CAPITOLO

1

La fisica e il suo metodo

Prima di chiedere alla natura perché, chiedile quanto, quando e a quali condizioni: a queste domande risponde volentieri.

OBIETTIVI

1. Spiegare che cosa studia la fisica, da dove viene il suo nome e quali sono i suoi settori.
2. Confrontare la fisica qualitativa di Aristotele, la fisica matematica di Archimede e il metodo di Galileo.
3. Descrivere il ciclo del metodo sperimentale e il ruolo di ipotesi, legge, teoria e previsione.
4. Spiegare che cos'è un modello, che cosa sono le idealizzazioni e perché ogni modello ha un dominio di validità.
5. Riconoscere una grandezza fisica e la sua definizione operativa.
6. Progettare un esperimento facendo variare una grandezza alla volta.

INDICE DEL CAPITOLO

1.1 Che cosa studia la fisica 2

1.2 Aristotele, Archimede, Galileo: modi diversi di interrogare la natura 3

1.3 Il metodo sperimentale 6

1.4 Modelli, semplificazioni e grandezze fisiche 9

1.5 Un esperimento da progettare: il pendolo 10

Fisica 3 · Parte I · Il linguaggio della fisica · versione 1.0
Capitolo 1: La fisica e il suo metodo · pagine 21–40 del volume completo · estratto per lo studio

Una pietra lasciata cadere precipita; una piuma esita, ondeggia e arriva a terra molto dopo. Il fumo sale, la pioggia scende, una nave di legno galleggia e un chiodo di ferro affonda. Sono fatti che chiunque ha visto, e da più di duemila anni c'è chi si domanda *perché* accadano proprio così. La fisica nasce da questa domanda, ma diventa una scienza solo quando impara a trasformarla in un'altra, più modesta e più potente: *quanto*, *in quanto tempo*, *a quali condizioni*?

In questo capitolo vedrai da dove viene la parola «fisica», come Aristotele, Archimede e Galileo hanno interrogato la natura in modi diversi, che cosa significa fare un esperimento e perché i fisici lavorano con modelli. Alla fine progetterai un esperimento vero, con un pendolo, un metro e un cronometro.

1.1 Che cosa studia la fisica

La parola **fisica** viene dal greco φύσις (*physis*), «natura». Per i Greci la natura non era un paesaggio da contemplare: era ciò che fa sì che le cose nascano, crescano, si muovano e si fermino. Aristotele (384–322 a.C.), che a questo tema dedicò un trattato intitolato appunto *Fisica*, distingue gli oggetti «per natura» (gli animali, le piante, gli elementi come la terra e l'acqua) da quelli prodotti dall'arte umana, come un letto o un mantello. I primi portano in sé stessi l'origine dei loro cambiamenti; i secondi no. Ecco come formula la definizione:

> ὡς οὔσης τῆς φύσεως ἀρχῆς τινὸς καὶ αἰτίας τοῦ κινεῖσθαι καὶ ἠρεμεῖν ἐν ᾧ ὑπάρχει πρώτως καθ' αὐτὸ καὶ μὴ κατὰ συμβεβηκός
> «*poiché la natura è un principio e una causa del muoversi e dello stare in quiete per ciò in cui essa si trova originariamente, di per sé e non per accidente*» (Aristotele, *Fisica* II 1, 192b21-23; traduzione della redazione).

La natura si riconosce dunque dal *movimento* e dalla *quiete*. Per Aristotele «movimento» comprende anche il crescere e l'alterarsi; la fisica moderna ha ristretto la parola allo spostamento nello spazio, ma la prima parte di ogni corso di fisica studia ancora quando un corpo resta fermo e come si muove.

Oggi diciamo che la fisica studia i **fenomeni** naturali, cioè i fatti osservabili, direttamente o con strumenti, e ne cerca le leggi più generali: quelle che valgono per una pietra come per un pianeta, per un bicchiere d'acqua come per una stella.

1.1.1 I settori della fisica

Per comodità la fisica si divide in settori, che nella realtà si intrecciano. La *meccanica* studia l'equilibrio e il moto dei corpi e le forze che li governano. La *termodinamica* studia il calore, la temperatura e le trasformazioni dell'energia. L'*ottica* studia la luce, e lo studio delle *onde* la ac-

compagna con il suono e le vibrazioni. L'*elettromagnetismo* studia le cariche elettriche, le correnti e i magneti. La *fisica moderna*, nata all'inizio del Novecento con la relatività e la meccanica quantistica, descrive i fenomeni a velocità vicine a quella della luce e alla scala degli atomi.

Questo volume è dedicato alla meccanica: il linguaggio delle grandezze e delle misure (capitoli 1–4), i vettori e le forze (capitoli 5–6), l'equilibrio dei solidi e dei fluidi (capitoli 7–9), il moto (capitoli 10–12), i principi della dinamica (capitoli 13–14), il lavoro e l'energia (capitoli 15–16). Il prossimo anno affronterai la gravitazione, il calore, la luce e le onde; l'elettromagnetismo e la fisica moderna sono il programma dell'ultimo anno.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Fisica da φύσις, «natura», sostantivo legato al verbo φύω, «far nascere, far crescere»: la natura è, alla lettera, ciò che nasce e cresce da sé.

Metodo da μέθοδος, composto di μετά e ὁδός, «strada»: la via che si segue per andare dietro a qualcosa, cioè una ricerca condotta con ordine.

Ipotesi da ὑπόθεσις, da ὑπό, «sotto», e τίθημι, «porre»: ciò che si pone sotto, come base di un ragionamento. Nella geometria greca indicava il punto di partenza di una dimostrazione.

Teoria da θεωρία, «osservazione, contemplazione», dal verbo θεωρέω, «guardare con attenzione». In fisica una teoria è un modo ordinato di «guardare» un'intera classe di fenomeni.

1.2 Aristotele, Archimede, Galileo: modi diversi di interrogare la natura

1.2.1 La fisica di Aristotele

La fisica di Aristotele è *qualitativa*: descrive i fenomeni con parole e concetti, non con numeri, e parte dall'esperienza comune, quella che chiunque fa ogni giorno. Il mondo sotto la sfera della Luna è fatto di quattro elementi: terra, acqua, aria e fuoco. Ognuno ha un suo **luogo naturale**, verso cui tende quando nulla glielo impedisce: la terra, il più pesante, verso il centro dell'universo (che per Aristotele coincide con il centro della Terra); il fuoco, il più leggero, verso l'alto; l'acqua e l'aria in posizioni intermedie (Figura 1.1). I corpi celesti sono fatti di un quinto elemento, l'etere, e si muovono di moto circolare, senza inizio né fine.

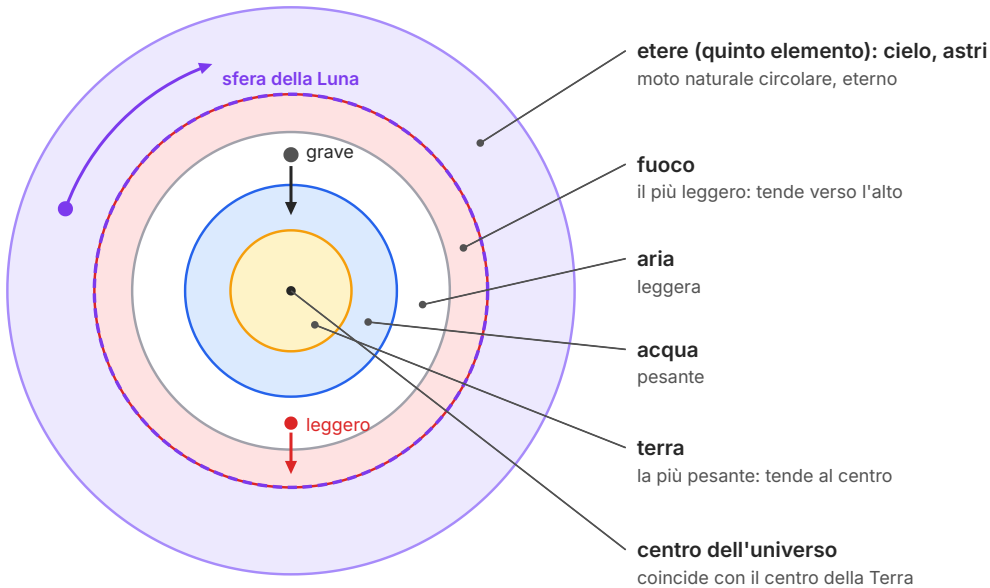


Figura 1.1 Schema del cosmo secondo Aristotele (modello semplificato, non in scala). Sotto la sfera della Luna i quattro elementi tendono ciascuno al proprio luogo naturale: un corpo grave scende verso il centro, un corpo leggero sale. Sopra la sfera della Luna gli astri, fatti di etere, ruotano di moto circolare.

Da qui la distinzione fra due tipi di moto. Il **moto naturale** è quello con cui un corpo si dirige spontaneamente al proprio luogo: la pietra che cade, la fiamma che sale. Il **moto violento** è quello imposto dall'esterno, contro la tendenza del corpo, come la pietra lanciata in alto; secondo Aristotele richiede un motore che agisca sul corpo, e cessa quando il motore smette di agire. Il caso del sasso che continua a volare dopo aver lasciato la mano mise in difficoltà Aristotele stesso, che lo spiegò attribuendo all'aria il compito di spingerlo: lo vedrai nel capitolo 13.

Anche la velocità con cui un corpo cade ha, per Aristotele, una spiegazione. Nel libro IV della *Fisica* scrive:

> ὁρῶμεν γὰρ τὸ αὐτὸ βάρος καὶ σῶμα θᾶττον φερόμενον διὰ δύο αἰτίας, ἢ τῷ διαφέρειν τὸ δι' οὗ, οἷον δι' ὕδατος ἢ γῆς ἢ δι' ὕδατος ἢ ἀέρος, ἢ τῷ διαφέρειν τὸ φερόμενον, ἐὰν τἆλλα ταὐτὰ ὑπάρχῃ, διὰ τὴν ὑπεροχὴν τοῦ βάρους ἢ τῆς κουφότητος.
> *«Vediamo infatti che lo stesso peso, cioè lo stesso corpo, si muove più velocemente per due cause: o perché è diverso il mezzo attraverso cui si muove, per esempio acqua o terra, acqua o aria; oppure perché è diverso il corpo che si muove, a parità di tutto il resto, per un eccesso di pesantezza o di leggerezza.»* (Aristotele, *Fisica* IV 8, 215a25-29; traduzione della redazione).

Sarebbe ingiusto liquidare queste idee come ingenue. Aristotele descrive bene il moto di un corpo *dentro un mezzo*, e quasi tutti i movimenti che osserviamo avvengono nell'aria o nell'acqua. Un sasso affonda nello stagno più in fretta di una foglia; una biglia scende nel miele molto più lentamente che nell'acqua. Una teoria che spiega con coerenza tutte queste osservazioni era una teoria seria, e infatti dominò per quasi due millenni. Il suo limite stava nel tipo di domande: Aristotele chiedeva *perché* un corpo si muove e cercava la risposta nella sua natura; non chiedeva *di quanto* si sposta in un dato tempo.

ERRORE FREQUENTE

«Aristotele pensava che i corpi pesanti cadessero più in fretta perché non aveva mai guardato.» Non è così: in un mezzo come l'acqua o l'olio, a parità di forma e di dimensioni, un corpo più pesante scende davvero più in fretta. Alla sua fisica mancavano la **misura** e l'**esperimento controllato**, cioè condizioni in cui l'effetto del mezzo diventa trascurabile. Questo passo lo compirà Galileo (capitolo 11).

1.2.2 Archimede: la fisica come geometria

Nel III secolo a.C. Archimede di Siracusa (circa 287–212 a.C.) seguì una strada diversa. Nel trattato *Sull'equilibrio dei piani* non discute la natura dei corpi pesanti: parte da pochi **postulati**, affermazioni semplici che chiede di accettare perché confermate dall'esperienza (per esempio, che pesi uguali posti a distanze uguali dal punto d'appoggio si fanno equilibrio), e ne ricava con dimostrazioni rigorose, come Euclide negli *Elementi*, una serie di proposizioni. Una di queste è la legge della leva, che studierai nel capitolo 8. Nel trattato *Sui galleggianti* fa lo stesso con i corpi immersi in un liquido (capitolo 9).

Archimede è il primo esempio di una *fisica matematica*: un ragionamento deduttivo, che dai postulati arriva a risultati quantitativi controllabili. Il suo campo è però limitato all'equilibrio, cioè ai corpi fermi; per una teoria matematica del moto bisognerà attendere quasi diciannove secoli.

1.2.3 Galileo: esperienze e dimostrazioni

Galileo Galilei (1564–1642) unì le due strade: dall'esperienza prese il controllo dei fatti, da Archimede l'ideale della dimostrazione matematica. In una lunga lettera del 1615 alla granduchessa Cristina di Lorena, dedicata ai rapporti fra la scienza e le Sacre Scritture, parla delle verità sulla natura e indica da dove provengono:

> *«quelle conclusioni naturali, che o dalle sensate esperienze o dalle necessarie dimostrazioni ci vengono esposte innanzi a gli occhi e all'intelletto»* (Galileo, *Lettera a Cristina di Lorena*, 1615).

La formula è diventata proverbiale nella forma abbreviata **«sensate esperienze e necessarie dimostrazioni»**. Le *sensate esperienze* sono le osservazioni e gli esperimenti, ciò che si verifica

con i sensi; le *necessarie dimostrazioni* sono i ragionamenti matematici, le cui conclusioni non possono essere diverse da come sono. Per Galileo la conoscenza della natura nasce dalla collaborazione fra le due. L'esperimento non è più un'occhiata ai fatti così come capitano, ma una *domanda posta alla natura*: si prepara una situazione artificiale (una sfera che scende lungo un piano inclinato levigato, un pendolo di cui si sceglie la lunghezza), si misura, e si confronta il risultato con le conseguenze di un'ipotesi.

Qualche anno dopo, nel *Saggiatore* (1623), Galileo rispose a chi sosteneva che, per ragionare di natura, bisognasse appoggiarsi all'opinione di qualche autore celebre:

> *«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.»* (Galileo, *Il Saggiatore*, 6).

Per «filosofia» Galileo intende la scienza della natura: il libro dell'universo va letto direttamente, e la sua lingua è la geometria. Oggi ai triangoli e ai cerchi aggiungiamo equazioni, grafici e vettori, ma l'idea è la stessa.

COLLEGAMENTI

Filosofia · Dalla *physis* dei presocratici ad Aristotele

Quando quest'anno studierai in filosofia i primi pensatori greci, li troverai alla ricerca dell'ἀρχή, il principio da cui tutte le cose derivano: l'acqua per Talete, l'aria per Anassimene; Empedocle propose quattro «radici», terra, acqua, aria e fuoco, che Aristotele riprese come elementi. Le loro opere erano spesso intitolate, nella tradizione antica, *Sulla natura*. La fisica moderna ha cambiato le risposte, ma la domanda, «di che cosa è fatto il mondo e perché cambia?», è ancora la sua.

1.3 Il metodo sperimentale

Dopo Galileo, il modo di lavorare dei fisici ha preso una forma riconoscibile, che chiamiamo **metodo sperimentale**: un procedimento in cui ogni idea sulla natura viene messa alla prova con misure, e accettata solo se le misure la confermano. Non è una ricetta rigida, ma un ciclo di fasi che si ripete (Figura 1.2).

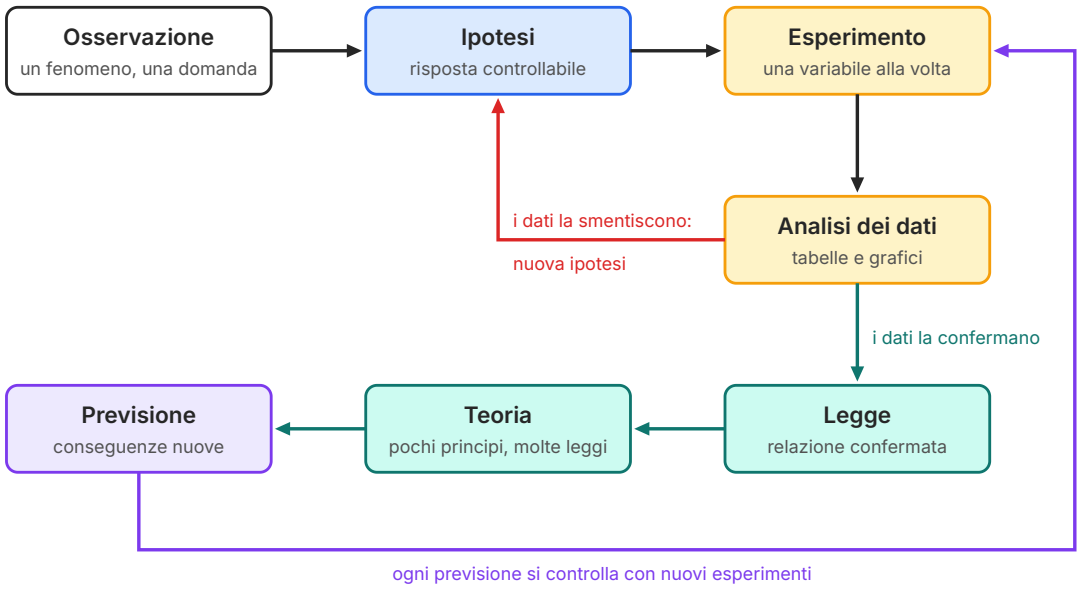


Figura 1.2 Il ciclo del metodo sperimentale. Se l'analisi dei dati smentisce l'ipotesi, se ne formula un'altra (freccia rossa); se la conferma, si arriva a una legge, che può entrare in una teoria. Le previsioni della teoria tornano a essere controllate da nuovi esperimenti (freccia viola): il ciclo non si chiude mai del tutto.

1.3.1 Dall'osservazione alla legge

Tutto comincia con l'**osservazione** di un fenomeno e con una domanda precisa. «Perché il lampadario oscilla?» è una domanda troppo vaga; «la durata di un'oscillazione dipende dalla lunghezza della catena?» è una domanda a cui si può rispondere. Alla domanda si dà una risposta provvisoria, l'**ipotesi**, formulata in modo da poter essere controllata: «più la catena è lunga, più l'oscillazione dura».

L'ipotesi si controlla con un **esperimento**, cioè un'osservazione provocata in condizioni scelte e controllate da chi la esegue. In un esperimento le grandezze hanno ruoli diversi. La **variabile indipendente** è quella che lo sperimentatore fa cambiare di proposito (la lunghezza della catena); la **variabile dipendente** è quella che misura per vedere se e come cambia di conseguenza (la durata dell'oscillazione); le **variabili controllate** sono tutte le altre che potrebbero influire, e che vanno tenute fisse (la massa appesa, l'ampiezza delle oscillazioni). La regola d'oro è far variare **una sola grandezza alla volta**: cambiandone due insieme, non si sa a quale attribuire l'effetto.

I dati raccolti si ordinano in tabelle e grafici (lo farai in modo sistematico nel capitolo 4) e si confrontano con l'ipotesi. Se la smentiscono, l'ipotesi va corretta o abbandonata. Se la confermano, e se l'esperimento ripetuto da altri dà lo stesso risultato, si arriva a una **legge fisica**: una

relazione fra grandezze misurabili, confermata dagli esperimenti, spesso espressa con una formula.

1.3.2 Teorie e previsioni

Le leggi non restano isolate. Quando molte leggi si possono ricavare da pochi principi comuni, si ha una **teoria**. La meccanica che studierai quest'anno ne è l'esempio classico: dai tre principi della dinamica (capitoli 13 e 14) discendono la caduta dei gravi, il moto dei proiettili, l'equilibrio di una leva. Il pregio maggiore di una teoria è che permette **previsioni**: conseguenze nuove, mai osservate prima, che si possono controllare con nuovi esperimenti. Ogni previsione confermata rafforza la teoria; una previsione smentita, se il risultato è confermato da altri, la mette in discussione.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> «L'esperimento ha confermato l'ipotesi, quindi l'ipotesi è dimostrata.» Un esperimento in accordo con un'ipotesi la **rafforza**, ma non la dimostra per sempre: il prossimo esperimento, in condizioni diverse, potrebbe smentirla. Al contrario, un solo risultato in disaccordo, purché ripetuto e controllato, basta a metterla in crisi. In fisica le «dimostrazioni» in senso stretto sono quelle matematiche, che valgono una volta accettate le premesse; le leggi della natura restano sempre aperte al controllo.

1.3.3 La comunità scientifica e i limiti del metodo

Il filosofo della scienza Karl Popper ha proposto un criterio per riconoscere un'affermazione scientifica: deve essere **falsificabile**, cioè deve essere possibile immaginare un esperimento il cui esito la smentirebbe. «Il periodo di un pendolo non dipende dalla massa» è falsificabile: basta trovare due masse che danno periodi chiaramente diversi. «Ogni corpo si muove come vuole la sua anima invisibile» non lo è: qualunque cosa accada, la si può spiegare a posteriori. Una frase non falsificabile non è necessariamente falsa; semplicemente, la scienza non sa che farne.

Un risultato ha valore solo se è **riproducibile**: chiunque ripeta l'esperimento nelle stesse condizioni deve ottenere risultati compatibili. Per questo i fisici pubblicano anche gli strumenti e i procedimenti, e altri ricercatori li ripetono e li criticano. L'affidabilità della scienza non dipende dalla genialità del singolo, ma da questo controllo reciproco della comunità, che nel tempo corregge gli errori.

Il metodo ha anche dei limiti. Non tutto si può sottoporre a esperimento: non possiamo far nascere una stella in laboratorio, né ripetere la formazione del sistema solare, e lì ci si affida a osservazioni e a modelli confrontati con i dati. Inoltre nessuna misura è perfetta: ogni risultato sperimentale ha un'incertezza, di cui ci occuperemo nel capitolo 3.

1.3.4 Fisica, tecnologia e società

Dalle conoscenze costruite con questo metodo dipendono gran parte delle tecnologie che usiamo: la rete elettrica, i motori, le immagini mediche, le telecomunicazioni. Molte scelte che una società deve compiere, come produrre energia, costruire in una zona sismica, regolare l'uso di una nuova tecnologia, richiedono di comprendere che cosa la scienza sa, con quale grado di certezza e che cosa ancora non sa. Le Indicazioni nazionali chiedono che al termine del liceo tu sappia «comprendere e valutare le scelte scientifiche e tecnologiche che interessano la società» in cui vivi: è una delle ragioni per cui la fisica si studia anche al liceo classico, e non solo da parte di chi diventerà fisico.

1.4 Modelli, semplificazioni e grandezze fisiche

Un lampadario che oscilla è un oggetto complicato: la catena ha una massa e si allunga un poco, l'aria lo frena, il gancio ha un po' di attrito. Tenendo conto di tutto non si arriverebbe mai a una legge. Il fisico fa allora una scelta consapevole: costruisce un **modello**, una rappresentazione semplificata del sistema reale che conserva le caratteristiche essenziali per la domanda che si pone e trascura le altre.

Il modello usato in questo capitolo è il **pendolo semplice**: una piccola sfera appesa a un filo sottile, di massa trascurabile e inestensibile, che oscilla senza attriti attorno a un punto fisso. Nessun pendolo reale è così, ma molti gli somigliano abbastanza da comportarsi quasi allo stesso modo.

1.4.1 Tre modelli che ritroverai

Alcuni modelli ricorrono così spesso da avere un nome proprio.

- Il **punto materiale** è un corpo di cui si trascurano forma e dimensioni: lo si rappresenta con un punto che ne possiede tutta la massa. Va bene quando le dimensioni del corpo sono piccole rispetto alle distanze in gioco: un'automobile sul percorso fra Bologna e Firenze, una nave che attraversa l'Adriatico.
- Il **corpo rigido** è un corpo esteso che non si deforma: le distanze fra i suoi punti restano sempre le stesse. Serve quando contano la forma e le dimensioni, ma non le piccole deformazioni: una porta che ruota sui cardini, una trave appoggiata su due pilastri, una leva.
- Il **fluido ideale** è un liquido o un gas che non oppone attrito interno allo scorrere e che, se liquido, non cambia volume sotto pressione. È il modello con cui studierai l'acqua di un recipiente o di una diga nel capitolo 9.

1.4.2 Le idealizzazioni e il dominio di validità

Ai modelli si accompagnano le **idealizzazioni**: si immagina che non ci sia attrito, che una fune sia inestensibile e senza massa, che un piano sia perfettamente liscio. Funzionano perché, in molte situazioni, l'effetto trascurato è piccolo rispetto a quelli che si studiano.

Ogni modello ha però un **dominio di validità**: l'insieme delle condizioni in cui le sue previsioni concordano con le misure. Trascurare l'aria va benissimo per una sfera di piombo che oscilla appesa a un filo, molto meno per un palloncino; trattare la Terra come un punto va bene per descriverne il giro attorno al Sole, non per spiegare il giorno e la notte. Fuori dal suo dominio un modello porta a previsioni sbagliate.

> **DA RICORDARE**
> Un modello non è una copia della realtà ma una **semplificazione scelta in funzione della domanda**. Lo stesso oggetto può richiedere modelli diversi per domande diverse. Si giudica dal confronto con le misure.

1.4.3 Che cos'è una grandezza fisica

Le leggi della fisica legano fra loro **grandezze fisiche**: proprietà di un corpo o di un fenomeno che si possono misurare. La lunghezza di un filo, la massa di una sfera, la durata di un'oscillazione sono grandezze fisiche; la bellezza di un paesaggio o la simpatia di una persona no, perché non esiste un procedimento condiviso per misurarle.

Il punto decisivo è proprio il procedimento. Una grandezza fisica è definita da una **definizione operativa**: la descrizione delle operazioni con cui la si misura. «La durata di un'oscillazione» diventa una grandezza fisica quando si stabilisce come misurarla: si fa partire il cronometro quando la sfera passa per un punto, lo si ferma quando vi ripassa nello stesso verso dopo un'oscillazione completa. Chi segue la stessa definizione operativa misura la stessa cosa. Che cosa significhi esattamente misurare, con quali unità e con quale incertezza, è l'argomento dei capitoli 2 e 3.

1.5 Un esperimento da progettare: il pendolo

Mettiamo alla prova quanto detto con una domanda che fu anche di Galileo: *da che cosa dipende la durata delle oscillazioni di un pendolo?*

1.5.1 Le grandezze in gioco

Il nostro pendolo è una sfera appesa a un filo (Figura 1.3). A riposo il filo è verticale: è la posizione di equilibrio. Se si sposta la sfera di lato e la si lascia andare, essa va e viene fra due posizioni estreme, A e B. Un'**oscillazione** completa è il percorso da A a B e di nuovo ad A; il **periodo**

T è la durata di un'oscillazione completa. Le grandezze che potrebbero influire sul periodo sono tre: la *lunghezzal* del filo, misurata dal punto di sospensione O al centro della sfera; la *massam* della sfera; l'*ampiezzaθ*, cioè l'angolo fra il filo e la verticale nella posizione estrema.

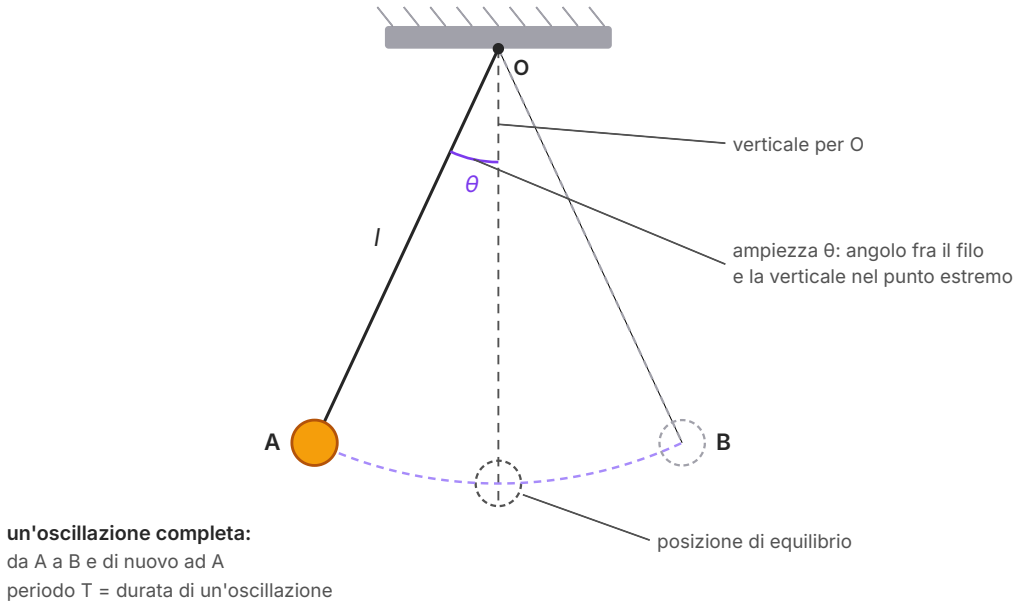


Figura 1.3 Il pendolo e le sue grandezze. La lunghezza *l* va dal punto di sospensione O al centro della sfera; l'ampiezza *θ* è l'angolo fra il filo e la verticale nella posizione estrema A. Un'oscillazione completa porta la sfera da A a B e di nuovo ad A; la sua durata è il periodo *T*.

1.5.2 Una variabile alla volta

Il periodo è la variabile dipendente. Le variabili indipendenti candidate sono tre, e la regola è farne variare una sola alla volta. Si organizzano quindi tre serie di misure (Figura 1.4): nella serie A cambia la lunghezza e restano fisse massa e ampiezza; nella serie B cambia la massa; nella serie C cambia l'ampiezza. In ogni serie le due grandezze non studiate diventano variabili controllate.

Per misurare il periodo non conviene cronometrare una sola oscillazione: si misura il tempo di dieci oscillazioni complete e lo si divide per dieci. Il piccolo ritardo con cui si preme il pulsante del cronometro, all'inizio e alla fine, pesa allo stesso modo su una o su dieci oscillazioni, ma dividendo per dieci il suo effetto sul periodo diventa dieci volte più piccolo. I risultati tipici di un esperimento di questo tipo sono raccolti nella Tabella 1.1 e rappresentati nella Figura 1.5.

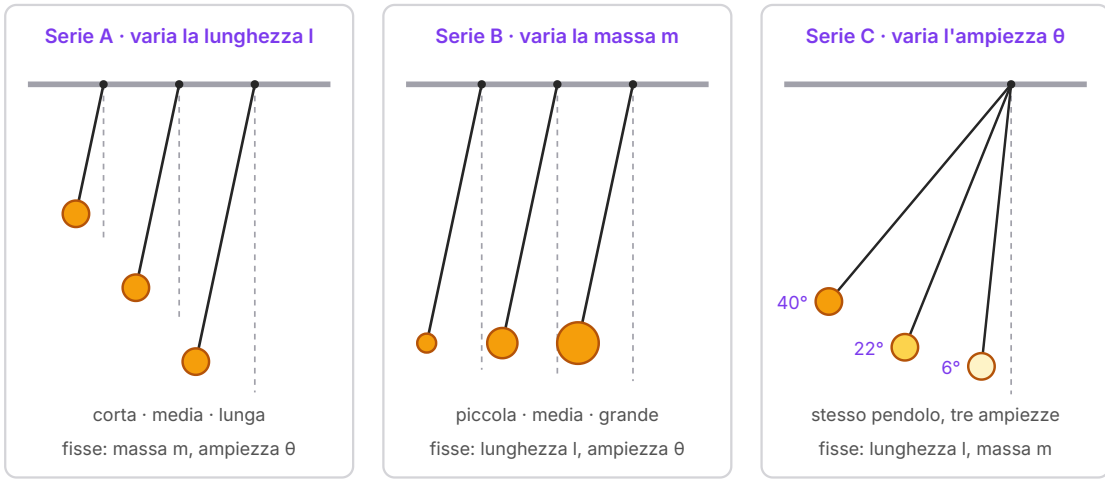


Figura 1.4 Le tre serie di misure. In ciascuna si fa variare una sola grandezza (in alto) e si tengono fisse le altre due (in basso). Nella serie B la massa cambia usando sfere di materiali diversi ma di dimensioni simili; nel disegno la massa maggiore è indicata da una sfera più grande.

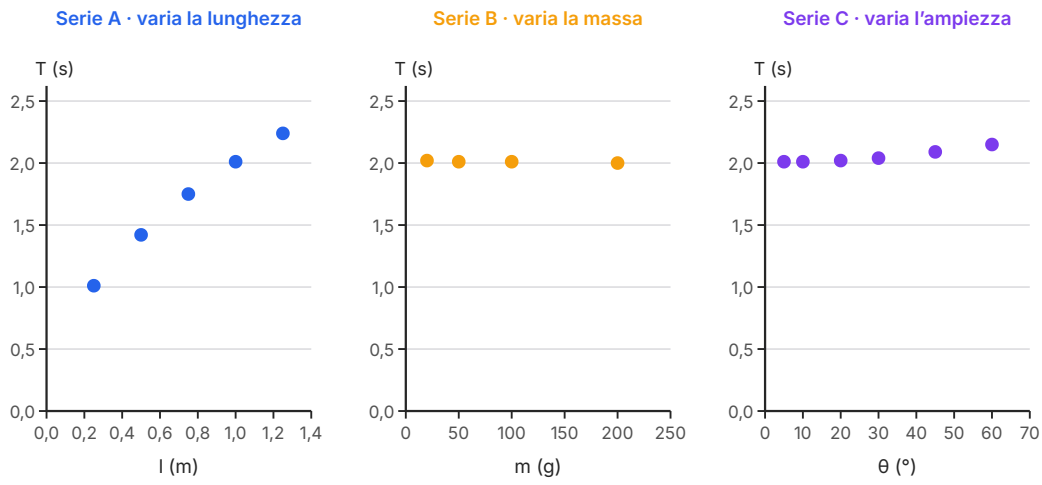


Figura 1.5 Il periodo *T* misurato nelle tre serie della Tabella 1.1 (dati tipici). Nella serie A il periodo cresce nettamente con la lunghezza; nella serie B resta lo stesso al variare della massa; nella serie C resta quasi lo stesso per ampiezze piccole e cresce di poco per ampiezze grandi.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto conta ciascuna variabile?

Problema. Usando la Tabella 1.1, calcola di quanto varia in percentuale il periodo (a) nella serie A, da $l = 0{,}25$ m a $l = 1{,}00$ m; (b) nella serie B, da $m = 20$ g a $m = 200$ g; (c) nella serie C, da $\theta = 5°$ a $\theta = 20°$. Quali grandezze influiscono sul periodo?

Soluzione. La variazione percentuale è la differenza fra il valore finale e quello iniziale, divisa per il valore iniziale e moltiplicata per 100.

(a) Il periodo passa da 1,01 s a 2,01 s: $(2{,}01 - 1{,}01) / 1{,}01 \times 100 \approx 99\%$. Il periodo quasi raddoppia mentre la lunghezza diventa quattro volte più grande.

(b) Il periodo passa da 2,02 s a 2,00 s: $(2{,}00 - 2{,}02) / 2{,}02 \times 100 \approx -1\%$, mentre la massa è diventata dieci volte più grande.

(c) Il periodo passa da 2,01 s a 2,02 s: $(2{,}02 - 2{,}01) / 2{,}01 \times 100 \approx 0{,}5\%$, mentre l'ampiezza è quadruplicata.

Le variazioni del periodo in (b) e (c) sono di uno o due centesimi di secondo, dello stesso ordine delle imprecisioni del cronometraggio a mano (ne parleremo nel capitolo 3): non indicano un effetto reale. La variazione in (a) è invece enorme. Conclusione: per ampiezze piccole il periodo **dipende dalla lunghezza**, **non dipende dalla massa** e **quasi non dipende dall'ampiezza**.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere un grafico e smascherare un esperimento mal progettato

Problema. Un compagno appende a un filo di 0,50 m una sfera di 50 g e misura $T = 1{,}42$ s; poi appende a un filo di 1,00 m una sfera di 200 g e misura $T = 2{,}01$ s. Conclude: «la sfera più pesante oscilla più lentamente». (a) Che cosa c'è di sbagliato nel suo esperimento? (b) Usa la Figura 1.5 per spiegare da dove viene davvero la differenza. (c) Quale lunghezza dovrebbe avere un pendolo con periodo 2,0 s?

Soluzione. (a) Fra le due misure sono cambiate *due* grandezze, la lunghezza e la massa: non si può sapere a quale delle due attribuire l'aumento del periodo.

(b) Nel grafico della serie B, con la lunghezza fissa, i punti per 50 g e per 200 g sono alla stessa altezza (2,01 s e 2,00 s): la massa non conta. Nel grafico della serie A, invece, a 0,50 m corrisponde 1,42 s e a 1,00 m corrisponde 2,01 s: tutta la differenza è dovuta alla lunghezza.

(c) Nel grafico della serie A il valore $T = 2{,}0$ s si legge in corrispondenza di $l \approx 1{,}0$ m. Un pendolo lungo circa un metro impiega dunque circa un secondo per ciascuna «andata»: è il pendolo che batte il secondo.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: da che cosa dipende il periodo di un pendolo?

Materiali. Un sostegno da laboratorio con morsetto (oppure un gancio fissato saldamente al bordo di uno scaffale); filo da pesca di circa 1,5 m; quattro sfere forate di dimensioni simili ma di materiali diversi (legno, plastica, vetro, acciaio), oppure dadi metallici da avvitare in numero diverso; un metro a nastro; un goniometro di cartone fissato dietro al punto di sospensione; un cronometro (va bene quello dello smartphone).

Procedimento. (1) Regola la lunghezza l, misurata fino al centro della sfera. (2) Sposta la sfera dell'angolo voluto, leggendolo sul goniometro, e lasciala andare senza spingerla. (3) Dopo un paio di oscillazioni avvia il cronometro mentre la sfera passa per la posizione più bassa, dove il passaggio si individua meglio, e fermalo dopo 10 oscillazioni complete. (4) Ripeti le tre serie di misure della Figura 1.4, cambiando ogni volta una sola grandezza. (5) Ricava il periodo dividendo il tempo per 10.

Tabella 1.1 Periodo di un pendolo nelle tre serie di misure (dati tipici); t_{10} è il tempo di 10 oscillazioni letto su un cronometro a mano. Serie A: m = 50 g, θ = 10°. Serie B: l = 1,00 m, θ = 10°. Serie C: l = 1,00 m, m = 50 g.

Serie A			Serie B			Serie C		
l (m)	t_{10} (s)	T (s)	m (g)	t_{10} (s)	T (s)	θ (°)	t_{10} (s)	T (s)
0,25	10,1	1,01	20	20,2	2,02	5	20,1	2,01
0,50	14,2	1,42	50	20,1	2,01	10	20,1	2,01
0,75	17,5	1,75	100	20,1	2,01	20	20,2	2,02
1,00	20,1	2,01	200	20,0	2,00	30	20,4	2,04
1,25	22,4	2,24				45	20,9	2,09
						60	21,5	2,15

Che cosa concludere. Il periodo cresce con la lunghezza; la massa non ha effetto apprezzabile; l'ampiezza ha un effetto molto piccolo finché resta entro una ventina di gradi, mentre con ampiezze grandi il periodo cresce di qualche centesimo di secondo (con 60° circa il 7% in più che con 10°). Con le ampiezze grandi l'aria riduce un poco l'ampiezza durante le dieci oscillazioni: è un limite di questa misura.

Sicurezza. Fissa bene il sostegno al tavolo e tieni il viso e le mani lontani dalla traiettoria delle sfere più pesanti.

Per la relazione. Scrivi lo scopo (la domanda), l'elenco dei materiali e il procedimento, in modo che un compagno possa ripetere l'esperimento; riporta la tabella dei dati; per ogni serie dichiara quale grandezza hai fatto variare e quali hai tenuto fisse. Nelle conclusioni rispondi

alla domanda iniziale e spiega perché differenze di un centesimo di secondo non bastano per affermare che una grandezza influisce sul periodo. Nei prossimi capitoli la relazione si arricchirà di unità di misura, incertezze e grafici.

APPROFONDIMENTO

Galileo e l'isocronismo del pendolo

Secondo il racconto del suo allievo e biografo Vincenzo Viviani, Galileo da giovane avrebbe notato nel Duomo di Pisa che le oscillazioni di una lampada sembravano durare sempre lo stesso tempo, anche quando si facevano più strette. L'episodio è tramandato da questa sola fonte e non sappiamo se sia andato davvero così. È certo invece che Galileo studiò a lungo i pendoli: nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638), Giornata prima, Salviati, il personaggio che parla per l'autore, descrive un pendolo di piombo che percorre archi sempre più piccoli e afferma: «Ciascheduna di tali vibrazioni si fà sotto tempi eguali tanto quella di novanta gradi, quanto quella di cinquanta, ò di venti, di dieci e di quattro». Galileo misura le vibrazioni con l'arco percorso in una sola andata: un arco di 90° corrisponde a un'ampiezza di 45° da ciascuna parte della verticale. Questa proprietà si chiama **isocronismo** (da ἴσος, «uguale», e χρόνος, «tempo»).

Le misure moderne correggono Galileo su un punto. L'isocronismo è **approssimato**: vale con ottima precisione per oscillazioni piccole, ma con oscillazioni ampie il periodo cresce. Con un pendolo lungo 1,00 m il periodo è di circa 2,01 s per ampiezze di pochi gradi, di circa 2,09 s per un'ampiezza di 45° (il 4% in più) e di circa 2,37 s per un'ampiezza di 90° (quasi il 18% in più). Galileo aveva ragione sull'essenziale e torto sui dettagli: un buon esempio di come una legge abbia un dominio di validità. Proprio l'isocronismo delle piccole oscillazioni permise, dopo Galileo, di costruire orologi a pendolo.

IN SINTESI

Osservazione → ipotesi → esperimento → analisi dei dati → legge → teoria → previsioni → nuovi esperimenti. Si pone una domanda precisa, si propone una risposta controllabile, la si mette alla prova facendo variare una grandezza alla volta, e la si accetta solo se i risultati la confermano in modo riproducibile.

$$T = \frac{t_n}{n}$$

Il **periodo** T di un pendolo, cioè la durata di un'oscillazione completa, si ottiene dividendo il tempo t_n impiegato per n oscillazioni complete per il numero n. Il periodo si misura in secondi (s), come t_n; n è un numero puro.

DA RICORDARE

Per piccole ampiezze il periodo di un pendolo **dipende dalla lunghezza** del filo (quadruplicando la lunghezza raddoppia), **non dipende dalla massa** e **quasi non dipende dall'ampiezza**. Per ampiezze grandi il periodo cresce: l'isocronismo è solo approssimato.

SINTESI

- La parola «fisica» viene dal greco *physis*, «natura»; per Aristotele la natura è il principio interno del movimento e della quiete delle cose.
- La fisica studia i fenomeni naturali e ne cerca le leggi più generali; i suoi settori principali sono meccanica, termodinamica, ottica e onde, elettromagnetismo e fisica moderna.
- La fisica di Aristotele è qualitativa: i quattro elementi tendono ai loro luoghi naturali (moto naturale), mentre il moto violento richiede un motore; la velocità di caduta dipende dal mezzo e dal peso.
- Archimede costruisce una fisica matematica dell'equilibrio, deducendo proposizioni da pochi postulati.
- Galileo fonda la conoscenza della natura su «sensate esperienze» e «necessarie dimostrazioni»: l'esperimento è una domanda posta alla natura, la matematica è la sua lingua.
- Il metodo sperimentale è un ciclo: osservazione, ipotesi, esperimento, analisi dei dati, legge, teoria, previsioni, nuovi esperimenti.
- In un esperimento si fa variare una sola variabile indipendente alla volta, si misura la variabile dipendente e si tengono fisse le variabili controllate.
- Un'affermazione scientifica deve essere falsificabile e i risultati devono essere riproducibili; un esperimento in accordo con un'ipotesi la rafforza, ma non la dimostra per sempre.
- Un modello è una semplificazione scelta in funzione della domanda (punto materiale, corpo rigido, fluido ideale); vale entro un dominio di validità.
- Una grandezza fisica è una proprietà misurabile, definita da una definizione operativa.
- Per piccole ampiezze il periodo di un pendolo dipende dalla lunghezza, non dalla massa, e quasi non dall'ampiezza; si misura come $T = t_n/n$.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Nella *Fisica* di Aristotele la natura di un corpo è:
   A. un principio interno del suo muoversi e del suo stare in quiete
   B. l'insieme delle leggi matematiche che lo descrivono
   C. la materia di cui è fatto un oggetto costruito dall'uomo
   D. la parte vivente del mondo, distinta da quella inanimata

2. ● Secondo Aristotele, il moto naturale di una pietra lasciata libera è diretto:
   A. verso l'alto, verso la sfera della Luna
   B. lungo una circonferenza, come quello degli astri
   C. verso il centro dell'universo
   D. in nessuna direzione: senza un motore la pietra resta ferma

3. ●● Archimede è considerato un esempio antico di fisica matematica perché:
   A. misurava i tempi di caduta con un orologio ad acqua
   B. ricavava proposizioni sull'equilibrio da pochi postulati, con dimostrazioni
   C. rifiutava ogni riferimento all'esperienza
   D. studiava il moto dei pianeti con la geometria

4. ● In un esperimento sul pendolo si fanno variare le masse delle sfere e si misura il periodo. In questo esperimento la lunghezza del filo è:
   A. la variabile dipendente
   B. la variabile indipendente
   C. il risultato dell'esperimento
   D. una variabile controllata

5. ● Un'affermazione è falsificabile quando:
   A. è già stata dimostrata falsa
   B. si può immaginare un esperimento il cui risultato la smentirebbe
   C. nessun esperimento la può contraddire
   D. è accettata dalla maggior parte degli scienziati

6. ● Quale di queste **non** è una grandezza fisica?
   A. la durata di un'oscillazione
   B. la lunghezza di un filo
   C. la massa di una sfera
   D. l'eleganza di un ponte

7. ●● Il modello di punto materiale è adatto quando:
   A. il corpo ha una massa molto piccola
   B. il corpo è fermo
   C. le dimensioni del corpo sono piccole rispetto alle distanze in gioco
   D. il corpo non si deforma

8. ● Nella *Lettera a Cristina di Lorena* Galileo indica come fonti delle conclusioni sulla natura:
   A. le sensate esperienze e le necessarie dimostrazioni
   B. l'autorità di Aristotele e dei suoi commentatori
   C. le opinioni della maggioranza dei dotti
   D. le sole osservazioni del cielo con il cannocchiale

Vero o falso

9. ●● Secondo Aristotele, nello stesso mezzo, un corpo più pesante scende più velocemente di uno più leggero della stessa forma. V / F

10. ● Nel linguaggio scientifico una teoria è un'ipotesi che non è ancora stata controllata. V / F

11. ●● Se due esperimenti indipendenti confermano un'ipotesi, l'ipotesi è dimostrata vera per sempre. V / F

12. ● Nel modello del pendolo semplice si trascura la massa del filo. V / F

13. ●● Le misure moderne confermano che un pendolo impiega esattamente lo stesso tempo a percorrere un arco di 90° e un arco di 4°. V / F

Applicare

14. ● Un pendolo compie 10 oscillazioni complete in 17,4 s. Calcola il periodo.

15. ● Completa. Una risposta provvisoria a una domanda, formulata in modo da poter essere controllata, si chiama _____ ; una relazione fra grandezze misurabili confermata da molti esperimenti si chiama _____ ; un insieme coerente di principi da cui discendono molte leggi si chiama _____ .

16. ● A quale settore della fisica appartiene principalmente ciascun fenomeno? (a) l'arcobaleno; (b) il ghiaccio che fonde in un bicchiere; (c) una calamita che attira un chiodo; (d) una palla che rotola su un piano inclinato; (e) il decadimento radioattivo dell'uranio.

17. ●● Nella serie C della Tabella 1.1 calcola di quanto aumenta in percentuale il periodo passando da un'ampiezza di 10° a una di 60°.

18. ●● Una studentessa vuole sapere se il tempo che una pallina impiega a cadere dipende dall'altezza da cui la si lascia. Indica la variabile indipendente, la variabile dipendente e almeno due variabili controllate.

19. ●● Leggi la serie A nella Figura 1.5 o nella Tabella 1.1. (a) Che periodo ha il pendolo lungo 0,25 m? (b) E quello lungo 1,00 m? (c) Quante volte più lungo è il secondo filo, e quante volte più lungo è il suo periodo?

20. ●● Per ciascuna situazione indica il modello più adatto (punto materiale, corpo rigido, fluido ideale): (a) un treno sulla linea Roma–Napoli, per calcolare il tempo di viaggio; (b) una porta che ruota sui cardini; (c) l'acqua ferma in una piscina, per calcolare la pressione sul fondo; (d) una scala appoggiata a un muro.

Problemi

21. ●● Marta misura con il cronometro 20 oscillazioni di un pendolo e ottiene 28,4 s; Luca, con lo stesso pendolo, misura 5 oscillazioni e ottiene 7,1 s. (a) Calcola il periodo secondo ciascuno dei due. (b) Le due misure sono d'accordo? (c) Quale delle due è più affidabile, e perché?

22. ●● In un orologio a pendolo ogni «andata» della sfera, da un estremo all'altro, dura 1,0 s. (a) Qual è il periodo del pendolo? (b) Usando la Tabella 1.1, stima la lunghezza del pendolo. (c) Quante oscillazioni complete compie in un'ora?

23. ●●● Nei *Discorsi* Galileo afferma che un pendolo impiega lo stesso tempo a percorrere un arco di 90° e uno di 4°. (a) Un arco di 90° è percorso da un pendolo con quale ampiezza? (b) Usando la serie C della Tabella 1.1, calcola la differenza fra il tempo di 10 oscillazioni con ampiezza 45° e con ampiezza 5°. (c) Fai lo stesso confronto fra 10° e 5°. (d) Un cronometro a mano, con cui si sbaglia di un paio di decimi di secondo, permette di accorgersi delle due differenze? Che cosa concludi sull'affermazione di Galileo?

24. ●●● In un cilindro alto 50 cm pieno di glicerina, una biglia d'acciaio e una biglia di vetro dello stesso diametro (3 mm) vengono lasciate cadere: quella d'acciaio tocca il fondo in circa 22 s, quella di vetro in circa 1 min 56 s. Lasciate cadere in aria dalla stessa altezza, toccano terra entrambe dopo circa 0,32 s. (a) Quante volte più tempo impiega la biglia di vetro nella glicerina? (b) Quale delle due osservazioni è in accordo con il passo di Aristotele citato nel testo (*Fisica* IV 8)? (c) Che cosa suggerisce la seconda osservazione sul ruolo del mezzo?

25. ●●● Uno studente progetta così un esperimento: «Appendo una sfera di acciaio a un filo di 0,80 m e la faccio oscillare con ampiezza 10°; poi appendo una sfera di legno a un filo di 0,60 m e la faccio oscillare con ampiezza 30°. Confrontando i periodi capirò se il materiale conta.» (a) Quali errori di progettazione contiene il piano? (b) Riscrivilo correttamente indicando le variabili.

Ragionare e argomentare

26. ●● Commenta la fonte. Aristotele scrive che lo stesso corpo si muove più velocemente o più lentamente «perché è diverso il mezzo attraverso cui si muove, per esempio acqua o terra, acqua o aria; oppure perché è diverso il corpo che si muove [...] per un eccesso di pesantezza o di leggerezza» (*Fisica* IV 8, traduzione della redazione). Che cosa afferma? È corretto? Come lo metteresti alla prova con materiali semplici?

27. ●● Progetta un esperimento per stabilire se il tempo che una zolletta di zucchero impiega a sciogliersi in un bicchiere d'acqua dipende dalla temperatura dell'acqua. Indica la domanda, l'ipotesi, le variabili e il procedimento.

28. ●●● Trova l'errore nel ragionamento: «Ho lasciato cadere dalla stessa altezza una piuma e un sasso: il sasso è arrivato molto prima. Dunque Aristotele aveva ragione e Galileo torto: i corpi più pesanti cadono sempre più in fretta.»

29. ● Perché la frase «I corpi cadono perché lo vuole un'anima invisibile che li abita» non è un'ipotesi scientifica?

PER APPROFONDIRE

- [ARI] Aristotele, *Fisica*: la definizione di natura (libro II) e la discussione del moto nel mezzo e nel vuoto (libro IV).
- [ARC] Archimede, *Sull'equilibrio dei piani*: i postulati iniziali, un modello di ragionamento deduttivo applicato alla natura.
- [SAG] Galileo Galilei, *Il Saggiatore*: il passo sul «grandissimo libro» scritto in lingua matematica.
- [GAL] Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Giornata prima: le osservazioni sul pendolo.
- [RUS] Lucio Russo, *La rivoluzione dimenticata*: la scienza ellenistica, da Euclide ad Archimede.
- [EIN] Albert Einstein, Leopold Infeld, *L'evoluzione della fisica*: le idee della fisica raccontate senza formule.

Glossario del capitolo

Dominio di validità
Insieme delle condizioni in cui le previsioni di una legge o di un modello concordano con le misure.

Esperimento
Osservazione provocata in condizioni scelte e controllate, in cui si fa variare una grandezza alla volta.

Falsificabile
Detto di un'affermazione per cui si può immaginare un esperimento il cui risultato la smentirebbe.

Fenomeno
Qualunque fatto naturale che si può osservare, direttamente o con strumenti.

Fisica
Scienza che studia i fenomeni naturali e ne cerca le leggi più generali, controllandole con esperimenti e misure.

Grandezza fisica
Proprietà di un corpo o di un fenomeno che si può misurare secondo una definizione operativa.

Ipotesi
Risposta provvisoria a una domanda, formulata in modo da poter essere controllata con un esperimento.

Isocronismo
Proprietà delle piccole oscillazioni di un pendolo di avere la stessa durata qualunque sia l'ampiezza; è approssimata.

Legge fisica
Relazione fra grandezze misurabili confermata da esperimenti riproducibili.

Luogo naturale
Nella fisica di Aristotele, la regione del cosmo verso cui ciascun elemento tende spontaneamente.

Metodo sperimentale
Procedimento ciclico (osservazione, ipotesi, esperimento, analisi, legge, teoria, previsione) in cui ogni idea sulla natura è controllata con misure.

Modello
Rappresentazione semplificata di un sistema reale, che conserva le caratteristiche essenziali per la domanda posta.

Moto naturale
Per Aristotele, il moto con cui un corpo si dirige spontaneamente al proprio luogo naturale.

Moto violento
Per Aristotele, il moto imposto dall'esterno, contrario alla tendenza naturale del corpo.

Periodo
Durata di un'oscillazione completa di un pendolo (o, in generale, di un fenomeno che si ripete).

Teoria
Insieme coerente di principi, leggi e modelli che spiega un'ampia classe di fenomeni e permette previsioni.

Variabile controllata
Grandezza che potrebbe influire sul risultato e che si tiene fissa durante l'esperimento.

Variabile dipendente
Grandezza che si misura per vedere se e come cambia al variare della variabile indipendente.

Variabile indipendente
Grandezza che lo sperimentatore fa variare di proposito.

Soluzioni

1. A. Per Aristotele la natura è «principio e causa del muoversi e dello stare in quiete» delle cose in cui si trova (*Fisica* II 1).

2. C. La terra, elemento più pesante, tende al suo luogo naturale, il centro dell'universo.

3. B. Nel trattato *Sull'equilibrio dei piani* Archimede parte da postulati e ne deduce proposizioni, come la legge della leva.

4. D. La lunghezza va tenuta fissa per non confondere il suo effetto con quello della massa: è una variabile controllata.

5. B. Falsificabile non vuol dire falso: vuol dire che un esperimento potrebbe smentirla.

6. D. Non esiste una definizione operativa condivisa per misurare l'eleganza.

7. C. Ciò che conta non è la massa, ma il confronto fra le dimensioni del corpo e le distanze percorse.

8. A. «O dalle sensate esperienze o dalle necessarie dimostrazioni»: esperimenti e ragionamenti matematici.

9. V. Nel libro IV della *Fisica* la velocità dipende dal mezzo e, a parità di altre condizioni, dalla pesantezza del corpo.

10. F. Una teoria è un insieme coerente di principi e leggi confermato da molti esperimenti; l'idea ancora da controllare è l'ipotesi.

11. F. Gli esperimenti in accordo rafforzano un'ipotesi, ma un esperimento futuro in condizioni diverse potrebbe smentirla.

12. V. Il filo del pendolo semplice è inestensibile e di massa trascurabile.

13. F. Un arco di 90° corrisponde a un'ampiezza di 45°: per un pendolo di 1,00 m il periodo è circa 2,09 s, contro circa 2,01 s con ampiezze di pochi gradi (il 4% in più). L'isocronismo è approssimato.

14. $T = t_{10}/10 = 17{,}4\ \text{s} / 10 = 1{,}74\ \text{s}$.

15. Ipotesi; legge (fisica); teoria.

16. (a) Ottica; (b) termodinamica; (c) elettromagnetismo; (d) meccanica; (e) fisica moderna.

17. Il periodo passa da 2,01 s a 2,15 s: $(2{,}15 - 2{,}01) / 2{,}01 \times 100 \approx 7\%$.

18. Variabile indipendente: l'altezza da cui si lascia la pallina. Variabile dipendente: il tempo di caduta. Variabili controllate, per esempio: la stessa pallina (massa, forma, materiale), il modo di lasciarla (senza spinta), lo stesso cronometro e lo stesso operatore, nessuna corrente d'aria.

19. (a) 1,01 s; (b) 2,01 s; (c) il filo è 4 volte più lungo (1,00/0,25 = 4); il periodo è circa 2 volte più lungo (2,01/1,01 ≈ 1,99).

20. (a) Punto materiale; (b) corpo rigido; (c) fluido ideale; (d) corpo rigido.

21. (a) Marta: $T = 28{,}4\ \text{s} / 20 = 1{,}42\ \text{s}$; Luca: $T = 7{,}1\ \text{s} / 5 = 1{,}42\ \text{s}$. (b) Sì, danno lo stesso periodo. (c) È più affidabile la misura di Marta: il ritardo con cui si preme il cronometro all'inizio e alla fine è circa lo stesso in entrambe le misure, ma Marta lo divide per 20 e Luca solo per 5, quindi sul periodo di Marta pesa quattro volte meno.

22. (a) Un'oscillazione completa comprende un'andata e un ritorno: $T = 2 \times 1{,}0\ \text{s} = 2{,}0\ \text{s}$. (b) Nella serie A il periodo 2,01 s corrisponde a $l = 1{,}00\ \text{m}$: il pendolo è lungo circa 1 m. (c) In un'ora ci sono 3600 s: $3600\ \text{s} / 2{,}0\ \text{s} = 1800$ oscillazioni.

23. (a) L'arco di 90° va da 45° a sinistra a 45° a destra della verticale: l'ampiezza è 45°. (b) Con 45°: 20,9 s; con 5°: 20,1 s. Differenza: $20{,}9\ \text{s} - 20{,}1\ \text{s} = 0{,}8\ \text{s}$. (c) Con 10° e con 5° il tempo di 10 oscillazioni è 20,1 s in entrambi i casi: la differenza è inferiore al decimo di secondo. (d) La prima differenza (0,8 s) supera nettamente un paio di decimi di secondo e si può notare; la seconda no. Galileo ha ragione per le piccole ampiezze, dove le differenze sono impercettibi-

li, ma non per le grandi: l'isocronismo vale solo entro un dominio di validità.

24. (a) 1 min 56 s = 116 s; 116 s / 22 s ≈ 5,3: la biglia di vetro impiega circa 5 volte più tempo. (b) La prima: nello stesso mezzo e con la stessa forma, il corpo più pesante (l'acciaio) scende molto più in fretta, come dice Aristotele. (c) In aria i tempi sono praticamente uguali: quando il mezzo oppone poca resistenza, la differenza di peso quasi non conta. L'effetto osservato nella glicerina è dovuto soprattutto al mezzo: è l'idea da cui partirà Galileo (capitolo 11).

25. (a) Fra le due misure cambiano tre grandezze insieme: il materiale (e quindi la massa), la lunghezza e l'ampiezza; qualunque differenza di periodo non si potrebbe attribuire al materiale. (b) Variabile indipendente: il materiale della sfera (acciaio, legno), con sfere dello stesso diametro. Variabile dipendente: il periodo, misurato su 10 oscillazioni. Variabili controllate: la stessa lunghezza (per esempio 0,80 m) e la stessa ampiezza piccola (per esempio 10°) per entrambe le sfere.

26. *Traccia.* Aristotele afferma che la velocità di un corpo che cade dipende dal mezzo (più è denso, più il moto è lento) e, a parità di mezzo, dal peso del corpo. L'affermazione descrive bene la caduta in un mezzo denso come l'acqua o l'olio, dove un corpo più pesante della stessa forma scende davvero più in fretta; non vale in generale, perché quando il mezzo oppone poca resistenza, come l'aria per due sfere compatte, i tempi di caduta diventano quasi uguali. Prova: lasciar cadere in un vaso alto pieno d'acqua e poi in aria due sfere della stessa dimensione e di peso diverso (una biglia di vetro e una d'acciaio), confrontando i tempi; cambiare un solo fattore alla volta.

27. *Traccia.* Domanda: il tempo di scioglimento dipende dalla temperatura dell'acqua? Ipotesi: più l'acqua è calda, più la zolletta si scioglie in fretta. Variabile indipendente: la temperatura dell'acqua (per esempio acqua fredda, a temperatura ambiente, tiepida). Variabile dipendente: il tempo di scioglimento. Variabili controllate: stessa quantità d'acqua, stesso tipo e stessa dimensione delle zollette, stesso bicchiere, nessun mescolamento (oppure mescolamento sempre uguale). Procedimento: per ogni temperatura si misura il tempo dall'immersione alla scomparsa della zolletta, ripetendo la prova più volte.

28. *Traccia.* Fra piuma e sasso cambiano insieme il peso, la forma e le dimensioni: la piuma è frenata dall'aria molto più del sasso, per la sua forma. L'esperimento non permette di separare l'effetto del peso da quello del mezzo. Inoltre un solo esperimento non basta a stabilire una legge «sempre» valida. Per controllare l'effetto del peso bisogna confrontare corpi della stessa forma e dimensione, o ridurre l'effetto dell'aria (per esempio appallottolando un foglio di carta, o facendo cadere i corpi nel vuoto).

29. Non è falsificabile: non si può immaginare un esperimento il cui risultato la smentirebbe, perché qualunque modo di cadere si potrebbe attribuire alla volontà di quell'anima. Non permette nemmeno previsioni quantitative.