, fissata nel tempo dagli insegnamenti di Platone e Aristotele che vissero e insegnarono nel quarto secolo avanti Cristo. Nel mondo aristotelico, tutti i corpi materiali erano costituiti da quattro elementi: terra, acqua, aria e fuoco. Ogni elemento aveva il suo luogo naturale: la terra al centro dell'universo, circondata dalle acque, quindi dall'aria e dal fuoco, in sfere ascendenti. La forma naturale del movimento era considerata quella che hanno gli elementi quando sono diretti verso il loro luogo naturale. Così si spiegava che i corpi pesanti, costituiti prevalentemente dalla terra, tendono a cadere, mentre le bolle d'aria salgono attraverso l'acqua e il fumo attraverso l'aria. Tutti gli altri moti erano considerati violenti, tali da richiedere una causa prossima. Per esempio, un carro non si muoverebbe se un bue non lo tirasse. Al di fuori delle sfere della terra, dell'acqua, dell'aria e del fuoco, i corpi celesti compivano rivoluzioni su sfere di cristallo loro proprie. Le sfere celesti, nelle quali era permesso soltanto il moto circolare, perfetto, erano serene, armoniose ed eterne. Soltanto quaggiù sulla Terra c'erano cambiamento, decadenza e morte. Si trattava di un sistema coerente, senza dubbio progettato per tenerci umilmente al nostro posto, che era però pur sempre il centro dell'universo; così, potevamo facilmente immaginare di essere, con tutte le nostre manchevolezze, il fine della creazione. «Eravamo decisamente contenti del cosmo di Aristotele», osserva un personaggio dell'*Arcadia* di Tom Stoppard, una commedia che prende in giro tanto gli storici quanto gli scienziati. «Personalmente lo preferivo. Cinquantacinque sfere collegate alla manovella di Dio, ecco cos'è per me un universo soddisfacente.» Ma anche nei cieli sereni del cosmo aristotelico c'erano alcuni problemi. Il Sole, la Luna e le stelle eseguivano i loro movimenti in modo abbastanza fedele (almeno di solito), ma un piccolo numero di corpi notevoli, chiamati pianeti dalla parola greca che vuol dire «vagabondo», non si comportava correttamente. Prevedere la posizione di questi corpi, e dunque il punto del cielo in cui essi sarebbero apparsi in una data notte, era responsabilità professionale degli astronomi. La conoscenza di tale posizione era di una certa importanza per l'agricoltura, per la navigazione e, soprattutto, in un mondo profondamente immerso nell'astrologia, per la compilazione degli oroscopi. L'idea che i pianeti si muovessero intorno alla Terra lungo circonferenze perfette non si accordava con le osservazioni, ma Platone aveva affermato che nei cieli era possibile soltanto il moto circolare. Così gli astronomi costruirono uno schema, secondo il quale i pianeti si muovevano lungo circonferenze, dette epicicli, il cui centro giaceva a sua volta su una seconda circonferenza, detta deferente. Se la posizione celeste di un pianeta non si adattava perfettamente al meccanismo di epicicli e deferenti che gli era stato assegnato, si poteva aggiungere un nuovo epiciclo per rendere più precisi i calcoli e migliorare l'accuratezza delle previsioni: quel che chiamiamo «salvare le apparenze». Questo antico sistema astronomico fu codificato nel secondo secolo a.C. dall'astronomo alessandrino Tolomeo in un libro chiamato *l'Almagesto*. *L'Almagesto* rimase il principale testo di astronomia per quattordici secoli, fino all'epoca di Copernico. Nel suo libro, Copernico mise in evidenza che il pesante sistema degli epicicli e dei deferenti poteva in una certa misura essere semplificato se, soltanto per opportunità matematica, si fosse posto il Sole, e non la Terra,



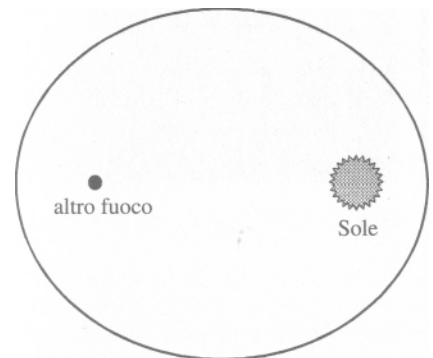
al centro dell'universo. Questo è quel che scrive Copernico nel primo capitolo. Il resto del libro è pieno di tavole astronomiche, calcolate usando epicicli e deferenti centrati sul Sole. Il trucco dell'opportunità matematica non ingannò nessuno; ma, d'altra parte, furono in pochissimi ad occuparsi in qualche modo di Copernico nei decenni successivi alla sua morte, e furono anche di meno quelli che si diedero la briga di leggere il suo libro. È vero che in questo periodo alcuni missionari gesuiti insegnarono il sistema copernicano in Cina, ma nel suo quartier generale a Roma la Chiesa era molto più preoccupata di Martin Lutero che di Nicolò Copernico. Tuttavia, ci furono alcuni che si accorsero dell'opera di Copernico e ne riconobbero l'importanza. Tre uomini, in particolare, erano destinati a giocare un ruolo cruciale nel rovesciamento dell'universo geocentrico. Erano Tycho Brahe, Johannes Kepler e Galileo Galilei.

Tycho Brahe (1546-1601) era un nobile danese. Da ragazzo aveva scoperto con stupore la possibilità di prevedere eventi celesti come l'eclisse solare del 21 agosto del 1560. Più tardi la sua meraviglia crebbe ancora quando, osservando una congiunzione fra Giove e Saturno nell'agosto 1563, si accorse che le tavole astronomiche (comprese quelle di Copernico!) erano errate di parecchi giorni, probabilmente per la mancanza di dati astronomici precisi. Dopo aver studiato legge, aver viaggiato in Europa, aver perso il naso in un duello e averlo sostituito con un altro d'oro, argento e cera, Tycho scandalizzò l'aristocrazia danese sposando una donna non nobile e scegliendo la professione di astronomo. Eresse un piccolo osservatorio su alcuni terreni di famiglia e lì, l'11 novembre del 1572, scoprì una nuova stella molto luminosa in una posizione, nella costellazione di Cassiopea, dove non ce n'era mai stata una. La possibilità che apparissero delle nuove stelle non era ammessa negli immutabili cieli aristotelici. Il suo libro *De nova stella (Della stella nuova)* provocò il risentimento della Chiesa, consolidò la sua reputazione e gli guadagnò il patrocinio del re di Danimarca, Federico II. Federico concesse a Tycho l'isola di Hveen, vicino a Copenaghen, e il sostegno finanziario necessario a costruirvi il più grande osservatorio astronomico che il mondo avesse mai visto. Furono costruiti alcuni giganteschi strumenti di misura per realizzare osservazioni di una precisione senza precedenti. Furono anche costruiti dei magnifici edifici in cui vivere e lavorare, stamperie per pubblicare le nuove scoperte, e molto altro, aperto nel 1576, l'osservatorio operò fino al 1597. Pochi anni dopo, nel 1610, l'invenzione del telescopio avrebbe chiuso per sempre l'era dell'astronomia a occhio nudo. Ciò nonostante, le osservazioni realizzate a Uraniborg durante il breve periodo della sua attività diminuirono l'incertezza delle tavole astronomiche da dieci minuti di arco a due minuti di arco. (Se osservate il vostro indice all'estremità del braccio teso, la sua lunghezza apparente corrisponde a circa un grado. Dieci minuti di arco corrisponde a circa un sesto di tale ampiezza, due minuti di arco rappresentano un angolo cinque volte minore.) Nel 1588, Federico II morì e gli successe il figlio Cristiano IV. Cristiano era irritato dalle continue richieste di fondi da parte di Tycho, e nel 1597 la situazione era compromessa al punto che Tycho si sentì obbligato a chiudere, lasciare la Danimarca e stabilirsi a Praga, dove divenne il matematico imperiale di Rodolfo II, re di Ungheria e Boemia e Sacro Romano Imperatore. All'epoca in cui Tycho partì per Praga, il contributo da egli dato all'astronomia era già incancellabile. Non per questo egli era soddisfatto. Il compito che ancora aveva davanti era quello di porre le sue osservazioni preziose (e in larga parte ancora segrete) al servizio della nuova cosmologia. Non però della cosmologia di Copernico e certamente non di quella di Tolomeo. Tycho aveva inventato un cosmo tutto suo. Nell'universo tychonico, tutti i pianeti ruotavano attorno al Sole, e il Sole con gli altri pianeti ruotava attorno alla Terra, posta nuovamente al centro dell'universo. A un occhio moderno, l'universo tychonico si presenta come un compromesso fra Aristotele e Copernico, ma per i suoi tempi Tycho sembrava allontanarsi da Aristotele ancora più audacemente di quanto avesse fatto

Copernico, perché mandava in frantumi le sfere di cristallo che fino ad allora avevano riempito i cieli, tanto nella concezione geocentrica che in quella eliocentrica. La questione era: i dati di Tycho avrebbero confermato l'universo di Tycho? La risposta richiedeva un talento matematico molto maggiore di quello posseduto dal matematico imperiale Tycho. In tutta Europa, non c'era forse più di un solo matematico con la necessaria abilità. Ma almeno uno c'era. Il suo nome era Johannes Kepler.

Kepler era nato nel 1571, figlio di un soldato di ventura che ben presto scomparve dalla scena. La sua nonna materna era una locandiera bisbetica, e sua madre fu più tardi processata per stregoneria. Piccolo di statura, di salute cagionevole, povero, Kepler era però di un'intelligenza così acuta e evidente, da guadagnargli una borsa di studio che gli permise di frequentare l'Università di Tubinga. Lì egli fu studente di uno dei primi sostenitori del sistema copernicano, Michael Mästlin. Dopo essersi diplomato e laureato, lo aspettava una carriera come pastore luterano; fu salvato da una raccomandazione della facoltà di Tubinga per un posto di insegnante di matematica nella città austriaca di Graz. Secondo la leggenda, in un giorno d'estate del 1595, mentre il corpo di Kepler teneva una lezione di geometria a una classe di adolescenti annoiati, la sua mente rimuginava le tavole di dati dell'astronomia di Copernico, la passione della sua vita. Nell'iscrivere e circoscrivere cerchi a un triangolo equilatero, Kepler si rese conto improvvisamente che il rapporto fra i diametri dei due cerchi (il cerchio esterno è esattamente due volte maggiore di quello interno) era essenzialmente lo stesso del rapporto fra i diametri delle orbite di Giove e Saturno. La scoperta mandò in orbita lo stesso Kepler. Ben presto, egli sviluppò un modello nel quale le sei sfere invisibili, che regolavano le orbite dei sei pianeti allora conosciuti, risultavano successivamente iscritte e circoscritte ai cinque «solidi perfetti» dell'antichità (sono i cinque solidi regolari: il tetraedro, il cubo, l'ottaedro, il dodecaedro e l'icosaedro), posti uno dentro l'altro. In effetti, ponendo i solidi nell'ordine opportuno, i diametri delle sfere vengono ad avere pressoché gli stessi rapporti reciproci delle orbite dei pianeti. Il modello di Kepler spiegava perché esistessero sei pianeti, e soltanto sei: perché i solidi perfetti sono soltanto cinque. Spiegava anche perché i rapporti fra le orbite erano quelli osservati. L'intero sistema era perfettamente coerente. Kepler pensò, non per l'ultima volta in vita sua, di aver guardato nella mente del Creatore. Nel 1596 pubblicò le sue intuizioni nel libro *Mysterium cosmographicum*, che attirò l'attenzione di Tycho Brahe. Tycho non era entusiasta delle vedute copernicane di Kepler, ma era impressionato dal suo talento matematico. Invitò perciò Kepler a raggiungerlo a Praga. Kepler si era fatto ormai una considerevole reputazione come abile astrologo (le sue predizioni sulla peste, sulla carestia e sull'invasione turca si rivelarono per lo più corrette), ma le sue finanze era ancora precarie, e in quanto luterano si sentiva discriminato nella cattolica Graz. Il primo giorno del mese di gennaio dell'anno si mise in viaggio per raggiungere l'astronomo danese a Praga. Il timido Johannes Kepler non era molto adatto a Tycho Brahe, un irruente signore con un naso di metallo, ma i due avevano bisogno l'uno dell'altro. A Kepler servivano i dati di Tycho per completare l'opera della sua vita, e a Tycho serviva il genio di Kepler per organizzare le sue osservazioni e trovare la conferma dell'universo tychonico. Il precario accordo durò diciotto mesi, finché, nel 1601, Tycho morì all'improvviso per un'infezione urinaria acuta. Si tramanda che le sue ultime parole per Kepler siano state: «Fa' che io non sia vissuto invano.» Ma Kepler, il fedele copernicano, non aveva alcuna intenzione di portare avanti la cosmologia tychonica. Dopo la morte di Tycho, Kepler ottenne con una certa difficoltà (nulla nella vita di Kepler avvenne facilmente) di essere nominato suo successore come matematico imperiale, un titolo che si rivelò più onorifico che remunerativo, e di strappare dalle mani dei suoi eredi i magnifici dati di Tycho. Pubblicò anche un libro di astrologia. (Kepler considerava tutti

gli altri astrologi come ciarlatani e imbroglioni, ma non poté mai scacciare del tutto la sensazione che ci fosse una certa armonia fra il destino umano e l'orizzonte celeste.) E nel 1604, mentre osservava una congiunzione di Marte, Giove e Saturno, vide apparire una supernova, una stella nova che rimase visibile nei cieli per diciassette mesi. La più grande battaglia di Kepler fu la sua «guerra di Marte», il tentativo di trovare per tale pianeta un'orbita che fosse coerente con le osservazioni di Tycho. Un cerchio avrebbe potuto adattarsi all'orbita del pianeta se l'incertezza delle osservazioni fosse stata di dieci minuti di arco, com'era prima di Tycho. Ma la magnifica eredità di questi esigevo qualcosa di diverso. Kepler eseguì dei calcoli prodigiosi, usando per primo un metodo ingegnoso per ricavare l'orbita della Terra, l'incerta piattaforma celeste dalla quale Tycho aveva fatto le sue osservazioni. L'orbita della Terra poteva essere descritta abbastanza bene da un cerchio con il Sole lievemente spostato rispetto al centro. Ma l'orbita di Marte no. Nel sistema copernicano, la Terra è uno dei pianeti. Ma la Terra, essendo la sede del mutamento, della morte e della decadenza, non è ovviamente in uno stato di perfezione platonica, come si suppone che siano i pianeti: così forse, dopotutto, le orbite dei pianeti non sono necessariamente dei cerchi platonici! («Oh me ridicolo!», esclama Kepler per non aver saputo afferrare prima questo punto; noi non scriviamo più in questo stile gli articoli scientifici.) L'orbita di Marte non era un cerchio. Era invece un'ellisse, con il Sole in uno dei fuochi («fuoco» viene da focus, una parola che in latino vuol dire «focolare» e che Kepler adottò a questo scopo).



Nell'Astronomia nova, Kepler ci rivela che in effetti tutte le orbite dei pianeti sono ellissi con il Sole in uno dei fuochi. Questa affermazione è conosciuta come la prima legge di Kepler, la legge delle ellissi. Kepler ci dice anche che un pianeta si muove più velocemente quando si trova nella parte dell'orbita più vicina al Sole e più lentamente in quella più lontana da esso. Inoltre, questa accelerazione e decelerazione del moto del pianeta presenta una regolarità notevolissima: una linea che congiunga il Sole al pianeta spazzerebbe aree uguali in tempi uguali. Questa è nota come la seconda legge di Kepler. Dieci anni dopo, nel 1619, Kepler pubblicò un altro libro, *Harmonices mundi (L'armonia del mondo)*, nel quale espose una terza legge. Le prime due leggi descrivono il moto di un singolo pianeta lungo la propria orbita. La terza legge confronta le orbite dei pianeti fra loro. Essa afferma che un pianeta percorre la propria orbita tanto più lentamente quanto più è lontano dal Sole. In particolare, la durata dell'anno per un pianeta (il tempo necessario a completare un'orbita) è proporzionale alla potenza due terzi della grandezza dell'orbita (tecnicamente, del diametro maggiore dell'ellisse). Nel loro insieme, queste tre affermazioni, le tre leggi di Kepler, costituiscono il suo grande contributo alla scienza. Nel 1627, Kepler pubblicò le *Tavole rodolfine*, così chiamate dal nome del suo protettore, Rodolfo II. Queste tavole astronomiche, basate allo stesso tempo sulle meticolose osservazioni di Tycho e sulle tre leggi di Kepler, resero l'astronomia cento volte più precisa di quanto fosse mai stata prima. All'incirca in quel periodo, in Italia, Galileo Galilei scriveva ne *Il Saggiatore*: « La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto davanti (io dico l'universo) ma non si può intendere se prima non si impara a intendere la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri sono figure triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche». Galileo non scriveva per celebrare le leggi di Kepler, di cui, per ironia della sorte, non riconobbe mai la validità, e che tanto meno accettò. Stava scrivendo, comunque, in difesa del sistema copernicano. Nel 1616, il teologo ufficiale della chiesa

cattolica, il cardinale Roberto Bellarmino, aveva dichiarato che il copernicanesimo era «falso ed erroneo» e aveva posto il libro di Copernico nell'Indice dei libri proibiti. Al momento, però, un nuovo papa era salito al soglio, Urbano VIII, a lungo amico e sostenitore di Galileo, e questi sperava di far deviare la chiesa dalla sua disastrosa rotta di collisione con la scienza. Non ci sarebbe riuscito.

Galileo era nato a Pisa, nel 1564, da un musicista, Vincenzio Galilei. (Le famiglie toscane dell'epoca amavano assegnare al figlio primogenito il cognome di famiglia come nome di battesimo.) Galileo studiò medicina all'Università di Pisa, ma si ritirò prima della laurea, per mancanza di denaro. Apprese la matematica come autodidatta, pubblicò alcuni saggi e si assicurò un posto come docente di matematica a Pisa. Qui egli scoprì la legge del pendolo (un pendolo impiega lo stesso intervallo di tempo a completare una oscillazione, qualunque sia l'ampiezza dell'arco descritto) e la legge di caduta dei gravi (ogni corpo, qualunque sia la sua massa, cade nel vuoto con la stessa accelerazione costante); realizzò anche una serie di esperimenti di cinematica, impiegando sfere e piani inclinati, addirittura inventando così la scienza sperimentale come oggi la conosciamo. (Il titolo del suo libro *Il Saggiatore* potrebbe essere reso in linguaggio moderno come «Lo Sperimentatore»). Sembra che egli abbia abbracciato il copernicanesimo piuttosto presto, ma abbia mantenute segrete le sue opinioni per paura del ridicolo. In una delle sue rare lettere a Kepler, più precisamente nel biglietto di ringraziamento per una copia del *Mysterium cosmographicum*, scrisse nel 1597, «Devo congratularmi con me stesso per avere nella ricerca della Verità un compagno che è amico della Verità.» «Verità», con la V maiuscola, è un riferimento mascherato ma inconfondibile a Copernico. Il sistema copernicano, comunque, non costituiva soltanto un'offesa al dogma aristotelico e ecclesiastico, ma sembrava anche un affronto al senso comune. Chiunque poteva facilmente vedere che la Terra era solidamente in quiete. Se la Terra ruotava intorno al proprio asse ed errava nello spazio, come pretendevano i copernicani, perché non si poteva percepire questo moto? Per evidenziare meglio la questione, consideriamo il seguente esperimento mentale: supponiamo che qualcuno lasci cadere un oggetto pesante dalla cima della torre di Pisa. A prescindere dalle nostre tendenze cosmologiche, tutti concorderemo almeno su questo: l'oggetto cadrà diritto ai piedi della torre (ignoriamo per il momento l'inclinazione della torre). Ma secondo i copernicani la Terra ruota intorno al proprio asse mentre l'oggetto cade. Se la forza di gravità fa sì che l'oggetto cada direttamente verso il centro della Terra, l'oggetto dovrebbe cadere in linea retta, mentre la torre se ne allontana nel moto di rotazione terrestre. Se ne allontana di quanto? Un oggetto impiega circa due secondi a raggiungere il suolo quando viene lasciato cadere dalla cima della torre. Date le dimensioni della Terra e il fatto che essa compie una rotazione completa in un giorno, non è difficile calcolare la distanza percorsa. La torre dovrebbe spostarsi di quasi un chilometro durante la caduta dell'oggetto. In altre parole, se Copernico avesse ragione e la Terra compisse ogni giorno una rotazione completa attorno al proprio asse, un oggetto lasciato cadere dalla cima della torre pendente di Pisa dovrebbe toccare terra un chilometro più in là. Il fatto che non accada nulla di simile sembra una confutazione piuttosto decisiva del copernicanesimo. Per i seguaci di Copernico nel secolo sedicesimo, il problema era che non soltanto tali obiezioni erano difficili da rintuzzare ma, cosa ancora peggiore, non sembrava esserci alcun punto di partenza per formulare una risposta. Quando Copernico aveva strappato la Terra dal centro dell'universo, aveva anche strappato via il cuore alla meccanica aristotelica, il collante intellettuale che teneva insieme tutto. Per esempio, perché un grave dovrebbe cadere, se non è alla ricerca del suo luogo naturale? Rispondere che esso cade a causa della gravità, come si faceva e ancora si fa, si limita a dare al mistero un nome. Per i seguaci di Copernico, il mondo aristotelico giaceva distrutto, e non c'era nulla che prendesse il suo posto. Questo era il dilemma che Galileo si

trovava di fronte. Volendo scoprire in che modo il mondo funzioni, Galileo concepì l'idea di realizzare esperimenti i cui risultati si potessero analizzare con l'aiuto della matematica. Si trattava di un'idea che avrebbe mutato il corso della storia umana. Galileo non poteva studiare direttamente la caduta dei corpi, perché essa è troppo rapida ed egli non disponeva di buoni orologi: i primi cronometri precisi, basati proprio sulla sua scoperta dell'isocronia del pendolo, sarebbero apparsi molto più tardi. Per rallentare il moto degli oggetti in caduta, egli misurò il tempo impiegato da una sfera rotolando lungo un piano leggermente inclinato, e reso il più levigato possibile per minimizzare l'attrito. (È possibile ammirare delle repliche dei suoi strumenti, costruite da abili artigiani, nel Museo di Storia della Scienza a Firenze.) Galileo sperimentò varie tecniche per misurare con precisione l'intervallo di tempo impiegato dalle sfere. Il modo migliore si rivelò quello di usare una specie di cronometro ad acqua. L'acqua scorreva da un primo a un secondo recipiente attraverso un tubo che egli poteva chiudere con un dito. Alla fine si pesava l'acqua che era passata nel secondo recipiente durante la discesa della sfera. Il peso dell'acqua era proporzionale all'intervallo di tempo trascorso. L'esperimento è stato ripetuto in tempi recenti e si è verificato che con un po' di pratica Galileo poteva raggiungere in questo modo una precisione di circa due decimi di secondo. Di rado, prima del ventesimo secolo, sono state realizzate misure di intervalli di tempo più precise di queste. Usando la tecnica che abbiamo descritto, Galileo determinò la legge di caduta dei gravi. Egli scoprì che nel doppio di un dato intervallo di tempo la sfera percorreva una distanza quattro volte maggiore. Tale risultato non cambiava se egli rendeva più o meno pronunciata l'inclinazione del piano, così, con un gigantesco sforzo di immaginazione, egli ipotizzò che questa relazione si sarebbe dimostrata vera anche nel caso di una pendenza verticale, e dunque di una caduta vera e propria. A questa assunzione egli fece seguire un'analisi matematica: se la distanza era proporzionale al quadrato del tempo, ciò implicava, come mostrò con argomentazioni geometriche, che il moto era uniformemente accelerato. Galileo immaginò, infine, che la caduta avvenisse nel vuoto. Nella meccanica aristotelica, in un luogo deve necessariamente trovarsi qualcosa. Immaginare un luogo nel quale non c'è nulla (cioè il vuoto) è una contraddizione in termini, un'impensabile assurdità logica. Ma Galileo si liberò almeno in parte dalle catene del pensiero aristotelico. Egli immaginò l'esistenza del vuoto e comprese che nel vuoto l'accelerazione di un corpo che cade non dipenderebbe dal peso del corpo; soltanto la resistenza dell'aria fa sì che i corpi più leggeri cadano più lentamente dei corpi più pesanti. Così la legge di caduta dei gravi risultò completa. Essa non spiegava, comunque, perché un corpo cada ai piedi della torre di Pisa invece che un kilometro più in là. Anche la risposta a questo dilemma giunse però da esperimenti con sfere e piani inclinati, Galileo scoprì che se una sfera veniva fatta rotolare giù da un piano inclinato e poi su per un secondo piano, essa mostrava la tendenza a rotolare sul secondo piano fino a raggiungere l'altezza da cui era partita. Se la pendenza del secondo piano era più ripida di quella del primo, la sfera rotolava per una distanza minore, mentre, se la pendenza era più dolce, la sfera rotolava per una distanza maggiore, raggiungendo in entrambi i casi l'altezza dalla quale era partita. Oggi noi interpretiamo questo fenomeno in termini di conservazione dell'energia. Ma Galileo vi vide qualcos'altro. Con un nuovo sforzo di immaginazione, egli argomentò che *se il secondo piano fosse stato orizzontale, la sfera non avrebbe mai smesso di rotolare*, perché non avrebbe mai raggiunto l'altezza di partenza. Così, concluse, lo stato naturale di un oggetto in moto su un piano orizzontale era di continuare a muoversi in orizzontale, a velocità costante, per sempre. Questa idea costituiva una rottura radicale con la filosofia aristotelica, per la quale ogni moto orizzontale richiedeva una causa prossima. Da questa idea sarebbe nata la prima delle leggi del moto di Newton, la legge di inerzia: Era proprio ciò che serviva per risolvere il dilemma dell'oggetto lasciato cadere dalla torre di Pisa, e, in generale, la questione più generale del perché non ci accorgiamo

del moto della Terra. La superficie della Terra e ogni cosa che vi si trovi sopra si muovono collettivamente di moto orizzontale, a causa della rotazione terrestre. Il loro stato naturale è quello di continuare in questo moto, così che a un osservatore sulla superficie della Terra ogni cosa, muovendosi insieme a lui, sembrerà immobile. Se l'esperimento della torre di Pisa fosse visto da un osservatore realmente in quiete, egli vedrebbe che sia la torre che l'oggetto che cade si muovono lungo una linea orizzontale, anche durante la caduta. È così che l'oggetto atterra ai piedi della torre. Lo stesso ragionamento, affermò Galileo, è valido per ogni proiettile, ad esempio una palla di cannone. Nella direzione orizzontale, la palla di cannone (se ignoriamola resistenza dell'aria) conserverebbe la velocità iniziale conferitale dallo scoppio delle polveri. Nel frattempo, nella direzione verticale, sarà all'opera la legge della caduta dei gravi, anche nella fase ascendente della traiettoria. Combinando i due tipi di moto, e scatenando la matematica a sua disposizione Galileo mostrò che la traiettoria di qualsiasi proiettile nelle vicinanze della superficie terrestre era una parabola. Nell'opera *Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze*, pubblicata nel 1638, egli scrisse che molti avevano già osservato che i proiettili seguono un qualche tipo di traiettoria curva, ma nessuno aveva ancora mostrato che si trattasse di una parabola. Galileo si riprometteva di dimostrarlo, insieme ad altre cose degne di nota, aprendo così la porta a una nuova scienza, vasta e di cruciale importanza. Di nuovo, Galileo era nel giusto: con la sua opera nasceva davvero una nuova, grande scienza. La sua scoperta che l'inerzia (intesa come la tendenza dei corpi a continuare a muoversi a velocità costante su una linea orizzontale) combinata con la gravità (rappresentata dalla legge di caduta dei gravi, a lui dovuta) dava origine nelle vicinanze della superficie della Terra a traiettorie che avevano la forma di una delle sezioni coniche, la parabola, fu proprio l'idea di cui si sarebbe servito più tardi Newton per mostrare in che modo funziona l'universo. I problemi che Galileo ebbe in seguito con la Chiesa (che costituiscono la materia per un racconto appassionante, ma non il soggetto di questo libro) ebbero l'effetto di espellere la Rivoluzione Scientifica dall'Italia. Essa avrebbe trovato asilo in Inghilterra, nella persona di Isaac Newton Sulla via per il nord, però, si fermò brevemente in Francia, dove trovò René Descartes. Descartes comprendeva le linee diritte. In effetti, il sistema a noi familiare delle coordinate cartesiane x-y-z prende nome da lui. La versione galileiana del principio di inerzia funzionava soltanto nella direzione orizzontale. Nella sua versione generalizzata, il moto orizzontale a velocità costante veniva sostituito dal moto circolare intorno al centro della Terra. Nonostante il suo ingegno, Galileo non poté sottrarsi a quest'ultimo ideale platonico. Descartes riuscì a raddrizzare tutto. Egli mise la legge di inerzia nella forma adottata da Newton: in assenza di forze esterne che agiscano su di esso, un corpo in quiete resterà in quiete e un corpo in movimento resterà in movimento, con velocità costante, lungo una linea retta.

Si suppone per lo più che **Isaac Newton** sia nato nel 1642, l'anno della morte di Galileo, come se fosse necessario che sulla Terra vi sia in ogni momento un genio di tali proporzioni. In realtà egli nacque il 4 gennaio 1643, secondo il calendario moderno e quello usato allora nell'Italia di Galileo. In Inghilterra, a causa delle difficoltà coniugali (o forse concettuali) di Re Enrico VIII, l'ultima riforma papale del calendario non era ancora stata adottata, e quella data figurava come il 25 dicembre del 1642. In ogni caso, Newton nacque prematuro e postumo, una coincidenza insolita. Suo padre (anch'egli di nome Isaac Newton) era morto tre mesi prima, e il nuovo Isaac era una creatura gracile, in apparenza non destinata a vivere per ottantaquattro anni. La madre di Isaac sperava che, da adulto, egli avrebbe amministrato le considerevoli proprietà lasciatele dal secondo marito, morto quando Isaac aveva circa undici anni. In effetti, se il padre di Isaac fosse vissuto più a lungo, o se il suo patrigno fosse stato una persona più umana, Isaac sarebbe diventato probabilmente un agricoltore piuttosto benestante ed estremamente intelligente. Ma un simile destino non si sa-

rebbe avverato. Al contrario, egli diventò un uomo le cui rabbie titaniche talvolta rasentavano l'aperta follia, e che alla fine della vita proclamò di essere rimasto vergine. Ma fu anche un uomo che avrebbe cambiato la storia umana come pochi altri hanno fatto. Nel 1661, il giovane Isaac si iscrisse al Trinity College, a Cambridge, dove il corso degli studi era ancora governato da Aristotele, ma dove la Rivoluzione Scientifica era già nell'aria. Newton si diplomò nel 1665, quindi fuggì nelle terre di famiglia nel Lincolnshire per sottrarsi alla peste bubbonica. Si ritiene che abbia realizzato molte delle sue importanti scoperte nei due anni che trascorse laggiù, ma il mondo non ne avrebbe avuto notizia se non molto più tardi. Fra i molti conseguimenti di Newton, il più importante fu quello di formulare un insieme di principi della dinamica ; destinati a rimpiazzare la visione aristotelica del mondo. Quando, nel 1687, egli pubblicò il suo capolavoro, i Principia, aveva ormai riassunto tali principi in tre leggi, accompagnate da un certo numero di definizioni e corollari. La prima legge corrispondeva al principio di inerzia, ereditato da Galileo e Descartes:

LEGGE I

Ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto uniforme e rettilineo, se qualche forza ad esso applicata non lo costringe a mutano.

La seconda legge di Newton, il vero punto centrale della sua dinamica, ci dice cosa accade quando effettivamente si imprimono a un corpo delle forze:

LEGGE II

Il mutamento nel moto è proporzionale alla forza motrice impressa; e segue la retta secondo cui tale forza è stata impressa.

In un passaggio precedente dei Principia, Newton aveva definito la quantità di moto come il prodotto della velocità (comprendendo in essa la direzione del moto) e della quantità di materia. È proprio la quantità che nella fisica attuale è talvolta chiamata anche momento lineare. Molto tempo dopo la morte di Newton, la seconda legge sarebbe stata riassunta nell'equazione $F = ma$ (forza uguale massa per accelerazione); Newton, comunque, non si espresse mai in questo modo.

La terza legge di Newton è nota come legge di azione e reazione:

LEGGE III

L'azione è sempre uguale e contraria alla reazione: cioè le mutue azioni di due corpi sono sempre eguali e dirette in senso opposto.

La terza legge permette di eliminare una complicazione potenziale nel problema del moto celeste. I pianeti (compresa la Terra) sono corpi estesi e complessi, le cui parti interne esercitano forze le une sulle altre. Secondo la legge di Newton, tali forze si cancellano a vicenda, indipendentemente dalla loro natura. Ogni forza esercitata da un elemento di un pianeta su un altro elemento è esattamente bilanciata da un'uguale forza del secondo elemento sul primo. Il risultato netto è che la natura estesa del pianeta può essere ignorata completamente nel calcolare il suo percorso intorno al Sole. Il pianeta si comporta esattamente come se la sua massa fosse concentrata in un punto geometrico posto nel suo centro. La terza legge implica anche che i pianeti imprimano sul Sole delle forze uguali e opposte a quelle esercitate dal Sole sui pianeti. Per aggirare ogni difficoltà dovuta a questo, Newton, nella sua dimostrazione, non fa riferimento al Sole ma a «un immobile centro di forza.» In effetti, egli assume (correttamente) che il Sole sia così massiccio da non essere

molto influenzato dalla spinta delle forze gravitazionali dei pianeti. La terza legge si sarebbe più tardi dimostrata vitale in altre aree della fisica: è da essa che discendono le leggi di conservazione della quantità di moto, del momento angolare e dell'energia. Quanto al problema del moto planetario, comunque, il suo merito principale è di far sì che tutti i suoi effetti possano essere ignorati. Le tre leggi di Newton sono i principi che sostituiscono i «moti naturali» e i «moti violenti» della meccanica aristotelica. A queste leggi, che si applicano a tutte le forze e a tutti i corpi, Newton aggiunse la determinazione di un tipo particolare di forza agente fra il Sole e i pianeti, o fra un pianeta e i suoi satelliti, o, in realtà, fra qualsiasi elemento di materia nell'universo e qualsiasi altro. Si trattava della forza di gravità; come vedremo, Newton usò la seconda e la terza legge di Kepler per dedurne le proprietà. In seguito egli dimostrò che le sue tre leggi, insieme alla legge della forza di gravità, davano origine alle orbite ellittiche dei pianeti. Isaac Newton inventò il calcolo differenziale e integrale. Ci sono pochi dubbi che egli abbia usato questi potenti strumenti di analisi per realizzare le sue grandi scoperte. Ma quando scrisse i Principia egli non aveva ancora pubblicato i suoi principi del calcolo infinitesimale. (Più tardi, fatto non insolito nella storia della scienza, ci sarebbe stata in proposito una spiacevole disputa di priorità con il filosofo e matematico tedesco Gottfried Leibniz, che aveva realizzato le stesse scoperte matematiche in modo indipendente.) I Principia sono esposti nei linguaggi allora consueti, il latino e la geometria euclidea. La ragione è abbastanza ovvia: Newton doveva rivolgersi ai suoi contemporanei in una lingua che tutti potessero capire. Isaac Newton è famoso per aver detto: «Se ho visto più lontano è perché sono salito sulle spalle di giganti.» I giganti erano Copernico, Brahe, Kepler, Galileo e Descartes. Prima di Newton, il collasso della visione aristotelica del mondo aveva lasciato dietro di sé soltanto confusione, senza che vi fosse il più lontano indizio di come essa potesse essere dissipata. Ognuno dei giganti di Newton mise a posto un pezzo di materiale da costruzione o parte dell'impalcatura, ma la forma e il disegno della struttura finale non poteva ancora essere scorto. Descartes pensava di vederlo, ma si sbagliava. Venne allora Newton, e d'un tratto il mondo fu di nuovo ordinato, prevedibile e comprensibile. Newton comprese i principi di funzionamento della struttura, e la prova del fatto che era nel giusto fu la sua dimostrazione della legge delle ellissi.

Tratto da:

Il moto dei pianeti intorno al Sole. Una lezione inedita di Richard Feynman, D.L. Goodstein, J.R. Goodstein, Zanichelli