CAPITOLO

4

Galileo Galilei

«La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo).»
— Galileo Galilei, Il Saggiatore § 6

OBIETTIVI

1. Ricostruire le tappe della vita e delle opere di Galileo, dal *Sidereus nuncius* al processo del 1633
2. Spiegare come Galileo distingue il compito della Scrittura da quello della scienza e confrontarlo con la posizione di Bellarmino
3. Descrivere il metodo galileiano: lingua matematica, sensate esperienze e necessarie dimostrazioni, idealizzazione ed esperimento mentale
4. Ricostruire gli argomenti del *Dialogo* sul moto della Terra e il principio di relatività
5. Esporre la legge di caduta dei gravi, il moto dei proiettili e la concezione galileiana dell'inerzia
6. Riconoscere nei *Principia* di Newton la sintesi di Galileo e Keplero e spiegare «hypotheses non fingo»

INDICE DEL CAPITOLO

4.1 Il cannocchiale e il nuovo cielo 3
4.2 Scienza e fede: le lettere copernicane e il processo 6
4.3 Il metodo: il libro della natura 9
4.4 Il «Dialogo»: la Terra si muove 12
4.5 Le due nuove scienze: la caduta dei gravi e i proiettili 15
4.6 Epilogo: Newton e la grande sintesi 19
4.7 Leggere i testi 20

Filosofia 4 · Parte I · L'uomo e la natura: Rinascimento e rivoluzione scientifica · versione 1.0
Capitolo 4: Galileo Galilei · pagine 111–140 del volume completo · estratto per lo studio

Nell'autunno del 1609 un professore di matematica dell'Università di Padova punta verso il cielo un tubo con due lenti, costruito con le sue mani. In pochi mesi vede cose che nessuno aveva mai visto: montagne sulla Luna, stelle a migliaia dove l'occhio nudo ne conta poche, quattro piccoli astri che girano intorno a Giove. Quel professore è Galileo Galilei, e da quel momento la discussione tra il sistema tolemaico e quello copernicano, che nel capitolo precedente hai visto aprirsi con Copernico e Keplero, smette di essere una questione per specialisti. Galileo la porta davanti a tutti, in italiano, e ci mette in gioco tre domande che riguardano anche la filosofia: con quale *metodo* si conosce la natura? Chi ha l'autorità di dire come è fatto il mondo, il teologo o lo scienziato? E che cosa dobbiamo pensare di ciò che vediamo, se la Terra si muove e noi non ce ne accorgiamo? Per queste risposte Galileo pagherà un prezzo altissimo; ma dalle sue opere nasce la fisica moderna, che Newton porterà a compimento.

Contesto

La vita di Galileo (1564–1642) attraversa la stagione della Controriforma: il Concilio di Trento si è chiuso nel 1563, l'anno prima della sua nascita, e la Chiesa vigila sull'interpretazione delle Scritture e sui libri a stampa con il Sant'Uffizio e la Congregazione dell'Indice. L'Italia è divisa: Galileo nasce a Pisa, nel Granducato di Toscana dei Medici, insegna per diciotto anni a Padova, nella Repubblica di Venezia, gelosa della propria indipendenza da Roma, e torna poi a Firenze. In Europa la Guerra dei Trent'anni (1618–1648) contrappone Stati cattolici e protestanti. È anche l'età delle prime accademie scientifiche, come quella romana dei Lincei, di cui Galileo diventa membro nel 1611. Negli stessi anni lavorano Keplero, che con Galileo corrisponde, e Cartesio, che rinuncerà a pubblicare il suo trattato sul mondo quando saprà della condanna del 1633; nel 1642, l'anno della morte di Galileo, nasce Isaac Newton (calendario giuliano; nel gregoriano, 1643). Le tappe principali sono nella Figura 4.1.

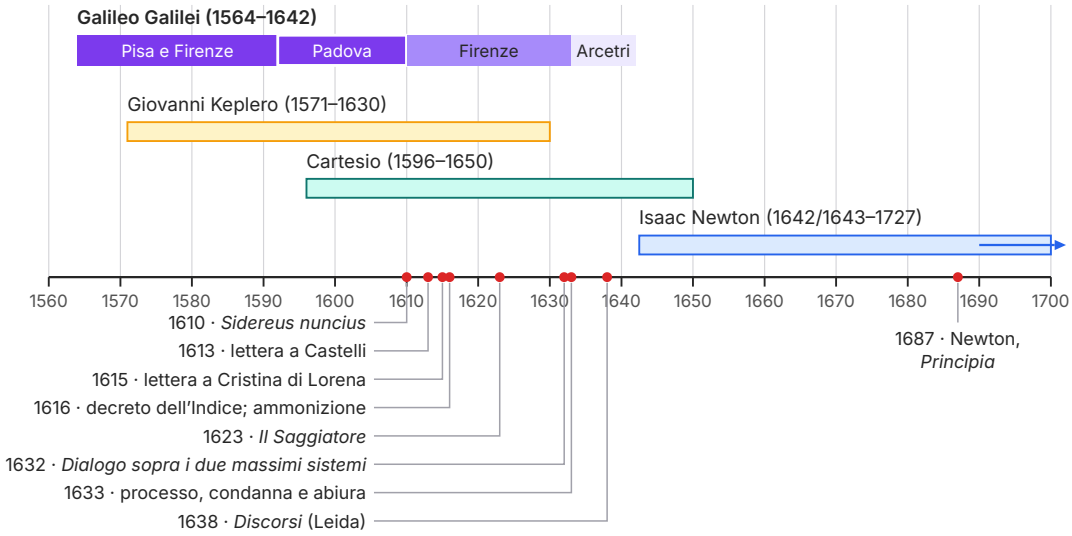


Figura 4.1 Galileo e i suoi contemporanei, 1560–1700: le fasi della vita di Galileo, le opere e gli eventi principali (in rosso), le vite di Keplero, Cartesio e Newton. Asse dei tempi in scala.

4.1 Il cannocchiale e il nuovo cielo

4.1.1 Da Pisa a Padova

Galileo Galilei nacque a Pisa il 15 febbraio 1564. Il padre Vincenzo, musicista e teorico della musica, lo avviò agli studi di medicina all'Università di Pisa, ma il giovane si appassionò alla geometria di Euclide e di Archimede e lasciò l'università senza laurearsi. Nel 1589 ottenne la cattedra di matematica a Pisa, e nel 1592 quella, più prestigiosa e meglio pagata, di Padova, dove restò fino al 1610. A Padova Galileo insegna la cosmologia tradizionale, perché questo prevedono i programmi, ma studia il moto dei corpi, progetta macchine e strumenti (un compasso di proporzione, che vende con un manuale d'uso), e si convince in privato della verità del sistema copernicano: in una lettera a Keplero del 1597 dichiara di esserne seguace da anni.

4.1.2 Il «Sidereus nuncius» (1610)

Nel 1609 giunge a Venezia la notizia che in Olanda si costruisce un occhiale capace di avvicinare gli oggetti lontani. Galileo ne capisce il principio, ne fabbrica uno sempre più potente, lo presenta al Senato veneziano e, soprattutto, lo rivolge al cielo. Nel marzo del 1610 pubblica a Venezia, in latino, il *Sidereus nuncius* («Messaggio» o «Annuncio celeste»), un libretto di poche decine di pagine che fa il giro d'Europa. Vi riferisce tre scoperte: la Luna non è una sfera perfet-

ta e liscia, ma ha montagne e valli come la Terra, di cui Galileo stima l'altezza dalla lunghezza delle ombre; la Via Lattea e le nebulose si risolvono in una moltitudine di stelle; intorno a Giove ruotano quattro «pianeti» mai visti, che chiama **pianeti medicei** in onore di Cosimo II de' Medici e dei suoi fratelli (oggi li chiamiamo satelliti galileiani).

Nessuna di queste osservazioni dimostra che la Terra si muove; ma ognuna incrina il cosmo aristotelico. Se la Luna ha montagne, la distinzione tra un mondo celeste perfetto, fatto di etere incorruttibile, e un mondo terrestre mutevole perde il suo fondamento. Se Giove trascina con sé quattro lune, cade l'obiezione secondo cui la Terra, muovendosi intorno al Sole, perderebbe per strada la sua Luna. E le stelle innumerevoli rendono più credibile un universo immensamente più grande di quello chiuso dalla sfera delle stelle fisse.

4.1.3 Le fasi di Venere e le macchie solari

Nell'autunno del 1610 Galileo osserva che Venere, come la Luna, presenta tutte le **fasi**: da falce sottile a disco quasi pieno, mentre il suo diametro apparente cambia molto. È la scoperta astronomica più importante, perché è incompatibile con il sistema tolemaico. Nel sistema di Tolomeo Venere gira su un epiciclo il cui centro resta sempre sulla retta che unisce la Terra al Sole, e il pianeta sta sempre tra noi e il Sole: dovremmo vederne soltanto falci, mai il disco pieno. Se invece Venere gira intorno al Sole, quando si trova al di là del Sole ci rivolge quasi tutta la faccia illuminata, piccola perché lontana; quando passa tra la Terra e il Sole ci mostra una falce grande, perché vicina (Figura 4.2).

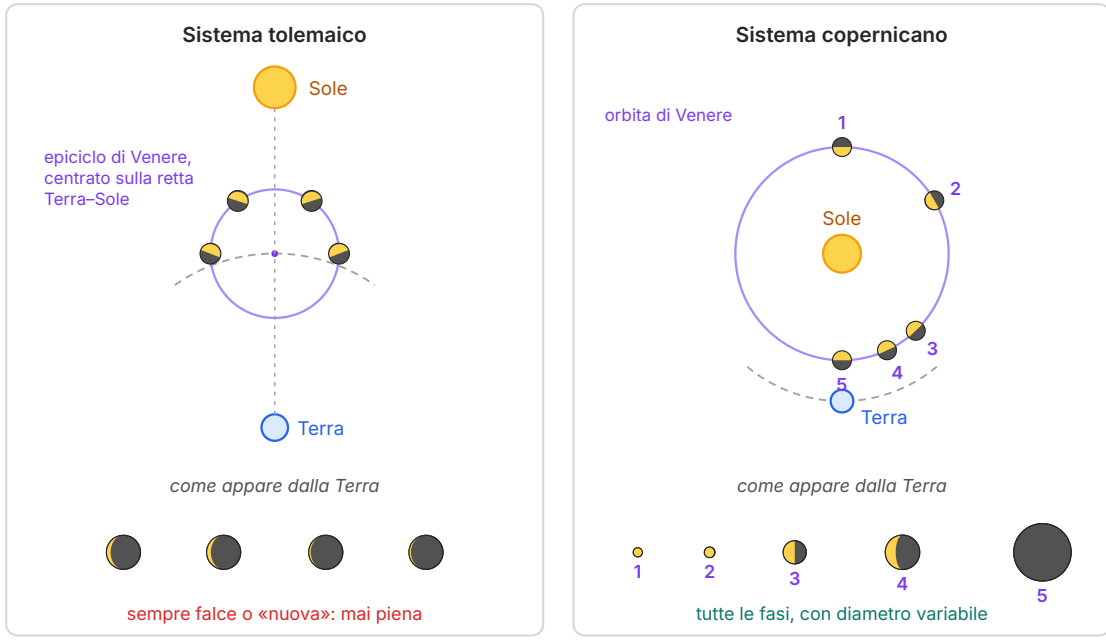


Figura 4.2 Le fasi di Venere. A sinistra, nel sistema tolemaico Venere resta tra la Terra e il Sole: si vedrebbero solo falci. A destra, nel sistema copernicano Venere gira intorno al Sole (raggio dell'orbita 0,723 unità astronomiche): dalla posizione 1 alla 5 passa da «piena» e piccola (distanza 1,72 UA) a «nuova» e grande (0,28 UA). Nella fila in basso i dischi sono disegnati con fase e diametro calcolati; in alto i pianeti hanno illuminata la metà rivolta al Sole. Schema non in scala per le distanze dal Sole nel sistema tolemaico.

ERRORE FREQUENTE

«Le fasi di Venere dimostrano il sistema copernicano.» Non è così. Dimostrano che Venere gira intorno al Sole, e quindi che il sistema tolemaico è falso; ma sono compatibili anche con il sistema di Tycho Brahe (capitolo precedente), in cui Venere e gli altri pianeti girano intorno al Sole mentre il Sole gira intorno alla Terra immobile. Per decidere tra Copernico e Tycho le fasi non bastano: serve una prova che la Terra si muove, ed è proprio quella che Galileo cercherà, senza trovarla, fino al *Dialogo*.

Negli stessi anni Galileo studia le macchie solari, che descrive nell'*Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari* (1613): anche il Sole, dunque, cambia, e dal moto delle macchie si ricava che ruota su se stesso. Ormai celebre, nel 1610 Galileo lascia Padova e torna in Toscana come «primario matematico» dello Studio di Pisa, senza obbligo di insegnare, e «filosofo» del granduca. Nel 1611 va a Roma, dove gli astronomi gesuiti del Collegio Romano confermano le sue osservazioni e dove viene accolto nell'Accademia dei Lincei. Per qualche anno sembra che tutto gli riesca.

4.2 Scienza e fede: le lettere copernicane e il processo

4.2.1 Le lettere a Castelli e a Cristina di Lorena

Il conflitto comincia a corte. Nel dicembre del 1613, durante un pranzo, la granduchessa madre Cristina di Lorena chiede a Benedetto Castelli, allievo di Galileo e professore a Pisa, come si possa conciliare il moto della Terra con la Bibbia, dove Giosuè ordina al Sole di fermarsi (Giosuè 10, 12–13). Galileo risponde con una lunga lettera a Castelli (21 dicembre 1613), che circola in copia e viene denunciata al Sant'Uffizio; nel 1615 ne sviluppa le tesi nella *Lettera a Cristina di Lorena*, destinata anch'essa a circolare manoscritta (sarà stampata solo nel 1636, a Strasburgo). Queste lettere, dette «copernicane», sono il testo filosofico più importante di Galileo sul rapporto tra scienza e fede (T1).

Il ragionamento è semplice e rigoroso. La Scrittura e la natura procedono entrambe da Dio, la prima dettata dallo Spirito Santo, la seconda come esecutrice delle sue leggi: dunque non possono contraddirsi, perché il vero non contraddice il vero. Ma la Scrittura, per farsi capire dal popolo, si esprime adattandosi al suo linguaggio: attribuisce a Dio mani, occhi, ira e pentimento, e nessun teologo la prende alla lettera in quei passi. È il **principio di accomodazione**, che Galileo trova già nei Padri della Chiesa, soprattutto in Agostino. La natura, al contrario, è «inesorabile ed immutabile» e non si cura di essere capita: segue le sue leggi e basta. Ne segue che nelle questioni naturali non si deve partire dai passi della Bibbia, ma dalle «sensate esperienze» e dalle «dimostrazioni necessarie»; quando una verità naturale è dimostrata, sono i teologi a dover cercare il vero senso dei passi che sembrano contraddirla. Le due autorità hanno campi diversi: la Scrittura insegna ciò che serve alla salvezza, la scienza come è fatto il mondo. Galileo condensa questa **autonomia della scienza** in una frase che attribuisce a un ecclesiastico di altissimo grado: l'intenzione dello Spirito Santo è «d'insegnarci come si vadia al cielo, e non come vadia il cielo» (*Lettera a Cristina di Lorena*).

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> La frase sul cielo non è di Galileo: Galileo la riferisce come detta da una «persona ecclesiastica costituita in eminentissimo grado», e una nota a margine del manoscritto la attribuisce al cardinale Cesare Baronio (1538–1607), storico della Chiesa. Galileo la usa proprio perché viene dall'interno della Chiesa: non intende attaccare la fede, ma mostrare che la sua posizione è compatibile con la tradizione cattolica. Per lo stesso motivo non va presentato come un «laico» ostile alla religione: si considerò sempre un credente.

4.2.2 Bellarmino: ipotesi o dimostrazione?

La risposta più seria viene dal cardinale Roberto Bellarmino, gesuita, il teologo più autorevole del tempo. Nel 1615 il carmelitano Paolo Antonio Foscarini pubblica un libro per mostrare che

il sistema copernicano si accorda con la Scrittura; Bellarmino gli scrive il 12 aprile 1615 una lettera che vale anche per Galileo. Gli argomenti sono tre. Primo: parlare del moto della Terra *ex suppositione*, cioè come di un'ipotesi che «salva le apparenze» e facilita i calcoli, è legittimo e prudente, e così aveva fatto, a suo dire, Copernico; affermare invece che la Terra si muove realmente è pericoloso. Secondo: il Concilio di Trento vieta di interpretare la Scrittura contro il consenso comune dei Padri, e tutti i Padri hanno inteso alla lettera i passi sul moto del Sole. Terzo: se ci fosse una vera dimostrazione del moto della Terra, bisognerebbe interpretare con molta cautela i passi contrari e dire piuttosto di non capirli; ma Bellarmino non crede che una tale dimostrazione esista, e ricorda che a chi sta su una nave sembra che si muova la riva, eppure il marinaio sa che è la nave a muoversi.

Su un punto Bellarmino e Galileo sono d'accordo: una vera dimostrazione costringerebbe a reinterpretare la Scrittura. Li divide altro. Per Bellarmino l'astronomia può restare un insieme di ipotesi utili, senza pretendere di dire come stanno le cose (una posizione che oggi chiameremmo strumentalismo); per Galileo la scienza descrive il mondo reale (realismo), e la fede non ha titolo per decidere tra due ipotesi astronomiche. E li divide l'onere della prova: Bellarmino chiede la dimostrazione prima di cambiare l'interpretazione, e su questo, nel 1615, ha ragione, perché la prova decisiva del moto della Terra ancora non c'è.

4.2.3 Il 1616

Nel febbraio del 1616 i teologi consultori del Sant'Uffizio qualificano la tesi del Sole immobile al centro del mondo come «stolta e assurda in filosofia» e formalmente eretica, e quella del moto della Terra come almeno erronea nella fede. Il 26 febbraio Bellarmino, per ordine del papa Paolo V, ammonisce Galileo ad abbandonare l'opinione copernicana. Il 5 marzo un decreto della Congregazione dell'**Indice** (l'elenco dei libri proibiti) sospende il *De revolutionibus* di Copernico «finché non sia corretto» e proibisce il libro di Foscarini. Il nome di Galileo non compare nel decreto, e Bellarmino gli rilascia un attestato secondo cui non ha dovuto abiurare nulla. Ma da quel momento il copernicanesimo si può presentare solo come ipotesi matematica.

4.2.4 Dal «Saggiatore» alla condanna

Nel 1623 diventa papa, con il nome di Urbano VIII, il cardinale fiorentino Maffeo Barberini, ammiratore di Galileo. Galileo gli dedica *Il Saggiatore* (1623), un libro polemico sulle comete contro il gesuita Orazio Grassi, che si firmava Lotario Sarsi: la teoria delle comete che vi sostiene è sbagliata, ma il libro contiene le pagine più famose sul metodo, che leggerai più avanti. Incoraggiato dal clima nuovo, Galileo lavora per anni al *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano*, pubblicato a Firenze nel 1632 con tutte le licenze ecclesiastiche. Il libro, formalmente, discute i due sistemi senza decidere; di fatto è una difesa del sistema copernicano, e l'argomento caro al papa (Dio, onnipotente, avrebbe potuto produrre gli stessi effetti in

altri modi, perciò nessuna teoria è certa) vi compare alla fine in bocca a Simplicio, il personaggio che ha avuto torto per tutto il libro.

La vendita viene sospesa e Galileo, quasi settantenne e malato, è convocato a Roma. Il processo verte su un punto preciso: Galileo ha violato il divieto del 1616? Il 22 giugno 1633 la sentenza lo dichiara «vehementemente sospetto d'eresia» per aver tenuto e creduto la dottrina copernicana; il *Dialogo* è proibito e Galileo, inginocchiato nel convento domenicano di Santa Maria sopra Minerva, pronuncia l'**abiura**, cioè rinnega solennemente le opinioni condannate. La pena del carcere è commutata in un confino: dopo alcuni mesi a Siena, presso l'arcivescovo Ascanio Piccolomini, Galileo vive fino alla morte nella sua villa di Arcetri, sulle colline di Firenze.

> **ERRORE FREQUENTE**
> Tre leggende da evitare. **1.** Galileo non fu torturato né condannato al rogo: fu minacciato di tortura nell'interrogatorio finale, secondo la procedura del tempo, e condannato al carcere, commutato nel confino. **2.** La frase «Eppur si muove», che avrebbe pronunciato dopo l'abiura, compare per la prima volta a stampa nel 1757, in un libro di Giuseppe Baretti pubblicato a Londra, oltre un secolo dopo i fatti: è una leggenda. **3.** L'esperimento dei gravi lasciati cadere dalla torre di Pisa è raccontato soltanto dal suo ultimo allievo e biografo, Vincenzo Viviani: Galileo non lo descrive mai, e molti storici ne dubitano.

4.2.5 Arcetri e l'ultima opera

Ad Arcetri, sorvegliato e diventato cieco nel 1638, Galileo completa l'opera scientificamente più importante, i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, che non potendo uscire in Italia sono stampati a Leida, in Olanda, nel 1638. Muore l'8 gennaio 1642.

APPROFONDIMENTO

Il «caso Galileo» nella storia. La condanna pesò a lungo sulla cultura cattolica. Nel 1741 papa Benedetto XIV concesse l'*imprimatur* a un'edizione delle opere di Galileo, uscita a Padova nel 1744 con il *Dialogo* accompagnato da una premessa che lo presentava come ipotesi; nel 1757 cadde il divieto generale dei libri che insegnavano il moto della Terra, e nel 1835 il *Dialogo* e il *De revolutionibus* non comparvero più nell'Indice. Nel 1979 Giovanni Paolo II propose di riesaminare il caso; una commissione lavorò dal 1981, e il 31 ottobre 1992, in un discorso alla Pontificia Accademia delle Scienze, il papa riconobbe l'errore dei teologi che avevano giudicato Galileo.

Anche il giudizio degli storici è cambiato: all'immagine ottocentesca di un conflitto inevitabile tra scienza e religione si è sostituito un quadro più complesso, in cui pesano la politica romana durante la Guerra dei Trent'anni, i rapporti personali con Urbano VIII e la debolezza delle prove di Galileo. Nel 2018 è stata ritrovata a Londra, negli archivi della Royal Society, la copia originale della lettera a Castelli: le correzioni di pugno di Galileo mostrano che, quando seppe della denuncia, ne attenuò alcune espressioni.

EDUCAZIONE CIVICA

«L'arte e la scienza sono libere e libero ne è l'insegnamento» (Costituzione della Repubblica italiana, art. 33, primo comma). E l'art. 9 aggiunge: «La Repubblica promuove lo sviluppo della cultura e la ricerca scientifica e tecnica». Nel caso di Galileo un'autorità decise quale teoria scientifica si potesse sostenere e insegnare. La Costituzione rovescia questo rapporto: nessun potere, politico o religioso, può stabilire per legge che cosa sia vero nella scienza, e lo Stato ha anzi il compito di sostenere la ricerca. La libertà della scienza non significa però che tutto sia lecito: le teorie si controllano con le prove e con la discussione tra gli studiosi, e la ricerca ha limiti posti dai diritti della persona. Discuti in classe: quali condizioni servono, oggi, perché la ricerca sia davvero libera?

4.3 Il metodo: il libro della natura

4.3.1 Una natura scritta in lingua matematica

Nel *Saggiatore* Galileo rimprovera al suo avversario di credere che per filosofare bisogna appoggiarsi all'autorità di qualche autore celebre, come se la filosofia fosse un libro di fantasia, «come l'Iliade e l'Orlando furioso». La risposta è una delle pagine più citate della storia della scienza: la filosofia è scritta nel «grandissimo libro» dell'universo, ma per leggerlo bisogna conoscerne la lingua, e «Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche» (*Il Saggiatore* § 6; T2). Due tesi sono contenute nell'immagine. Il vero sapere non si trova nei libri degli uomini, ma nella natura stessa, il libro che ci sta sempre «a-

perto innanzi a gli occhi»: è il rifiuto del principio di autorità, sia aristotelico sia scolastico. E la natura non si capisce con l'osservazione da sola: chi non sa la matematica guarda il libro senza poterlo leggere, e si aggira «per un oscuro laberinto».

Galileo continua così la tradizione platonica e pitagorica che vedeva nei numeri e nelle figure la struttura del mondo (l'hai incontrata nel volume dello scorso anno), ma la trasforma: la matematica non serve a contemplare un mondo ideale separato, ma a misurare e prevedere i fenomeni di questo mondo, la caduta di un sasso o il moto di un pianeta.

4.3.2 Qualità oggettive e «puri nomi»

Se la natura è scritta in lingua matematica, che cosa ne è dei colori, degli odori, dei sapori, che pure percepiamo nei corpi? Nel § 48 del *Saggiatore* Galileo distingue due tipi di proprietà. Quando pensiamo un corpo, siamo costretti a pensarlo con una figura, una grandezza, un luogo, in quiete o in moto, a contatto o no con altri corpi, uno o molti: sono i «primi e reali accidenti», che non si possono separare dalla materia. Che il corpo sia bianco o rosso, dolce o amaro, sonoro o muto, invece, la mente non è costretta a pensarlo. Questi caratteri esistono solo nel soggetto che sente: tolto l'animale, restano «puri nomi». L'esempio è il solletico: una mano che passa su una statua di marmo e poi su un uomo vivo fa sempre la stessa cosa, si muove e tocca; ma soltanto l'uomo vivo, toccato per esempio sotto la pianta dei piedi, sente il solletico. Il solletico non è nella mano, ma in chi lo prova. Così il calore non è una qualità del fuoco, ma l'effetto che il moto di minuscole particelle produce sul nostro corpo.

La filosofia successiva chiamerà le prime **qualità primarie**, oggettive e misurabili, e le seconde **qualità secondarie**, soggettive: i termini saranno fissati da Robert Boyle e da John Locke (ne parleremo nel capitolo dedicato all'empirismo), ma la distinzione è già tutta in Galileo. È una scelta di metodo con grandi conseguenze: la scienza si occupa solo di ciò che si può misurare, e il mondo descritto dalla fisica, fatto di figure e movimenti, è diverso dal mondo colorato e sonoro della nostra esperienza.

4.3.3 Sensate esperienze e necessarie dimostrazioni

Nella lettera a Cristina Galileo indica le due fonti della conoscenza naturale: le **sensate esperienze**, cioè le osservazioni condotte con i sensi, aiutati dagli strumenti, e le **necessarie dimostrazioni**, cioè i ragionamenti matematici che deducono conseguenze rigorose da principi. Nessuna delle due basta da sola. L'esperienza senza matematica resta una raccolta di fatti; la matematica senza esperienza può costruire mondi impossibili. La scienza nasce quando un'ipotesi espressa in forma matematica viene messa alla prova da un esperimento costruito apposta: Galileo lo chiama **cimento**, da «cimentare», mettere alla prova. Il nome passerà all'Accademia del Cimento, fondata a Firenze nel 1657 dai suoi allievi.

4.3.4 Idealizzazione ed esperimento mentale

L'esperienza quotidiana inganna: una palla di piombo cade più in fretta di una piuma, una pietra che rotola sul terreno si ferma. Aristotele aveva costruito la sua fisica proprio su queste osservazioni. Galileo procede al contrario: per trovare la legge bisogna togliere con il pensiero gli «impedimenti», come l'attrito o la resistenza dell'aria, e studiare il caso ideale (un piano perfettamente liscio, un corpo che cade nel vuoto), che in natura non si dà mai ma spiega tutti i casi reali come sue approssimazioni. Questa **idealizzazione** è la mossa decisiva della fisica moderna. A volte l'esperimento si può fare soltanto nella mente: l'**esperimento mentale** immagina una situazione e ne ricava, per pura coerenza, le conseguenze. Nel *Dialogo* Simplicio rimprovera a Salviati di non aver mai fatto la prova di cui parla, e Salviati risponde: «Io senza esperienza son sicuro che l'effetto seguirà come vi dico, perchè così è necessario che segua» (*Dialogo*, Giornata II). Lo schema della Figura 4.3 riassume il percorso.

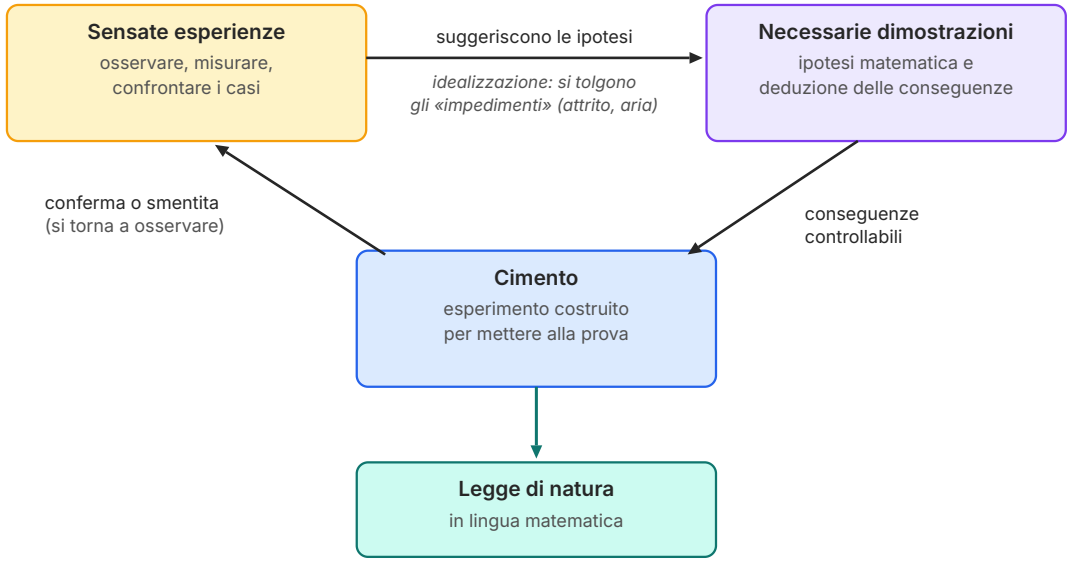


Figura 4.3 Il metodo di Galileo come ciclo: le osservazioni suggeriscono un'ipotesi matematica, idealizzata; dall'ipotesi si deducono conseguenze controllabili, che il cimento conferma o smentisce. Quando le conferme reggono, si ottiene una legge in lingua matematica.

APPROFONDIMENTO

Induttivo o ipotetico-deduttivo? Il metodo di Galileo è stato letto in modi opposti. Nell'Ottocento lo si presentava come il padre del metodo sperimentale e induttivo: osservare molti casi e ricavarne la legge. Nel Novecento lo storico Alexandre Koyré sostenne il contrario: Galileo sarebbe un platonico, che trova le leggi con la matematica e con gli esperimenti mentali, e molti dei suoi esperimenti non sarebbero mai stati eseguiti. Altri studiosi hanno poi rifatto le sue prove (nel 1961 Thomas Settle replicò il piano inclinato con strumenti dell'epoca, ottenendo risultati simili ai suoi) e studiato i suoi manoscritti, che contengono misure vere e calcoli. Oggi si parla spesso di metodo *ipotetico-deduttivo*: ipotesi, deduzione delle conseguenze, controllo sperimentale. Ma anche questa è un'etichetta posteriore, e Galileo non ha mai scritto un trattato sul metodo: il suo metodo si ricava da come lavora. Prova a decidere tu, dopo aver letto i testi del capitolo, quale lettura ti sembra più fedele.

4.4 Il «Dialogo»: la Terra si muove

4.4.1 Tre personaggi e quattro giornate

Il *Dialogo sopra i due massimi sistemi* (1632) è scritto in volgare, non in latino, perché Galileo vuole parlare non solo ai professori ma a tutte le persone colte. È un dialogo in quattro giornate, ambientato a Venezia nel palazzo di Giovanfrancesco Sagredo. Gli interlocutori sono tre. **Salviati**, che porta il nome di un amico fiorentino di Galileo, espone le tesi copernicane ed è il portavoce dell'autore. **Sagredo**, gentiluomo veneziano, rappresenta la persona intelligente e senza pregiudizi, che si lascia convincere dalle buone ragioni. **Simplicio**, filosofo aristotelico, porta il nome di Simplicio, un commentatore antico di Aristotele, ma il nome suona anche come «semplicione». La prima giornata smonta la distinzione aristotelica tra cielo incorruttibile e Terra corruttibile; la seconda discute il moto diurno della Terra; la terza il moto annuo intorno al Sole; la quarta le maree.

4.4.2 Gli argomenti contro il moto della Terra

Gli aristotelici avevano argomenti seri, presi dall'esperienza. Se la Terra ruotasse su se stessa da ovest verso est, un sasso lasciato cadere dalla cima di una torre dovrebbe toccare terra spostato verso ovest, perché nel tempo della caduta la torre si sarebbe spostata con la Terra; invece cade ai piedi della torre. Allo stesso modo, una palla di cannone sparata verso est dovrebbe andare meno lontano di una sparata verso ovest, gli uccelli e le nuvole dovrebbero restare indietro, e una Terra che gira così velocemente dovrebbe scagliare lontano i corpi, come una ruota che gira lancia il fango. La risposta di Galileo a tutti questi argomenti è la stessa: il moto che la Terra imprime ai corpi che stanno su di essa è *comune* a tutti, e un moto comune non si avverte.

ESEMPIO SVOLTO

Consegna. Ricostruisci in premesse e conclusione l'argomento della torre e indica dove Salviati lo attacca.

1. Se la Terra ruota, durante la caduta del sasso la torre si sposta verso est.
2. Il sasso, una volta lasciato, si muove solo verso il basso (non partecipa al moto della torre). *Premessa nascosta.*
3. Dunque, se la Terra ruota, il sasso deve cadere a ovest della base della torre (da 1 e 2).
4. Ma il sasso cade al piede della torre (esperienza).
5. Conclusione: la Terra non ruota (da 3 e 4, per *modus tollens*).

Analisi. L'argomento è valido: se le premesse sono vere, la conclusione segue. Salviati però mostra che la premessa 2 è falsa. Il sasso, finché sta sulla torre, si muove con essa, e conserva quel moto anche mentre cade; perciò cade al piede della torre sia che la Terra stia ferma sia che giri. L'esperienza 4 non decide nulla: è compatibile con entrambe le ipotesi. Galileo non ha dimostrato così che la Terra si muove, ma che l'argomento contro il suo moto non funziona.

4.4.3 La nave e il principio di relatività

Per rendere l'idea evidente, Salviati propone un esperimento celebre (T3). Chiudetevi con un amico nella stanza sottocoperta di una grande nave, con mosche, farfalle, un vaso con dei pesci e un secchio che gocciola in un vaso sottostante. Osservate tutto a nave ferma, poi fate muovere la nave di moto uniforme, alla velocità che volete: non noterete «una minima mutazione» negli effetti. Le gocce continueranno a cadere nel vaso, i pesci nuoteranno con la stessa fatica in ogni direzione, il vostro salto sarà uguale verso prua e verso poppa. Lo stesso vale per un sasso lasciato cadere dalla cima dell'albero: a chi è sulla nave appare cadere in verticale, lungo l'albero; a chi guarda dalla riva descrive una curva, perché partecipa del moto orizzontale della nave, e tocca comunque il piede dell'albero (Figura 4.4).

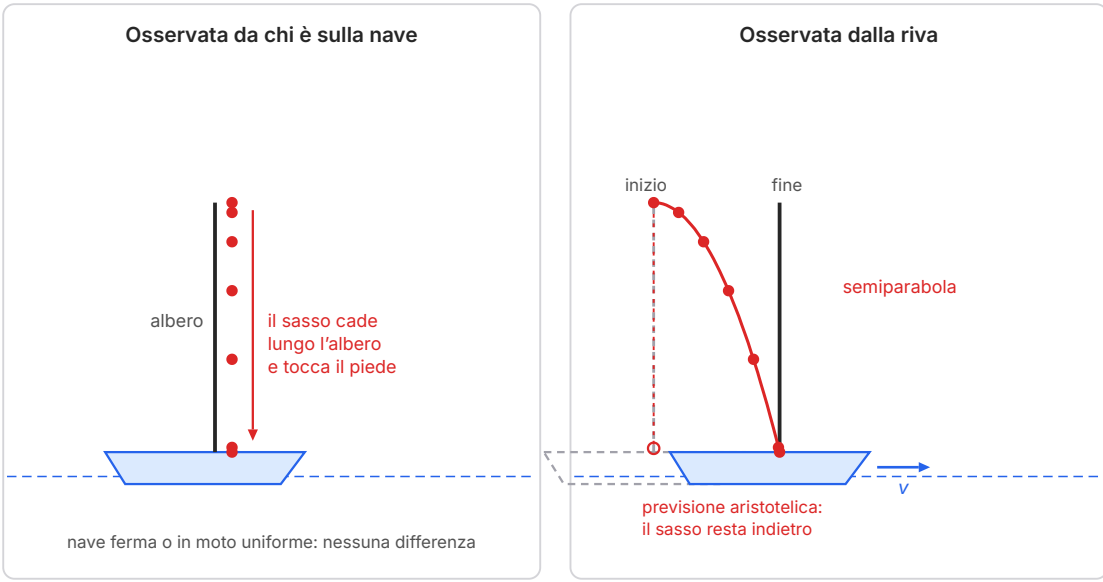


Figura 4.4 Il sasso lasciato cadere dalla cima dell'albero (altezza 20 m) di una nave che si muove a 5 m/s. La caduta dura circa 2,0 s; intanto la nave avanza di circa 10 m. Per chi è sulla nave il sasso cade lungo l'albero; per chi è a riva descrive una semiparabola e tocca ugualmente il piede dell'albero. I punti sono a intervalli di 0,4 s; la resistenza dell'aria è trascurata.

Da qui il **principio di relatività galileiana**: con esperimenti fatti all'interno di un sistema che si muove di moto rettilineo uniforme non si può stabilire se quel sistema è in moto o in quiete. Le leggi della meccanica valgono allo stesso modo in tutti questi sistemi, che la fisica di oggi chiama inerziali. La Terra, per Galileo, è come la grande nave: il fatto che non sentiamo il suo moto non prova che sia ferma.

COLLEGAMENTI

Fisica. Il principio di relatività di Galileo si studia in fisica con le *trasformazioni galileiane*: se un sistema si muove con velocità costante v rispetto a un altro, le posizioni si convertono con $x' = x - v\,t$ e le velocità si sommano. Nel 1905 Albert Einstein estese il principio a tutte le leggi fisiche, anche a quelle della luce, e per farlo dovette modificare quelle trasformazioni: è la relatività ristretta, che studierai al quinto anno. Il nome che usiamo, «relatività», è dunque l'eredità di una nave immaginata da Galileo.

4.4.4 La prova sbagliata: le maree

Il principio di relatività mostra che il moto della Terra non si può confutare con esperimenti terrestri; ma per la stessa ragione non si può nemmeno dimostrare con essi. Galileo sapeva che

gli serviva una prova fisica, e credette di trovarla nelle maree, a cui dedica la quarta giornata (il *Dialogo* doveva intitolarsi, in origine, al flusso e riflusso del mare). Ragionava così: per la combinazione della rotazione diurna e della rivoluzione annua, ogni punto della superficie terrestre accelera e rallenta nel corso del giorno, e l'acqua dei mari, come quella di un catino trasportato con scosse, oscilla avanti e indietro. Se la Terra fosse ferma, le maree non ci sarebbero.

> **ERRORE FREQUENTE**
> La teoria galileiana delle maree è **sbagliata**, e non va presentata come la grande prova del copernicanesimo. Prevede una sola alta marea al giorno, mentre di solito sono due, e non spiega perché il ritmo delle maree segua quello della Luna. Keplero aveva già attribuito le maree a un'azione della Luna sull'acqua; Galileo lo rifiuta, meravigliandosi che un ingegno così libero avesse dato ascolto «a predominii della Luna sopra l'acqua, ed a proprietà occulte, e simili fanciullezze» (*Dialogo*, Giornata IV). Sarà Newton a spiegare le maree con la gravitazione della Luna e del Sole. Anche un grande scienziato può sbagliare, e l'errore nasce qui proprio dal suo rifiuto delle «qualità occulte».

4.5 Le due nuove scienze: la caduta dei gravi e i proiettili

4.5.1 Definire prima di misurare

I *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638) ripresentano Salviati, Sagredo e Simplicio, ma l'argomento non è più l'astronomia: le due «scienze nuove» sono la resistenza dei materiali (prima e seconda giornata) e il moto locale (terza e quarta). Nella terza giornata Salviati legge un trattato latino dell'«Autore» sul moto dei gravi. Il punto di partenza non è un'osservazione, ma una definizione: il **moto naturalmente accelerato** (oggi diciamo uniformemente accelerato) è quello in cui la velocità cresce di quantità uguali in tempi uguali. Galileo spiega di averla scelta perché è la più semplice, e la natura, come mostrano i pesci che nuotano e gli uccelli che volano, usa i mezzi più semplici. In passato aveva supposto che la velocità crescesse in proporzione allo spazio percorso (lo scrive in una lettera a Paolo Sarpi del 1604): ora riconosce che quell'ipotesi porta a conseguenze assurde e la sostituisce con quella del tempo.

4.5.2 La legge dei numeri dispari

Dalla definizione Galileo deduce, con la sola geometria, due teoremi. Il primo dice che un corpo che parte da fermo e accelera uniformemente percorre lo stesso spazio che percorrerebbe in moto uniforme alla velocità media, cioè alla metà della velocità finale: è il teorema che hai già visto dimostrare da Oresme con il suo diagramma (volume precedente). Il secondo dice che gli spazi percorsi a partire dalla quiete stanno tra loro come i quadrati dei tempi: in 1, 2, 3, 4

unità di tempo, come 1, 4, 9, 16. Ne segue la **legge dei numeri dispari**: gli spazi percorsi in intervalli successivi uguali stanno come i numeri dispari 1, 3, 5, 7 (Figura 4.5).

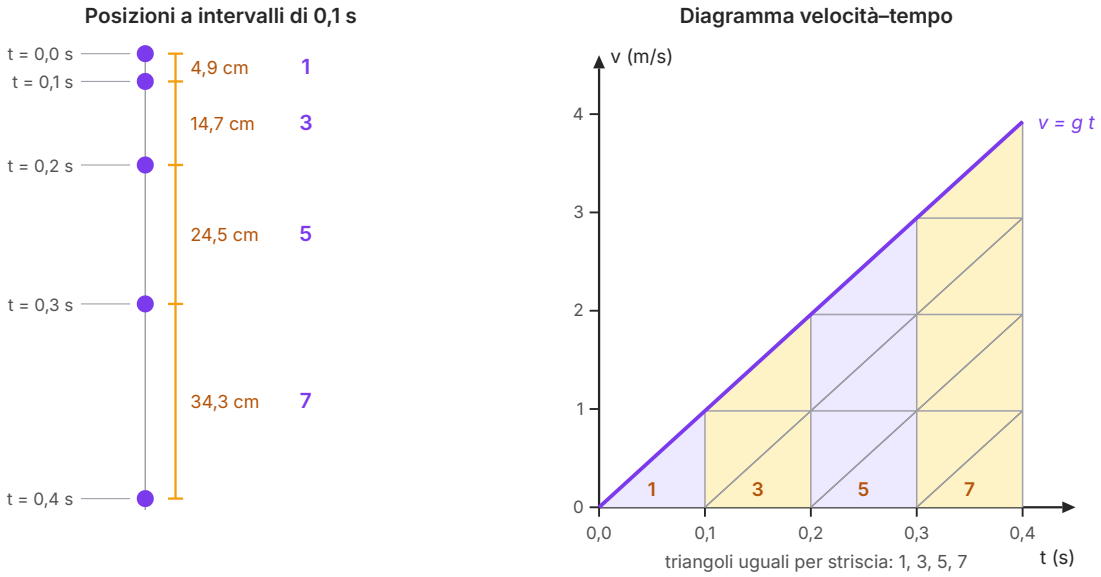


Figura 4.5 La legge dei numeri dispari. A sinistra, un corpo che cade da fermo, fotografato ogni 0,1 s (g = 9,81 m/s²): gli spazi percorsi nei quattro intervalli sono 4,9, 14,7, 24,5 e 34,3 cm, come 1 : 3 : 5 : 7. A destra, il diagramma velocità–tempo: lo spazio è l'area sotto la retta, e la striscia di ogni intervallo contiene 1, 3, 5, 7 triangoli uguali.

ESEMPIO SVOLTO

Consegna. Un sasso cade da fermo. Nel primo decimo di secondo percorre 4,9 cm. Quanto percorre nei tre decimi successivi, e quanto in tutto dopo 0,4 s?

1. Gli spazi nei quattro intervalli uguali stanno come 1 : 3 : 5 : 7.
2. Quindi: 4,9 cm; 3 · 4,9 = 14,7 cm; 5 · 4,9 = 24,5 cm; 7 · 4,9 = 34,3 cm.
3. Totale: 4,9 + 14,7 + 24,5 + 34,3 = 78,4 cm.
4. Controllo con la legge dei quadrati: dopo 4 intervalli lo spazio è $4^2 = 16$ volte quello del primo, cioè 16 · 4,9 = 78,4 cm. Con la formula moderna, $\frac{1}{2} \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}4^2 = 0{,}785$ m: la differenza dipende solo dall'arrotondamento di 4,905 cm a 4,9.

Si noti che 1 = 1, 1 + 3 = 4, 1 + 3 + 5 = 9, 1 + 3 + 5 + 7 = 16: la somma dei primi n numeri dispari è n^2, ed è per questo che le due leggi dicono la stessa cosa.

4.5.3 Il piano inclinato

La caduta libera è troppo veloce per essere misurata con gli orologi del tempo. Galileo la «rallenta» con un piano inclinato: una palla di bronzo rotola in una scanalatura levigata, lunga circa dodici braccia, e i tempi si misurano pesando l'acqua che esce da un secchio attraverso un tubicino sottile. Lasciando scendere la palla per un quarto del canale, racconta Salviati, il tempo risultava «sempre puntualissimamente» la metà di quello dell'intero percorso; e la proporzione tra spazi e quadrati dei tempi si confermava per tutte le inclinazioni del piano, in «esperienze ben cento volte replicate» (*Discorsi*, Giornata III). Galileo usa inoltre un principio: la velocità che un corpo acquista scendendo lungo piani diversamente inclinati dipende solo dall'altezza della discesa, non dall'inclinazione (Figura 4.6).

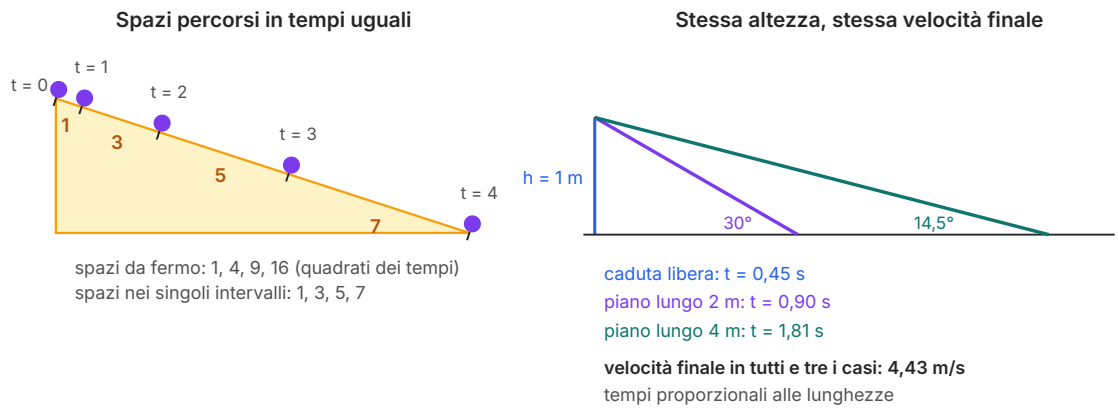


Figura 4.6 Il piano inclinato. A sinistra, le posizioni di una palla in tempi uguali: dalla partenza le distanze crescono come 1, 4, 9, 16, nei singoli intervalli come 1, 3, 5, 7. A destra, due piani alti 1 m e lunghi 2 m e 4 m, confrontati con la caduta libera (attriti e rotolamento trascurati): i tempi di discesa sono proporzionali alle lunghezze (0,45 s, 0,90 s, 1,81 s), la velocità finale è sempre 4,43 m/s.

4.5.4 L'inerzia secondo Galileo

Il piano inclinato porta Galileo vicino a un'idea nuova. Una palla che scende lungo un piano accelera; una che sale rallenta; dunque su un piano orizzontale, senza attriti, non dovrebbe né accelerare né rallentare, ma conservare per sempre la sua velocità. È il nucleo del principio di **inerzia**: un corpo non ha bisogno di una causa per continuare a muoversi, ma per cambiare il suo moto. È il contrario della fisica di Aristotele, per cui ogni moto violento cessa quando cessa il motore, e anche della teoria dell'*impetus*, per cui la forza impressa al proiettile si consuma da sola. Ma in Galileo l'inerzia non ha ancora la forma che le daranno i suoi successori. Il «piano orizzontale» di Galileo, se prolungato, è una superficie sferica intorno al centro della Terra, e il

moto che si conserva spontaneamente è, nel *Dialogo*, il moto circolare; solo quando studia i proiettili, su distanze brevi, Galileo tratta il moto orizzontale come rettilineo e uniforme.

IN SINTESI

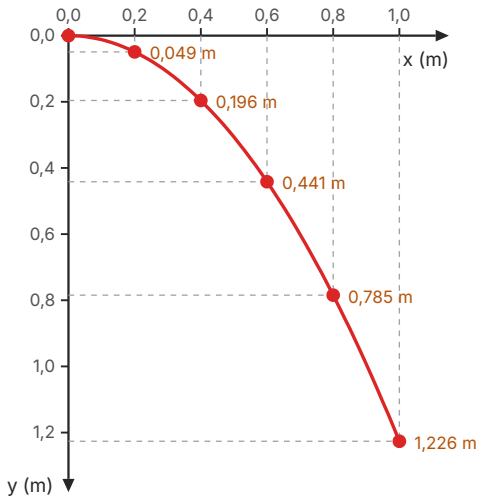
Tabella 4.1 Tre tappe del principio di inerzia.

	Galileo, *Dialogo* (1632) e *Discorsi* (1638)	Cartesio, *Principia philosophiae* (1644)	Newton, *Principia* (1687)
Che cosa si conserva	il moto su un piano «orizzontale» senza impedimenti; nel cosmo, il moto circolare	lo stato di moto di ogni corpo, in linea retta	lo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme
Forma	osservazione ricavata dal piano inclinato, non ancora legge generale	legge della natura, dedotta dall'immutabilità di Dio	prima legge del moto, base della dinamica
Che cosa cambia il moto	il peso, gli attriti, l'aria	l'urto con altri corpi	una forza: $F = m\,a$ (seconda legge)

Si dice spesso che Galileo abbia scoperto il primo principio della dinamica: è vero solo in parte. Galileo ha capito che il moto si conserva senza bisogno di un motore, ma non lo ha formulato come legge universale del moto rettilineo: per lui il moto naturalmente conservato è, nel cosmo, circolare. La formulazione rettilinea è di Cartesio (lo vedrai nel prossimo capitolo), quella che usiamo è di Newton.

4.5.5 La parabola dei proiettili

Nella quarta giornata Galileo applica i risultati ai proiettili e ottiene il suo teorema più elegante. Un corpo lanciato orizzontalmente ha due moti indipendenti: in orizzontale conserva la sua velocità e percorre spazi uguali in tempi uguali; in verticale cade di moto naturalmente accelerato, con spazi come 1, 4, 9, 16. Componendo i due moti, la traiettoria è una semiparabola (Figura 4.7). Galileo dimostra anche che, a parità di velocità iniziale, la gittata massima si ottiene lanciando a 45°, e calcola tavole di tiro per gli artiglieri. Per la prima volta una curva studiata dai geometri greci, la parabola di Apollonio, descrive un moto reale: il libro della natura è davvero scritto con figure geometriche.



Lancio orizzontale, v_0 = 2 m/s

punti a intervalli di 0,1 s

orizzontale: moto uniforme
$x = v_0 t$ → passi uguali di 0,2 m

verticale: moto accelerato
$y = \frac{1}{2} g t^2$ → cadute come 1, 4, 9, 16, 25

composizione: semiparabola
$y = (g / 2v_0^2) \cdot x^2 = 1{,}226 \cdot x^2$

Figura 4.7 La traiettoria di un corpo lanciato orizzontalmente a 2 m/s, calcolata con g = 9,81 m/s² a intervalli di 0,1 s (resistenza dell'aria trascurata). Gli spostamenti orizzontali sono uguali (0,2 m); le cadute verticali, 0,049, 0,196, 0,441, 0,785, 1,226 m, stanno come 1, 4, 9, 16, 25. La curva è una semiparabola.

4.6 Epilogo: Newton e la grande sintesi

Galileo muore nel gennaio del 1642; Isaac Newton nasce a Woolsthorpe, in Inghilterra, alla fine dello stesso anno secondo il calendario inglese di allora. Studia a Cambridge, dove dal 1669 occupa la cattedra di matematica, e negli anni 1665–1666, mentre l'università è chiusa per la peste, getta le basi del calcolo infinitesimale, della teoria dei colori e della teoria della gravitazione. Nel 1687 pubblica a Londra, con l'approvazione della Royal Society, i *Philosophiae naturalis principia mathematica* («Principi matematici della filosofia naturale»): già il titolo dice che la filosofia della natura si scrive in lingua matematica.

I *Principia* si aprono con tre leggi del moto. La prima è il principio di inerzia nella sua forma definitiva: ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, se non è costretto a mutarlo da forze impresse. La seconda lega la variazione del moto alla forza; la terza afferma che a ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria. Nel terzo libro Newton mostra che una sola forza, la **gravitazione universale**, proporzionale alle masse dei corpi e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza, spiega insieme la caduta dei gravi studiata da Galileo, le orbite dei pianeti descritte dalle leggi di Keplero, il moto della Luna, le comete e le maree. La distinzione aristotelica tra fisica terrestre e fisica celeste, già incrinata dal cannocchiale, cade definitivamente: in cielo e in Terra valgono le stesse leggi.

ESEMPIO SVOLTO

Consegna. Newton confrontò la caduta di un sasso con la «caduta» della Luna verso la Terra. Verifica il suo ragionamento con valori moderni: la Luna dista 384 400 km dal centro della Terra, circa 60,3 raggi terrestri (raggio 6371 km), e compie un giro in 27,32 giorni.

1. Accelerazione della Luna verso la Terra (moto circolare): $a = 4\pi^2 r / T^2$. Con $r = 3{,}844 \cdot 10^8$ m e $T = 27{,}32 \cdot 86\,400$ s $= 2{,}360 \cdot 10^6$ s si ottiene $a \approx 0{,}00272$ m/s^2.
2. Se la gravità diminuisce con il quadrato della distanza, alla distanza della Luna deve valere $g / 60{,}3^2 = 9{,}81 / 3636 \approx 0{,}00270$ m/s^2.
3. I due valori coincidono entro circa l'1 %: la forza che fa cadere il sasso è la stessa che trattiene la Luna in orbita.

È la sintesi di Galileo (la caduta dei gravi) e di Keplero (il moto dei corpi celesti), unificati da una sola legge matematica.

Newton è anche un pensatore del metodo. All'inizio del terzo libro enuncia alcune «regole del filosofare» (*regulae philosophandi*): per esempio, non si devono ammettere più cause di quelle vere e sufficienti a spiegare i fenomeni, e agli effetti dello stesso genere si devono assegnare, per quanto possibile, le stesse cause. Nella seconda edizione (1713) aggiunge uno *Scholium generale*, in cui risponde a chi gli rimprovera di aver introdotto nella fisica una forza misteriosa che agisce a distanza. Newton ammette di non conoscere la causa della gravità e dichiara: **«hypotheses non fingo»**, «non invento ipotesi» (T4). Non significa che rifiuti ogni ipotesi, ma che non vuole costruire spiegazioni non ricavate dai fenomeni: basta che la gravità esista e agisca secondo leggi precise, controllate dall'esperienza. Galileo aveva rinunciato a cercare l'essenza della gravità per descriverne la legge; Newton fa lo stesso su scala cosmica. La fortuna di Newton nella cultura europea del Settecento, il «newtonianesimo», sarà al centro del capitolo sull'Illuminismo.

4.7 Leggere i testi

4.7.1 T1 · La Scrittura, la natura e le dimostrazioni

Nota introduttiva. Nella lettera alla granduchessa madre Cristina di Lorena (1615) Galileo ha appena ricordato che la Scrittura, per adattarsi alla capacità del popolo, attribuisce a Dio mani, occhi e passioni umane, e che i teologi ne cercano il vero senso. Ora ne trae le conseguenze per le questioni naturali. Il testo è nell'italiano di Galileo; «universale» vale «popolo», «essecutrice» «esecutrice», «sembiante» «aspetto».

> Stante, dunque, ciò, mi par che nelle dispute di problemi naturali non si dovrebbe cominciare dalle autorità di luoghi delle Scritture, ma dalle sensate esperienze e dalle di-

> mostrazioni necessarie: perchè, procedendo di pari dal Verbo divino la Scrittura Sacra e la natura, quella come dettatura dello Spirito Santo, e questa come osservantissima esecutrice de gli ordini di Dio; ed essendo, di più, convenuto nelle Scritture, per accommodarsi all'intendimento dell'universale, dir molte cose diverse, in aspetto e quanto al nudo significato delle parole, dal vero assoluto; ma, all'incontro, essendo la natura inesorabile ed immutabile, e mai non trascendente i termini delle leggi impostegli, come quella che nulla cura che le sue recondite ragioni e modi d'operare sieno o non sieno esposti alla capacità degli uomini; pare che quello degli effetti naturali che o la sensata esperienza ci pone dinanzi a gli occhi o le necessarie dimostrazioni ci concludono, non debba in conto alcuno esser revocato in dubbio, non che condennato, per luoghi della Scrittura che avessero nelle parole diverso sembiante; poi che non ogni detto della Scrittura è legato a obblighi così severi com'ogni effetto di natura, né meno eccellentemente ci si scuopre Iddio negli effetti di natura che ne' sacri detti delle Scritture [...]
>
> Ma non per questo voglio inferire, non doversi aver somma considerazione de i luoghi delle Scritture Sacre; anzi, venuti in certezza di alcune conclusioni naturali, doviamo servircene per mezi accomodatissimi alla vera esposizione di esse Scritture ed all'investigazione di quei sensi che in loro necessariamente si contengono, come verissime e concordi con le verità dimostrate. [...]
>
> (Galileo, *Lettera a madama Cristina di Lorena*, 1615; Edizione Nazionale, vol. V, pp. 316–317)

Parole chiave: sensate esperienze, dimostrazioni necessarie, accomodarsi all'intendimento, natura inesorabile, vera esposizione delle Scritture.

1. Quali sono le due fonti della conoscenza naturale secondo Galileo, e da quale fonte non si deve «cominciare»?
2. Perché la Scrittura dice cose «diverse … dal vero assoluto», mentre la natura non lo fa mai?
3. Che cosa devono fare i teologi quando una conclusione naturale è stata dimostrata? Galileo sottrae la Scrittura a ogni rapporto con la scienza?
4. Confronta il testo con la posizione di Bellarmino: su quale punto i due sono d'accordo, e su quale no?

4.7.2 T2 · Il libro dell'universo e i «puri nomi»

Nota introduttiva. Nel *Saggiatore* (1623) Galileo risponde, punto per punto, alla *Libra astronomica* di Orazio Grassi, che si firmava Lotario Sarsi. Nel primo brano lo rimprovera di cercare un autore da seguire (Grassi aveva difeso il sistema di Tycho); nel secondo, verso la fine del libro, spiega che cosa sia il calore e per farlo distingue due tipi di proprietà dei corpi. «Discorso» vale «ragionamento», «suggetto» «soggetto».

> Parmi, oltre a ciò, di scorgere nel Sarsi ferma credenza, che nel filosofare sia necessario appoggiarsi all'opinioni di qualche celebre autore, sì che la mente nostra, quando non si maritasse col discorso d'un altro, ne dovesse in tutto rimanere sterile ed infeconda; e forse stima che la filosofia sia un libro e una fantasia d'un uomo, come l'Iliade e l'Orlando furioso, libri ne' quali la meno importante cosa è che quello che vi è scritto sia vero. Signor Sarsi, la cosa non istà così. La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto. (§ 6)
>
> Per tanto io dico che ben sento tirarmi dalla necessità, subito che concepisco una materia o sostanza corporea, a concepire insieme ch'ella è terminata e figurata di questa o di quella figura, ch'ella in relazione ad altre è grande o piccola, ch'ella è in questo o quel luogo, in questo o quel tempo, ch'ella si muove o sta ferma, ch'ella tocca o non tocca un altro corpo, ch'ella è una, poche o molte, né per veruna imaginazione posso separarla da queste condizioni; ma ch'ella debba essere bianca o rossa, amara o dolce, sonora o muta, di grato o ingrato odore, non sento farmi forza alla mente di doverla apprendere da cotali condizioni necessariamente accompagnata: anzi, se i sensi non ci fussero scorta, forse il discorso o l'immaginazione per se stessa non v'arriverebbe già mai. Per lo che vo io pensando che questi sapori, odori, colori, etc., per la parte del suggetto nel quale ci par che riseggano, non sieno altro che puri nomi, ma tengano solamente lor residenza nel corpo sensitivo, sì che rimosso l'animale, sieno levate ed annichilate tutte queste qualità [...] (§ 48)
>
> (Galileo, *Il Saggiatore*, § 6 e § 48)

Parole chiave: grandissimo libro, lingua matematica, caratteri, primi e reali accidenti, puri nomi, corpo sensitivo.

1. Che cosa rimprovera Galileo al Sarsi nel primo brano? Che cosa hanno in comune, ai suoi occhi, un libro di filosofia aristotelica e l'*Orlando furioso*?
2. Che cosa serve per leggere il «grandissimo libro», e che cosa accade a chi non lo possiede?
3. Elenca le proprietà che la mente non può separare da un corpo e quelle che può separarne. Quale criterio usa Galileo?
4. Perché colori, odori e sapori sarebbero «puri nomi»? Ti sembra una conclusione convincente? Prova a pensare a un'obiezione.

4.7.3 T3 · La grande stanza sottocoperta

Nota introduttiva. Nella seconda giornata del *Dialogo* (1632) Salviati ha discusso a lungo gli argomenti contro la rotazione della Terra: la torre, i tiri di cannone, gli uccelli. Per mostrare che nessuno di essi decide la questione, propone una prova da fare su una nave. «Navilio» e «vassello» sono la nave, «tavolato» il pavimento di legno, «palmi» un'unità di lunghezza.

> Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benchè niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; chè (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, nè da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima, nè, perchè la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benchè, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; [...] le gocciole cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benchè, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; [...]
>
> E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è cagione l'esser il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che per ciò dissi io che si stesse sotto coverta [...]
>
> (Galileo, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Giornata II; Edizione Nazionale, vol. VII, pp. 212–213)

Parole chiave: sotto coverta, moto uniforme, minima mutazione, moto comune.

1. Quali fenomeni bisogna osservare nella stanza, prima a nave ferma e poi a nave in moto?
2. Quale condizione pone Salviati sul moto della nave? Perché è indispensabile?
3. Perché è importante che gli osservatori stiano «sotto coverta»? Che cosa accadrebbe all'aria aperta?

4. Applica il ragionamento alla Terra: che cosa dimostra, e che cosa non dimostra, questo esperimento mentale?

4.7.4 T4 · Newton: «non invento ipotesi»

Nota introduttiva. Lo *Scholium generale* chiude la seconda edizione dei *Principia* (1713). Newton ha appena criticato la teoria cartesiana dei vortici e parlato di Dio come signore dell'universo; nelle ultime pagine torna alla gravità, che aveva usato per spiegare il moto dei pianeti, delle comete e del mare. «Hypotheses non fingo»: il verbo latino *fingere* significa «inventare», «immaginare».

> Finora ho spiegato i fenomeni dei cieli e del nostro mare mediante la forza di gravità, ma non ho ancora assegnato la causa della gravità. Questa forza nasce certamente da qualche causa che penetra fino ai centri del Sole e dei pianeti senza che la sua virtù diminuisca, e che agisce non secondo la quantità delle superfici delle particelle su cui agisce (come sogliono le cause meccaniche), ma secondo la quantità di materia solida; e la sua azione si estende in ogni direzione a distanze immense, decrescendo sempre in ragione del quadrato delle distanze. [...]
>
> Ma la ragione di queste proprietà della gravità non sono ancora riuscito a dedurla dai fenomeni, e non invento ipotesi. Tutto ciò che non si deduce dai fenomeni, infatti, si deve chiamare ipotesi; e le ipotesi, siano metafisiche o fisiche, di qualità occulte o meccaniche, non hanno posto nella filosofia sperimentale. In questa filosofia le proposizioni si deducono dai fenomeni e si rendono generali per induzione. Così ci sono divenute note l'impenetrabilità, la mobilità e la forza d'urto dei corpi, e le leggi dei moti e della gravità. Ed è sufficiente che la gravità esista realmente, agisca secondo le leggi da noi esposte e basti a spiegare tutti i moti dei corpi celesti e del nostro mare.
>
> (Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, 2ª ed., 1713, libro III, *Scholium generale*; traduzione della redazione)

Parole chiave: causa gravitatis (causa della gravità), *phaenomena* (fenomeni), *hypotheses non fingo* (non invento ipotesi), *inductio* (induzione), *philosophia experimentalis* (filosofia sperimentale).

1. Quali proprietà della gravità Newton conosce, e che cosa invece ammette di non conoscere?
2. Come definisce Newton l'«ipotesi»? Quali tipi di ipotesi esclude dalla filosofia sperimentale?
3. Come si ottengono, in questa filosofia, le proposizioni generali?
4. In che senso l'atteggiamento di Newton continua quello di Galileo, che nei *Discorsi* rinuncia a cercare la causa dell'accelerazione dei gravi per descriverne la legge?

SINTESI

- Galileo Galilei (1564–1642) insegna a Pisa e a Padova (1592–1610); con il cannocchiale scopre le montagne della Luna, le stelle della Via Lattea e i quattro **pianeti medicei** (*Sidereus nuncius*, 1610), poi le **fasi di Venere** e le macchie solari.
- Le fasi di Venere confutano il sistema tolemaico ma non quello di Tycho: non sono una prova del moto della Terra.
- Nelle **lettere copernicane** (a Castelli, 1613; a Cristina di Lorena, 1615) Galileo sostiene che Scrittura e natura non possono contraddirsi; la Scrittura si adatta al popolo e insegna «come si vadia al cielo» (frase attribuita al cardinale Baronio); nelle questioni naturali decidono le **sensate esperienze** e le **necessarie dimostrazioni**.
- Bellarmino (lettera a Foscarini, 1615) ammette il copernicanesimo come ipotesi *ex suppositione* e chiede una vera dimostrazione prima di reinterpretare la Scrittura.
- 1616: censura dei teologi, ammonizione a Galileo, decreto dell'Indice (5 marzo). 1632: *Dialogo*. 22 giugno 1633: Galileo è dichiarato «vehementemente sospetto d'eresia» e abiura; vive poi confinato ad Arcetri. Non fu torturato né condannato al rogo; «Eppur si muove» è una leggenda.
- Il **metodo**: la natura è un libro scritto in lingua matematica (*Saggiatore* § 6); figura, grandezza e moto sono proprietà reali dei corpi, colori, odori e sapori «puri nomi» (§ 48: qualità primarie e secondarie).
- L'idealizzazione elimina gli «impedimenti»; il **cimento** mette alla prova le ipotesi; l'**esperimento mentale** ne ricava le conseguenze. Se il metodo sia induttivo o ipotetico-deduttivo è discusso dagli storici.
- Nel *Dialogo* Salviati confuta gli argomenti contro il moto della Terra: il moto comune non si avverte. Con l'esperimento della nave formula il **principio di relatività**. La prova fisica che proponeva, le maree, era sbagliata.
- Nei *Discorsi* (Leida, 1638) Galileo definisce il **moto naturalmente accelerato** e ne deduce la legge di caduta: spazi come i quadrati dei tempi, spazi successivi come i numeri dispari 1, 3, 5, 7; la conferma con il piano inclinato.
- Galileo intuisce l'**inerzia**, ma nel cosmo la pensa circolare; compone due moti indipendenti e trova la traiettoria parabolica dei proiettili.
- Newton (1642/1643–1727), *Principia* (1687): tre leggi del moto e **gravitazione universale** unificano la fisica di Galileo e l'astronomia di Keplero; «hypotheses non fingo» (1713): niente spiegazioni non dedotte dai fenomeni.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale di queste scoperte **non** è annunciata nel *Sidereus nuncius* (1610)?
   - **A.** le montagne e le valli della Luna
   - **B.** i quattro satelliti di Giove
   - **C.** le fasi complete di Venere
   - **D.** le stelle che compongono la Via Lattea

2. ● Le fasi complete di Venere, osservate da Galileo, dimostrano che:
   - **A.** Venere gira intorno al Sole, come nel sistema copernicano e in quello di Tycho
   - **B.** la Terra gira intorno al Sole
   - **C.** Venere brilla di luce propria
   - **D.** il sistema di Tycho Brahe è falso

3. ●● Quale successione è in ordine cronologico corretto?
   - **A.** *Dialogo* – *Sidereus nuncius* – decreto dell'Indice – *Saggiatore*
   - **B.** *Saggiatore* – decreto dell'Indice – *Dialogo* – *Sidereus nuncius*
   - **C.** *Sidereus nuncius* – *Saggiatore* – decreto dell'Indice – *Dialogo*
   - **D.** *Sidereus nuncius* – decreto dell'Indice – *Saggiatore* – *Dialogo*

4. ● La frase secondo cui lo Spirito Santo vuole insegnarci «come si vadia al cielo, e non come vadia il cielo» è:
   - **A.** una tesi di Bellarmino nella lettera a Foscarini
   - **B.** riferita da Galileo come detta da un ecclesiastico di altissimo grado, il cardinale Baronio
   - **C.** pronunciata da Urbano VIII durante il processo
   - **D.** scritta da Benedetto Castelli a Galileo

5. ● Il 22 giugno 1633 Galileo fu:
   - **A.** dichiarato «vehementemente sospetto d'eresia» e costretto ad abiurare
   - **B.** dichiarato eretico e condannato al rogo
   - **C.** assolto, con la sola proibizione del *Dialogo*
   - **D.** condannato per aver insegnato all'università il sistema copernicano

6. ● Secondo il *Saggiatore* (§ 48), sapori, odori e colori:
   - **A.** sono le proprietà più reali dei corpi
   - **B.** sono figure geometriche invisibili
   - **C.** dipendono soltanto dalla luce del Sole
   - **D.** risiedono nel corpo sensitivo e, tolto l'animale, sono «puri nomi»

7. ● Nell'esperimento della nave descritto nel *Dialogo*:
   - **A.** le gocce cadono verso poppa quando la nave si muove
   - **B.** nessun effetto osservato sottocoperta permette di stabilire se la nave, in moto uniforme, si muova o stia ferma
   - **C.** le farfalle si raccolgono verso poppa, stanche di seguire la nave
   - **D.** il fumo dell'incenso resta indietro anche sottocoperta

8. ● Con quale causa Galileo spiega le maree nella quarta giornata del *Dialogo*?
   - **A.** l'attrazione della Luna sulle acque
   - **B.** i venti periodici
   - **C.** la combinazione del moto diurno e del moto annuo della Terra
   - **D.** l'evaporazione dovuta al calore del Sole

9. ●● Un corpo cade da fermo di moto naturalmente accelerato. Gli spazi percorsi dalla partenza dopo 1, 2, 3, 4 unità di tempo stanno come:
   - **A.** 1, 2, 3, 4
   - **B.** 1, 3, 5, 7
   - **C.** 2, 4, 6, 8
   - **D.** 1, 4, 9, 16

10. ●● Con «hypotheses non fingo» Newton intende dire che:
    - **A.** non vuole costruire spiegazioni della causa della gravità che non siano dedotte dai fenomeni
    - **B.** la gravità è una qualità occulta
    - **C.** nella scienza non si usano mai ipotesi di nessun genere
    - **D.** la teoria dei vortici di Cartesio è dimostrata

Il lessico filosofico

11. ●● Definisci *qualità primarie* e *qualità secondarie* e fai due esempi per ciascun tipo. Galileo usa questi nomi? Con quali espressioni le indica?

12. ● Completa: nella lettera a Cristina di Lorena Galileo afferma che nelle dispute di problemi naturali non si dovrebbe cominciare dalle autorità delle Scritture, ma dalle « _____ esperienze» e dalle «dimostrazioni _____ ».

13. ●● Distingui il *cimento* dall'*esperimento mentale* e porta un esempio galileiano di ciascuno.

14. ●● Che cosa significa trattare il moto della Terra *ex suppositione*, come propone Bellarmino? In che cosa questa posizione si distingue da quella di Galileo?

15. ● Abbina ciascun termine all'opera in cui compare: a) pianeti medicei; b) solletico; c) Salviati, Sagredo e Simplicio sulla nave; d) legge dei numeri dispari e piano inclinato; e) *hypotheses non fingo*. Opere: 1) *Discorsi* (1638); 2) *Sidereus nuncius* (1610); 3) *Principia*, 2ª ed. (1713); 4) *Il Saggiatore* (1623); 5) *Dialogo* (1632).

Leggere i testi

16. ●● (T1) Quali sono i due «libri» che procedono dal Verbo divino? In che cosa differiscono nel loro modo di «parlare»? Perché la natura è detta «inesorabile ed immutabile»?

17. ●● (T1) Poche pagine dopo il brano, nella stessa lettera, Galileo riferisce la frase sul «come si vadia al cielo» e il «come vadia il cielo». Spiega la distinzione. Quale divisione dei compiti tra teologia e scienza ne deriva?

18. ● (T2) Perché, secondo Galileo, non basta avere davanti agli occhi il «grandissimo libro» per capirlo? Che cosa sono i suoi «caratteri»?

19. ●●● (T2) Ricostruisci in premesse e conclusione l'argomento del solletico (§ 48, nel capitolo) e mostra come Galileo lo estende ai sapori, agli odori e ai colori.

20. ●● (T3) Elenca gli effetti che Salviati invita a osservare nella stanza della nave. Perché precisa che gli osservatori devono stare «sotto coverta»?

21. ●● (T4) Che cosa intende Newton per «ipotesi»? Come diventano generali le proposizioni nella filosofia sperimentale?

22. ●● Leggi questo passo dei *Discorsi*, in cui Salviati descrive l'esperimento del piano inclinato: «facemmo scender la medesima palla solamente per la quarta parte della lunghezza di esso canale; e misurato il tempo della sua scesa, si trovava sempre puntualissimamente esser la metà dell'altro» (Galileo, *Discorsi*, Giornata III). Quale legge conferma questo risultato? Mostralo con un breve calcolo. Che cosa avrebbero dovuto trovare, per lo stesso tratto, se lo spazio fosse proporzionale al tempo?

Argomentare

23. ●●● Ricostruisci in premesse numerate e conclusione l'argomento aristotelico della palla di cannone sparata verso est e verso ovest contro la rotazione della Terra. Indica la premessa nascosta e spiega come la confuterebbe Salviati.

24. ●●● Ricostruisci l'argomento della lettera a Cristina in quattro premesse e una conclusione. Quale premessa Bellarmino avrebbe accettato senza difficoltà? Su quale invece avrebbe sollevato un'obiezione, e perché?

25. ●● L'argomento delle maree è un argomento valido? È un argomento corretto, cioè con premesse vere? Spiega la differenza tra le due cose usando questo esempio.

26. ●● «Un sasso cade al piede della torre; dunque la Terra si muove.» Perché questa conclusione sarebbe scorretta quanto quella degli aristotelici? Che cosa dimostra, invece, l'esperienza della torre?

Confrontare e collegare

27. ●● *Fisica.* Un sasso cade da fermo e nel primo intervallo di tempo percorre 5 cm. Quanto percorre nel secondo, nel terzo e nel quarto intervallo uguale? Quanto in tutto? Controlla il risultato con la legge dei quadrati.

28. ●● *Fisica.* Una biglia rotola fuori dal bordo di un tavolo alto 1,25 m con velocità orizzontale di 3 m/s. Usando i due moti indipendenti di Galileo ($g = 9{,}81\ m/s^2$, aria trascurata), calcola dopo quanto tempo tocca terra e a che distanza dal tavolo.

29. ●● Confronta il modo in cui Galileo, Cartesio e Newton concepiscono l'inerzia (Tabella 4.1). Perché si dice che Galileo l'ha «intuita» ma non formulata come legge?

30. ●●● Confronta Galileo e Bacone (capitolo precedente) sul ruolo dell'esperimento e della matematica nella conoscenza della natura.

31. ●● *E oggi?* Rileggi l'art. 33 della Costituzione. Una teoria scientifica può essere imposta o vietata da un'autorità? Chi decide, nella scienza di oggi, se una teoria è accettabile? Rispondi in 8–10 righe.

Verso la verifica

32. ●● Disponi in ordine cronologico, indicando l'anno: decreto dell'Indice contro Copernico; *Principia* di Newton; lettera a Castelli; *Discorsi*; lettera di Bellarmino a Foscarini; abiura di Galileo; *Il Saggiatore*; *Dialogo*.

33. ●●● **Trattazione sintetica** (12–15 righe). Il metodo di Galileo: la lingua matematica della natura, le sensate esperienze e le necessarie dimostrazioni, l'idealizzazione. Usa almeno un esempio tratto dalla fisica galileiana.

34. ●●● **Tema argomentativo.** «Nelle questioni naturali non si deve cominciare dalle autorità»: è un principio valido solo per la scienza o anche per altri campi? Prepara la scaletta: tesi, due argomenti (uno tratto da Galileo, uno dall'esperienza di oggi), un'obiezione, la conclusione.

PER APPROFONDIRE

- [GAL] G. Galilei, *Le opere*, Edizione Nazionale: il vol. V per le lettere copernicane, il VI per *Il Saggiatore*, il VII per il *Dialogo*, l'VIII per i *Discorsi*.
- [ROS] P. Rossi, *La nascita della scienza moderna in Europa*: i capitoli su Galileo e su Newton.
- [KOY] A. Koyré, *Dal mondo chiuso all'universo infinito*: la fine del cosmo aristotelico, fino a Newton.
- [REA] G. Reale, D. Antiseri, *Il pensiero occidentale dalle origini ad oggi*, vol. 2: i capitoli sulla rivoluzione scientifica e su Galileo.

Glossario del capitolo

Abiura
Il solenne rinnegamento, davanti al tribunale ecclesiastico, delle opinioni giudicate eretiche: Galileo abiurò il 22 giugno 1633.

Autonomia della scienza
In Galileo, la tesi che nelle questioni naturali decidono le esperienze e le dimostrazioni, non l'autorità della Scrittura né quella dei filosofi.

Cimento
Esperimento costruito per mettere alla prova un'ipotesi; il nome passò all'Accademia del Cimento (Firenze, 1657).

Esperimento mentale
Situazione immaginata di cui si ricavano, per pura coerenza, le conseguenze (la nave del *Dialogo*).

Fasi di Venere
Il variare della parte illuminata di Venere vista dalla Terra; osservate da Galileo nel 1610, sono incompatibili con il sistema tolemaico.

Gravitazione universale
In Newton, la forza con cui tutti i corpi si attraggono, proporzionale alle masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

Hypotheses non fingo
«Non invento ipotesi» (Newton, *Scholium generale*, 1713): rifiuto di spiegazioni non dedotte dai fenomeni.

Idealizzazione
Procedimento con cui si eliminano con il pensiero gli «impedimenti» (attrito, aria) per studiare il caso ideale di un fenomeno.

Indice dei libri proibiti
Elenco dei libri che la Chiesa vietava di leggere o di stampare, curato dalla Congregazione dell'Indice; nel 1616 vi fu sospeso il *De revolutionibus*.

Inerzia
Tendenza di un corpo a conservare il suo stato di moto senza bisogno di un motore; intuita da Galileo, formulata come legge da Cartesio e da Newton.

Legge dei numeri dispari
Nel moto naturalmente accelerato da fermo, gli spazi percorsi in intervalli di tempo uguali e successivi stanno come 1, 3, 5, 7...

Moto naturalmente accelerato
In Galileo, il moto in cui la velocità cresce di quantità uguali in tempi uguali; è il moto dei gravi in caduta.

Necessarie dimostrazioni
I ragionamenti matematici che deducono con certezza le conseguenze da principi; con le sensate esperienze, la seconda fonte della scienza galileiana.

Pianeti medicei
I quattro satelliti di Giove scoperti da Galileo nel 1610 e dedicati a Cosimo II de' Medici e ai suoi fratelli.

Principio di accomodazione
Principio secondo cui la Scrittura si adatta al linguaggio e alle conoscenze del popolo e non va presa alla lettera nelle questioni naturali.

Qualità primarie e secondarie
Le prime (figura, grandezza, moto) sono oggettive e misurabili; le seconde (colori, sapori, odori) esistono solo in chi percepisce. Distinzione di Galileo; i nomi sono di Boyle e Locke.

Relatività galileiana
Principio per cui nessun esperimento interno a un sistema in moto rettilineo uniforme permette di stabilire se il sistema è in moto o in quiete.

Sensate esperienze
Le osservazioni condotte con i sensi, aiutati dagli strumenti; la prima fonte della scienza galileiana.

Soluzioni

1. C. Le fasi di Venere furono osservate nell'autunno del 1610, dopo la pubblicazione del *Sidereus nuncius* (marzo 1610).

2. A. Le fasi complete richiedono che Venere giri intorno al Sole; questo vale sia per Copernico sia per Tycho, quindi non provano il moto della Terra.

3. D. 1610, 1616, 1623, 1632.

4. B. Galileo la riferisce a una «persona ecclesiastica costituita in eminentissimo grado»; una nota a margine nomina Baronio.

5. A. La sentenza parla di «vehementemente sospetto d'eresia»; segue l'abiura e il carcere commutato in confino.

6. D. Senza il corpo sensitivo queste qualità «sieno levate ed annichilate» (T2).

7. B. Il moto uniforme della nave è comune a tutto ciò che sta sottocoperta, aria compresa (T3).

8. C. Le accelerazioni e i rallentamenti dei punti della superficie, dovuti alla combinazione dei due moti, farebbero oscillare i mari. La teoria è sbagliata.

9. D. Gli spazi dalla partenza stanno come i quadrati dei tempi: 1, 4, 9, 16 (1, 3, 5, 7 sono gli spazi dei singoli intervalli).

10. A. Newton non conosce la causa della gravità e non vuole inventarne una non dedotta dai fenomeni (T4).

11. Qualità primarie: proprietà oggettive, misurabili e inseparabili dai corpi (figura, grandezza, moto, luogo, numero). Secondarie: esistono solo in chi percepisce (colori, sapori, odori, suoni). I nomi sono posteriori (Boyle, Locke); Galileo parla di «primi e reali accidenti» e di «puri nomi» (*Saggiatore* § 48).

12. «sensate»; «necessarie».

13. Il cimento è un esperimento eseguito, costruito per mettere alla prova un'ipotesi (il piano inclinato dei *Discorsi*); l'esperimento mentale si svolge nell'immaginazione e ne ricava le conseguenze per coerenza (la nave del *Dialogo*, il piano orizzontale senza attrito).

14. Significa presentarlo come ipotesi matematica che «salva le apparenze» e facilita i calcoli, senza affermare che la Terra si muova davvero (strumentalismo). Galileo invece sostiene che la teoria descrive come il mondo è (realismo) e che, nelle questioni naturali, decidono esperienze e dimostrazioni.

15. a-2; b-4; c-5; d-1; e-3.

16. Traccia: la Scrittura (dettata dallo Spirito Santo) e la natura (esecutrice degli ordini di Dio); la Scrittura si adatta all'intendimento del popolo e usa parole diverse dal vero assoluto, la natura segue sempre le sue leggi e non si cura di essere capita: per questo è «inesorabile» (T1).

17. Traccia: la Scrittura insegna ciò che riguarda la salvezza, non la struttura del cosmo; quindi le questioni naturali spettano alle esperienze e alle dimostrazioni, mentre la teologia, quando una verità naturale è dimostrata, deve usarla per interpretare bene i testi (T1 e la sezione «Scienza e fede»).

18. Bisogna conoscere la lingua in cui il libro è scritto, la matematica; i caratteri sono triangoli, cerchi e altre figure geometriche. Senza di essi ci si aggira «per un oscuro laberinto» (T2).

19. Traccia: 1) la mano che tocca un corpo compie la stessa azione (moto e contatto) su una statua e su un uomo vivo; 2) solo l'uomo vivo prova il solletico, e solo in certe parti; 3) dunque il solletico non è nella mano ma in chi lo sente; 4) colori, sapori e odori si comportano allo stesso modo: sono effetti in chi sente di cause che sono solo figure e moti; C) tolto il corpo sensitivo, sono «puri nomi».

20. Mosche e farfalle che volano, pesci in un vaso, gocce che cadono in un vaso sottostante, oggetti lanciati, salti a piedi uniti. Sottocoperta l'aria si muove con la nave; all'aperto l'aria resterebbe indietro e il fumo, le farfalle e le mosche ne sarebbero trascinati (T3).

21. Ipotesi è tutto ciò che non si deduce dai fenomeni; le proposizioni si deducono dai fenomeni e si rendono generali per induzione (T4).

22. Se lo spazio è proporzionale al quadrato del tempo, t è proporzionale a $\sqrt{s}$: per un quarto dello spazio il tempo è $\sqrt{(1/4)} = 1/2$. Se lo spazio fosse proporzionale al tempo, il tempo per un quarto del canale sarebbe stato un quarto, non la metà.

23. Traccia: 1) se la Terra ruota verso est, durante il volo il cannone si sposta verso est; 2) premessa nascosta: la palla non conserva il moto verso est che aveva nel cannone; 3) quindi la palla sparata verso est dovrebbe cadere più vicina al cannone di quella sparata verso ovest; 4) le due gittate risultano uguali; C) la Terra non ruota. Salviati nega la premessa 2: la palla partecipa del moto comune della Terra, come le cose sulla nave, e le gittate sono uguali in entrambe le ipotesi.

24. Traccia: P1 Scrittura e natura vengono entrambe da Dio; P2 il vero non contraddice il vero; P3 la Scrittura si adatta al linguaggio del popolo, la natura no; P4 ciò che esperienze e dimostrazioni stabiliscono non si può negare; C nelle questioni naturali si parte da esperienze e dimostrazioni, e i passi biblici apparentemente contrari vanno reinterpretati. Bellarmino accetta P1 e P2, e anche la conclusione nel caso di una vera dimostrazione; obietta alla P4 applicata al caso copernicano: la dimostrazione del moto della Terra non c'è, e la dimostrazione del moto della Terra non c'è, e che contro il consenso dei Padri non si può interpretare la Scrittura.

25. Traccia: l'argomento è valido (se la Terra ferma non produce maree e le maree ci sono, la Terra si muove), ma non è corretto, perché la premessa sul meccanismo delle maree è falsa: le maree dipendono dalla Luna e dal Sole. Validità = la forma; correttezza = forma valida e premesse vere.

26. Traccia: il sasso cade al piede della torre sia che la Terra stia ferma sia che si muova (moto comune); l'esperienza è compatibile con entrambe le ipotesi e quindi non decide. Dimostra solo che l'argomento aristotelico non prova l'immobilità della Terra.

27. Spazi: 5, 15, 25, 35 cm (rapporto 1 : 3 : 5 : 7); totale 80 cm. Controllo: $4^2 \cdot 5 = 80$ cm.

28. Tempo di caduta: $t = \sqrt{(2 \cdot 1{,}25 / 9{,}81)} \approx 0{,}505$ s; distanza orizzontale: $3 \cdot 0{,}505 \approx 1{,}51$ m.

29. Traccia: Galileo, il moto si conserva su un piano senza impedimenti, ma nel cosmo è circolare; Cartesio, legge di natura, moto rettilineo; Newton, prima legge, quiete o moto rettilineo uniforme, cambiato solo da forze (Tabella 4.1). Galileo non la formula come legge universale del moto rettilineo.

30. Traccia: entrambi rifiutano l'autorità e partono dall'esperienza; Bacone insiste sulle tavole e sull'induzione per eliminazione, e sottovaluta la matematica e le ipotesi; Galileo parte da un'ipotesi matematica, idealizza e la mette al cimento; per Galileo la natura è scritta in lingua matematica.

31. Traccia: art. 33: la scienza è libera; nessuna autorità politica o religiosa decide per legge che cosa è vero; decide la comunità degli studiosi con prove, esperimenti ripetibili, discussione e verifica tra pari; limiti posti dai diritti della persona.

32. Lettera a Castelli (1613), lettera di Bellarmino a Foscarini (1615), decreto dell'Indice (1616), *Il Saggiatore* (1623), *Dialogo* (1632), abiura (1633), *Discorsi* (1638), *Principia* (1687).

33. Traccia: 1) libro della natura in lingua matematica (*Saggiatore* § 6); 2) solo le proprietà misurabili (§ 48); 3) sensate esperienze e necessarie dimostrazioni (T1); 4) idealizzazione ed esperimento mentale; 5) esempio: legge di caduta confermata dal piano inclinato, oppure la nave.

34. Traccia: tesi (per esempio: vale per ogni sapere che si può controllare con prove); argomento 1, la lettera a Cristina e la condanna del 1633; argomento 2, la verifica tra pari e la ripetibilità degli esperimenti oggi; obiezione, non possiamo controllare tutto da soli e dobbiamo fidarci degli esperti; rispo-

sta: fiducia motivata, non autorità indiscutibile;
conclusione.