CAPITOLO

1

La fisica e il metodo scientifico

Una domanda ben posta alla natura vale più di cento risposte date per sentito dire.

OBIETTIVI

1. Descrivere che cosa studia la fisica e distinguerne i principali settori.
2. Riconoscere le fasi del metodo sperimentale e spiegare perché formano un ciclo.
3. Distinguere fenomeno, ipotesi, legge, teoria e previsione.
4. Spiegare che cos'è un modello e perché le semplificazioni funzionano.
5. Progettare un esperimento individuando le variabili indipendente, dipendente e controllate.
6. Spiegare perché una legge scientifica deve essere controllabile e riproducibile.

INDICE DEL CAPITOLO

1.1 Che cosa studia la fisica 2
1.2 Il metodo sperimentale 4
1.3 Galileo e la nascita del metodo 7
1.4 Modelli e semplificazioni 8
1.5 Come la scienza controlla se stessa 10
1.6 Progettare un esperimento: il pendolo 12

Fisica 1 · Parte I · Misurare il mondo · versione 1.0
Capitolo 1: La fisica e il metodo scientifico · pagine 23–44 del volume completo · estratto per lo studio

Prendi un sasso legato a uno spago e lascialo oscillare. Va avanti e indietro, avanti e indietro, con oscillazioni sempre più strette, finché si ferma. È una scena così banale che di solito non ci facciamo caso. Eppure basta qualche domanda per trasformarla in un problema serio: quanto dura un'oscillazione? Se allungo lo spago, il sasso va più lento o più veloce? E se al posto del sasso appendo un oggetto più pesante? Per rispondere non servono strumenti costosi; serve un modo di procedere. Bisogna osservare con attenzione, formulare una congettura, metterla alla prova con un esperimento ben progettato e accettare il verdetto dei dati, anche quando smentisce ciò che ci aspettavamo.

Questo modo di procedere si chiama *metodo sperimentale* ed è il cuore della fisica. In questo primo capitolo non incontrerai ancora formule da imparare a memoria: scoprirai invece come lavora un fisico, che cosa intende quando parla di «legge» o di «teoria», perché a volte conviene ignorare di proposito una parte della realtà e come si organizza un esperimento in modo che le sue conclusioni siano affidabili. Sono gli strumenti che userai in tutto il resto del libro.

1.1 Che cosa studia la fisica

La parola «fisica» viene dal greco *phýsis*, che significa «natura». Per gli antichi la fisica era lo studio della natura nel suo complesso; oggi la parola ha un significato più preciso. La **fisica** è la scienza che studia i fenomeni naturali più generali (il moto e l'equilibrio dei corpi, il calore, la luce, il suono, l'elettricità e il magnetismo, la struttura della materia) cercando di descriverli con leggi espresse in linguaggio matematico e controllate per mezzo di esperimenti e misure.

Un **fenomeno** è qualunque evento o processo che si può osservare: una mela che cade, il ghiaccio che fonde in un bicchiere, un arcobaleno dopo il temporale, una calamita che attira un chiodo, il suono di una chitarra. Alcuni fenomeni sono sotto gli occhi di tutti; altri si rivelano solo con strumenti, come la radioattività di un minerale o il moto degli elettroni in un filo di rame. Il fisico non si accontenta di descrivere un fenomeno a parole: vuole capire da che cosa dipende, prevedere come si svolgerà in condizioni nuove e, quando possibile, esprimere i risultati con numeri e relazioni matematiche.

1.1.1 I settori della fisica

Per comodità la fisica si divide in settori, che però sono collegati fra loro da idee comuni (Tabella 1.1). La *meccanica* studia il moto dei corpi e le condizioni del loro equilibrio: è il settore da cui partiremo e che occuperà quasi tutto questo volume. La *termologia* (con la termodinamica) studia la temperatura, il calore e le trasformazioni dell'energia legate al calore. L'*ottica* studia la luce, la formazione delle immagini negli specchi e nelle lenti, i colori. L'*acustica* e, più in generale, lo studio delle onde si occupano del suono e di ogni perturbazione che si propaga. L'*elettro-*

magnetismo studia le cariche elettriche, le correnti, i magneti e la natura elettromagnetica della luce stessa. Infine la *fisica moderna* raccoglie le teorie nate nel Novecento (la relatività, la meccanica quantistica, la fisica dei nuclei e delle particelle), che descrivono ciò che accade a velocità vicine a quella della luce o alla scala degli atomi, dei nuclei e delle particelle.

Tabella 1.1 I principali settori della fisica, con un esempio di fenomeno e una domanda tipica.

Settore	Di che cosa si occupa	Esempio di fenomeno	Domanda tipica
meccanica	moto ed equilibrio dei corpi, forze	un ponte che sostiene le auto	quale carico può reggere senza crollare?
termologia	temperatura, calore, energia termica	una pentola d'acqua che bolle	quanto calore serve per scaldarla?
ottica	luce, immagini, colori	l'arcobaleno	perché la luce bianca si divide in colori?
acustica e onde	suono e perturbazioni che si propagano	l'eco in una valle	con quale velocità viaggia il suono?
elettromagnetismo	cariche, correnti, magneti	una calamita che attira un chiodo	come si produce la corrente in una centrale?
fisica moderna	relatività, quanti, nuclei e particelle	la radioattività di un minerale	perché alcuni nuclei sono instabili?

1.1.2 La fisica, le altre scienze e la tecnologia

La fisica è spesso considerata la più «fondamentale» delle scienze naturali, nel senso che le sue leggi valgono per tutti i corpi, viventi e non viventi. La chimica studia come gli atomi si combinano e si trasformano, ma il comportamento degli atomi è descritto dalla fisica; la biologia studia gli esseri viventi, ma il cuore che pompa il sangue, l'occhio che mette a fuoco un'immagine e i nervi che trasmettono segnali elettrici obbediscono alle stesse leggi di una pompa, di una lente e di un circuito. L'astronomia, la geologia, la meteorologia usano continuamente strumenti e leggi della fisica. Questo non rende le altre scienze meno importanti: ognuna ha domande, concetti e metodi propri, e molti fenomeni (un ecosistema, una reazione chimica complessa, il clima) sono troppo complicati per essere ridotti a poche equazioni.

Diversa è la relazione con la tecnologia. La scienza cerca di *capire* come funziona la natura; la **tecnologia** usa le conoscenze scientifiche per *costruire* dispositivi e risolvere problemi pratici. Le due attività si alimentano a vicenda: le scoperte dell'elettromagnetismo hanno reso possibili il motore elettrico, la radio e il telefono cellulare; a loro volta, strumenti tecnologici sempre più precisi (telescopi, microscopi, rivelatori, computer) permettono agli scienziati di osservare fenomeni prima inaccessibili.

DA RICORDARE

La fisica studia i fenomeni naturali più generali e li descrive con **leggi matematiche controllate da esperimenti**. La tecnologia applica queste conoscenze per costruire oggetti e risolvere problemi; la scienza, a sua volta, usa gli strumenti costruiti dalla tecnologia.

1.2 Il metodo sperimentale

Come si arriva a conoscere una legge della natura? Non esiste una ricetta unica, valida per ogni scoperta, ma il lavoro dei fisici segue un percorso riconoscibile, che chiamiamo **metodo sperimentale** (o metodo scientifico): un procedimento in cui le idee sulla natura vengono formulate in modo preciso e poi messe alla prova con esperimenti controllati e ripetibili. Vediamo le sue tappe, usando come filo conduttore il pendolo dell'introduzione.

1.2.1 Osservare e porre domande

Tutto comincia con l'**osservazione** di un fenomeno: guardare con attenzione, notare regolarità e differenze, porsi domande. L'osservazione può essere *qualitativa* («il sasso oscilla avanti e indietro e poi si ferma») oppure *quantitativa*, quando si esprime con numeri ottenuti da una misura («un'oscillazione completa dura circa due secondi»). Osservare bene non è facile: richiede di separare ciò che si vede davvero da ciò che si crede di vedere. Un buon osservatore annota le condizioni in cui il fenomeno avviene (quanto è lungo lo spago? quanto è pesante il sasso? da quale altezza parte?), perché saranno proprio queste condizioni a suggerire le domande giuste.

1.2.2 Formulare un'ipotesi

Dalle osservazioni nasce una domanda precisa, e alla domanda si prova a dare una risposta provvisoria. Un'**ipotesi** è una spiegazione o una relazione proposta per un fenomeno, formulata in modo da poter essere controllata con un esperimento. «Il tempo di un'oscillazione dipende dalla lunghezza dello spago» è un'ipotesi; «il tempo di un'oscillazione non dipende dalla massa del sasso» è un'altra ipotesi. Non sono ancora conoscenze: sono affermazioni che potrebbero rivelarsi sbagliate. Ed è proprio questa la loro forza, perché un'ipotesi che può essere smentita da un esperimento ci dice qualcosa di preciso sul mondo.

1.2.3 Progettare ed eseguire un esperimento

Un **esperimento** è un'osservazione provocata e controllata: invece di aspettare che il fenomeno si presenti, lo si riproduce in condizioni scelte dallo sperimentatore, che le può modificare una alla volta e misurare ciò che succede. La differenza rispetto alla semplice osservazione è decisiva. Osservando i pendoli che capitano sotto gli occhi (un'altalena, il lampadario di una chiesa, un orologio a pendolo) cambiano contemporaneamente la lunghezza, la massa, la forma e il

punto di partenza: è impossibile capire quale di questi fattori conti davvero. In laboratorio, invece, posso costruire pendoli che differiscono per un solo aspetto e confrontarli. Nel paragrafo 1.6 vedremo come si progetta un esperimento di questo tipo.

1.2.4 Analizzare i dati e trarre conclusioni

I risultati delle misure si raccolgono in tabelle e si rappresentano con grafici, che rendono visibili le regolarità (lo farai in modo sistematico nel capitolo 5). A questo punto si confrontano i dati con l'ipotesi. Se i dati la smentiscono, l'ipotesi va corretta o abbandonata e il percorso ricomincia. Se i dati la confermano, e se la conferma regge quando l'esperimento viene ripetuto, anche da altri e in condizioni diverse, l'ipotesi diventa una **legge fisica**: una relazione stabile tra grandezze, verificata sperimentalmente, che descrive come si svolge un certo fenomeno. Spesso la legge si scrive con una formula; per esempio, nel capitolo 7 studierai la legge che lega l'allungamento di una molla alla forza che la tende.

1.2.5 Teorie e previsioni

Le leggi non restano isolate. Quando molte leggi diverse si possono ricavare da pochi principi comuni, i fisici costruiscono una **teoria**: un insieme coerente di principi, leggi e modelli che spiega una vasta classe di fenomeni. Una teoria non serve solo a riassumere ciò che si sa già; il suo valore principale è che permette di fare **previsioni**, cioè di dire in anticipo che cosa accadrà in situazioni non ancora osservate. Ogni previsione è una nuova occasione di controllo: se l'esperimento la conferma, la fiducia nella teoria cresce; se la smentisce, la teoria va rivista. Per questo il metodo sperimentale non è una scala che si sale una volta per tutte, ma un *ciclo* che non si chiude mai (Figura 1.1).

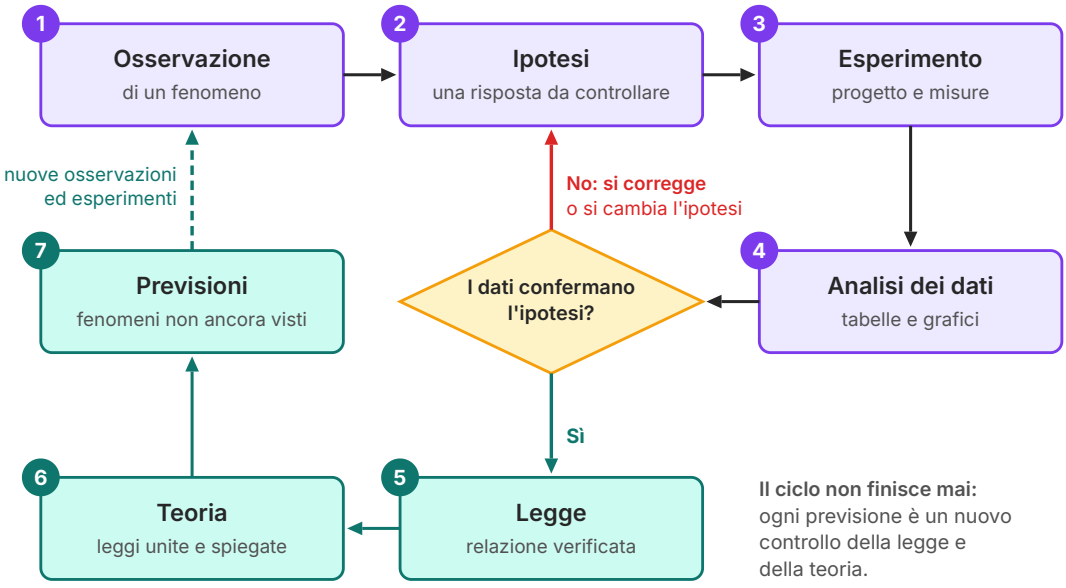

Figura 1.1 Il ciclo del metodo sperimentale. Se i dati smentiscono l'ipotesi si torna a formularne un'altra (freccia rossa); se la confermano si arriva a una legge, che con altre leggi entra in una teoria; le previsioni della teoria richiedono nuove osservazioni e nuovi esperimenti, e il ciclo ricomincia.

ERRORE FREQUENTE

«È solo una teoria» si dice nel linguaggio comune per indicare un'idea incerta, quasi un'opinione. Nel linguaggio scientifico è il contrario: una **teoria** è il punto più solido della conoscenza, un sistema di leggi confermato da moltissimi esperimenti e capace di fare previsioni. L'idea ancora da controllare si chiama **ipotesi**. Anche una teoria solida, però, resta aperta a correzioni se nuovi esperimenti la smentiscono.

1.2.6 I limiti del metodo

Sarebbe sbagliato immaginare il metodo sperimentale come una ricetta da seguire passo per passo. Nella pratica le tappe si intrecciano: un esperimento progettato per una domanda rivela un fenomeno inatteso; un'ipotesi nasce da un calcolo prima ancora che da un'osservazione; un'idea geniale arriva per analogia con un campo diverso. Inoltre nessun numero finito di esperimenti può dimostrare che una legge sia vera in assoluto: può solo mostrare che finora non è stata smentita. Infine ci sono domande a cui il metodo non sa rispondere, perché non riguardano fatti misurabili: se un quadro sia bello, se una scelta sia giusta. Queste domande sono importanti, ma appartengono ad altri ambiti del sapere, come l'arte, la filosofia, l'etica.

IN SINTESI

Osservazione → ipotesi → esperimento → analisi dei dati → legge → teoria → previsioni → nuovi esperimenti. A parole: si osserva un fenomeno, si propone una risposta controllabile, la si mette alla prova misurando, e la si accetta solo se i dati la confermano in modo ripetibile. Le leggi confermate si uniscono in teorie, le cui previsioni vengono a loro volta controllate.

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

Il **periodo** T di un pendolo (il tempo di un'oscillazione completa) si ottiene dividendo il tempo t_n impiegato per compiere n oscillazioni per il numero n di oscillazioni. Misurare molte oscillazioni insieme rende il risultato più affidabile.

1.3 Galileo e la nascita del metodo

Per molti secoli lo studio della natura si è basato soprattutto sul ragionamento e sull'autorità dei grandi pensatori del passato, in particolare di Aristotele (IV secolo a.C.). Aristotele era un osservatore acutissimo, ma la sua fisica era qualitativa e non prevedeva che le affermazioni venissero controllate con esperimenti progettati e misure. Una delle sue tesi, per esempio, era che i corpi più pesanti cadano più velocemente di quelli leggeri: sembra confermata dall'esperienza quotidiana (un sasso cade prima di una piuma), ma, come vedrai nel capitolo 16, è falsa. La differenza che vediamo è dovuta alla resistenza dell'aria, non al peso.

Il passo decisivo verso la scienza moderna è associato al nome di Galileo Galilei (Pisa 1564 – Arcetri 1642). Galileo non fu il primo a fare esperimenti, ma fu il più influente tra i primi a costruire in modo sistematico un metodo in cui esperimento e matematica lavorano insieme. Nella *Lettera a Cristina di Lorena* (1615) indicò i due pilastri della conoscenza della natura con una formula rimasta celebre: le «sensate esperienze e necessarie dimostrazioni». Le *sensate esperienze* sono le osservazioni e gli esperimenti, cioè ciò che si conosce attraverso i sensi, aiutati dagli strumenti; le *necessarie dimostrazioni* sono i ragionamenti matematici rigorosi che collegano i dati e ne ricavano conseguenze. Né l'una né l'altra cosa basta da sola: l'esperienza senza ragionamento è una raccolta di curiosità; il ragionamento senza esperienza rischia di costruire castelli in aria.

Qualche anno dopo, nel *Saggiatore* (1623), Galileo spiegò perché la matematica è indispensabile con un'immagine famosa (per «filosofia» Galileo intende qui la filosofia naturale, cioè la scienza della natura):

> *«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 [...].»*

Oggi i «caratteri» del libro della natura comprendono anche equazioni, grafici, vettori; ma l'idea di Galileo è ancora quella che guida la fisica: per capire un fenomeno bisogna misurarlo e descriverlo con relazioni matematiche.

APPROFONDIMENTO

Galileo e il pendolo

Secondo un racconto tramandato dal suo allievo e biografo Vincenzo Viviani, Galileo, ancora giovane, avrebbe notato nel Duomo di Pisa che le oscillazioni di una lampada sospesa sembravano durare sempre lo stesso tempo, anche quando diventavano più piccole, e le avrebbe confrontate con i battiti del proprio polso. Non sappiamo se l'episodio sia andato davvero così: gli storici lo considerano un aneddoto non documentato. È certo invece che Galileo studiò a lungo i pendoli e ne discusse le proprietà nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638). La proprietà che le piccole oscillazioni di un pendolo abbiano tutte quasi la stessa durata, detta *isocronismo*, fu poi sfruttata per costruire orologi molto più precisi di quelli dell'epoca.

1.4 Modelli e semplificazioni

Torniamo al sasso appeso allo spago. Se volessimo descriverlo in *tutti* i suoi dettagli dovremmo tener conto della forma irregolare del sasso, della massa e dell'elasticità dello spago, dell'attrito nel punto in cui lo spago è legato, della resistenza dell'aria, delle correnti d'aria nella stanza, perfino della rotazione della Terra. Un compito impossibile, e soprattutto inutile: la maggior parte di questi dettagli cambia il risultato in modo trascurabile. La fisica procede in un altro modo: costruisce modelli.

Un **modello** è una rappresentazione semplificata di un sistema reale, che conserva solo le caratteristiche essenziali per il fenomeno che si vuole studiare e trascura le altre. Il modello del pendolo che userai in questo libro si chiama **pendolo semplice**: un corpo di dimensioni trascurabili appeso a un filo sottile e inestensibile di massa trascurabile, libero di oscillare senza attriti attorno al punto di sospensione (Figura 1.2). Nessun pendolo reale è così; ma un sasso piccolo appeso a un filo da pesca lungo un metro gli somiglia moltissimo, e le previsioni del modello si accordano con le misure reali entro differenze piccolissime.

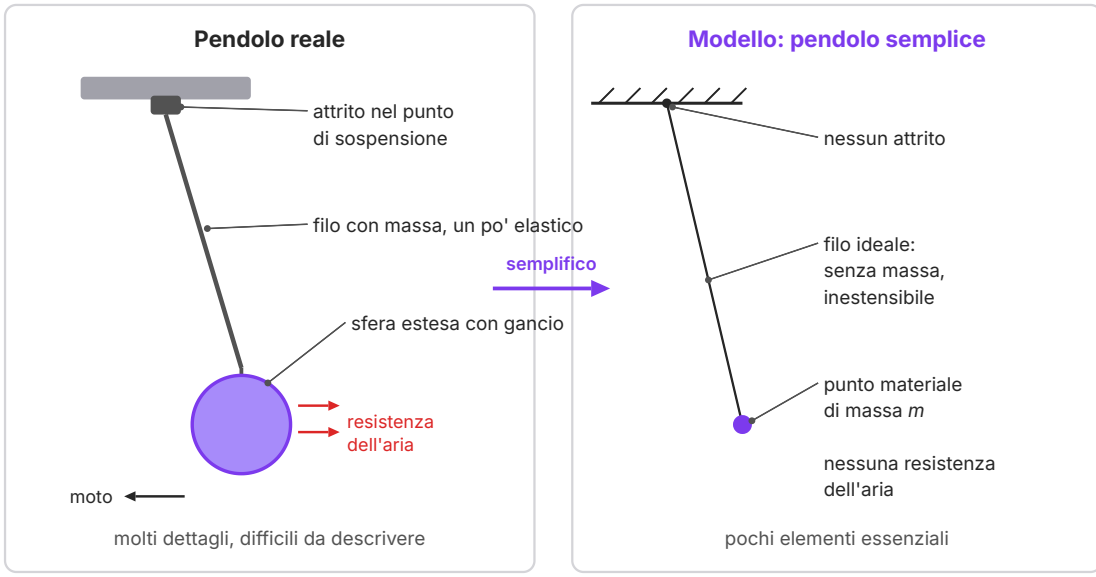

Figura 1.2 Dalla realtà al modello. A sinistra un pendolo reale, con i dettagli che ne complicano la descrizione: la sfera ha dimensioni e un gancio, il filo ha una massa e si allunga un poco, nel punto di sospensione c'è attrito, l'aria frena il moto. A destra il modello del pendolo semplice, che conserva solo gli elementi essenziali: un punto materiale, un filo ideale, nessun attrito.

1.4.1 Alcuni modelli fondamentali

Alcuni modelli tornano così spesso da avere un nome proprio; li incontrerai più volte nel corso dell'anno.

- Il **punto materiale** è un corpo di cui si trascurano forma e dimensioni, rappresentato da un punto che possiede tutta la sua massa. È un buon modello quando le dimensioni del corpo sono piccole rispetto alle distanze in gioco: la Terra nel suo moto attorno al Sole (il raggio terrestre è decine di migliaia di volte più piccolo della distanza Terra–Sole), un'automobile nel viaggio da Roma a Milano, la sfera di un pendolo lungo.
- 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 rotazioni, per esempio per una porta che gira sui cardini o per un'asta in equilibrio (capitoli 10 e 11).
- Il **fluido ideale** è un modello dei liquidi che li considera incomprimibili e privi di attriti interni; lo userai nella quarta parte del libro.

Lo stesso oggetto può essere descritto con modelli diversi a seconda della domanda. Per calcolare quanto tempo impiega la Terra a percorrere la sua orbita la trattiamo come un punto materiale; per spiegare l'alternarsi del giorno e della notte dobbiamo invece considerarla un corpo esteso che ruota su se stesso. Scegliere il modello giusto fa parte del lavoro del fisico.

1.4.2 Le idealizzazioni e perché funzionano

Oltre a semplificare gli oggetti, i modelli semplificano le condizioni in cui si trovano. Queste semplificazioni si chiamano **idealizzazioni**: si immagina, per esempio, che non ci sia attrito, che un filo sia perfettamente inestensibile e privo di massa, che la resistenza dell'aria sia nulla. Nessuna di queste condizioni si realizza esattamente nella realtà. Perché allora le idealizzazioni funzionano?

Funzionano perché, in molte situazioni, l'effetto che trascurano è *piccolo* rispetto a quelli che consideriamo, e il risultato cambia di poco. L'allungamento di un filo da pesca sotto il peso di un sasso è di frazioni di millimetro su un metro; la resistenza dell'aria su una sfera di metallo che oscilla lentamente è minima. Un'idealizzazione è quindi una scelta consapevole, non una svista: chi la fa deve sapere quanto sta trascurando e controllare, alla fine, che il modello dia risultati in accordo con le misure. Quando non è così, il modello va arricchito. Inoltre le idealizzazioni permettono di scoprire leggi che i dettagli nasconderebbero: proprio immaginando di eliminare la resistenza dell'aria Galileo capì che tutti i corpi, nel vuoto, cadrebbero con lo stesso moto.

> **DA RICORDARE**
> Un modello non è una copia della realtà ma una sua **semplificazione utile**: conserva ciò che conta per la domanda che ci poniamo e trascura il resto. Un buon modello si giudica dal confronto con le misure, non dalla sua somiglianza con l'oggetto reale.

1.5 Come la scienza controlla se stessa

Che cosa distingue un'affermazione scientifica da un'opinione, da una superstizione o da una pubblicità? Non il fatto di essere «sicuramente vera»: abbiamo visto che nessuna legge può essere dimostrata vera per sempre. La differenza sta nel modo in cui l'affermazione si espone al controllo.

1.5.1 Falsificabilità

Il filosofo della scienza Karl Popper ha proposto un criterio semplice: un'affermazione è scientifica se è **falsificabile**, cioè se si può immaginare un esperimento il cui risultato la smentirebbe. «Il periodo di un pendolo non dipende dalla massa della sfera» è falsificabile: basta costruire due pendoli uguali con sfere di massa diversa e misurarne i periodi; se fossero molto diversi, l'affermazione sarebbe smentita. Invece «esistono forze che nessuno strumento potrà mai rilevare» non è falsificabile: nessun esperimento potrà mai darle torto, e proprio per questo non ci dice nulla di controllabile sul mondo.

C'è un'asimmetria importante. Mille esperimenti in accordo con una legge non bastano a dimostrarla in assoluto, mentre un solo esperimento in disaccordo, purché ripetuto e controllato, basta a metterla in crisi. Per questo un esperimento che smentisce una previsione non è un fallimento: è un'informazione preziosa, spesso la più preziosa di tutte.

1.5.2 Il dominio di validità

Quando un esperimento smentisce una legge che aveva funzionato a lungo, di solito la legge non viene buttata via: si scopre piuttosto che vale solo entro certi limiti. Ogni legge ha un **dominio di validità**, cioè l'insieme delle condizioni in cui le sue previsioni concordano con le misure. Lo stesso pendolo ce ne dà un esempio: le oscillazioni hanno praticamente la stessa durata finché l'ampiezza è piccola; per ampiezze fino a circa 20° il periodo cambia di meno dell'1%, ma per oscillazioni molto ampie la differenza diventa evidente. Un esempio più grande: la meccanica che studierai il prossimo anno descrive con straordinaria precisione il moto di auto, palloni e pianeti, ma non funziona per corpi che si muovono a velocità vicine a quella della luce. Lì serve la teoria della relatività, che a basse velocità dà gli stessi risultati della meccanica classica. Una nuova teoria, dunque, non cancella la vecchia: ne delimita il campo e la include come caso particolare.

> **ERRORE FREQUENTE**
> «Una legge fisica, una volta scoperta, vale sempre e ovunque.» Non è così: ogni legge è stata verificata in un certo intervallo di condizioni e vale **entro il suo dominio di validità**. Usarla fuori da quel dominio (per esempio con oscillazioni molto ampie, o a velocità altissime) può portare a previsioni sbagliate. Quando usi una formula, chiediti sempre in quali condizioni è stata ricavata.

1.5.3 Riproducibilità e comunità scientifica

Un risultato sperimentale ha valore solo se è **riproducibile**: chiunque ripeta l'esperimento nelle stesse condizioni, con strumenti adatti, deve ottenere risultati compatibili. Per questo chi pubblica un esperimento descrive con cura gli strumenti, il procedimento e i dati, in modo che altri possano ripeterlo e, se è il caso, trovarvi errori. La scienza è un'impresa collettiva: prima di essere pubblicato su una rivista scientifica, un lavoro viene di norma esaminato da altri esperti del settore, che ne valutano metodi e conclusioni (è la cosiddetta **revisione tra pari**, in inglese *peer review*). Nessuno, nemmeno il più grande scienziato, è creduto sulla parola: conta solo ciò che resiste ai controlli.

1.5.4 La fisica nella vita di ogni giorno

Le conoscenze costruite con questo metodo hanno cambiato la vita quotidiana in modi che spesso non notiamo. In *medicina*, i raggi X (scoperti da Wilhelm Röntgen nel 1895) permettono

di vedere le ossa senza aprire il corpo; l'ecografia usa ultrasuoni, cioè onde sonore troppo acute per il nostro orecchio; la risonanza magnetica sfrutta l'elettromagnetismo e la fisica dei nuclei atomici; la radioterapia usa radiazioni per distruggere cellule tumorali. In *ingegneria*, la statica e la scienza dei materiali permettono di progettare ponti, edifici antisismici, dighe e aerei. Nelle *telecomunicazioni*, onde elettromagnetiche trasportano telefonate, video e dati attraverso l'aria e le fibre ottiche. Il prossimo riquadro racconta un esempio sorprendente: il navigatore satellitare.

COLLEGAMENTI

Il GPS e la fisica più «lontana»

Il navigatore di uno smartphone calcola la propria posizione misurando quanto tempo impiegano i segnali radio emessi da diversi satelliti ad arrivare fino a lui. Le onde radio viaggiano alla velocità della luce, circa 300 000 km al secondo: in un milionesimo di secondo percorrono circa 300 m. Per localizzare un'auto con un errore di pochi metri servono quindi orologi precisissimi: i satelliti trasportano orologi atomici. Ma c'è di più: secondo la teoria della relatività il tempo scorre in modo leggermente diverso per orologi che si muovono velocemente e che si trovano a quote diverse. Per gli orologi dei satelliti GPS l'effetto complessivo è di circa 38 milionesimi di secondo al giorno rispetto agli orologi a terra. Sembra nulla, eppure, se il sistema non lo correggesse, gli errori di posizione crescerebbero di chilometri ogni giorno. Una teoria nata per rispondere a domande astratte sullo spazio e sul tempo è diventata indispensabile per arrivare a casa di un amico.

1.6 Progettare un esperimento: il pendolo

Mettiamo ora alla prova tutto ciò che abbiamo detto con un esperimento vero e proprio. La domanda è: *da che cosa dipende la durata delle oscillazioni di un pendolo?*

1.6.1 Le grandezze in gioco

Il nostro pendolo è una piccola sfera appesa a un filo (Figura 1.3). Quando la sfera è ferma, il filo è verticale: è la *posizione di equilibrio*. Se la spostiamo di lato e la lasciamo andare, la sfera oscilla tra due posizioni estreme, A e B. Una **oscillazione** completa è il moto di andata e ritorno da A a B e di nuovo ad A. Il tempo impiegato per un'oscillazione completa si chiama **periodo** e si indica con T; si misura in secondi (s). Le grandezze che potrebbero influire sul periodo sono almeno tre: la *lunghezza* L del pendolo, misurata dal punto di sospensione O al centro della sfera; la *massa* m della sfera; l'**ampiezza** dell'oscillazione, cioè l'angolo θ di cui il filo viene spostato dalla verticale nel momento in cui la sfera viene lasciata.

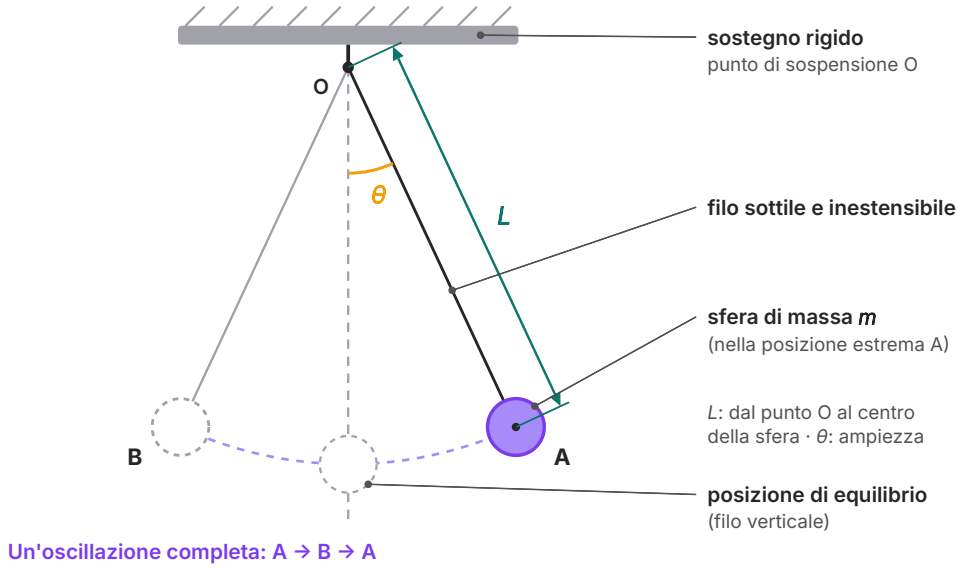

Figura 1.3 Il pendolo usato nell'esperimento. La lunghezza L si misura dal punto di sospensione O al centro della sfera; l'ampiezza θ è l'angolo tra il filo e la verticale nella posizione estrema A. Un'oscillazione completa porta la sfera da A a B e di nuovo ad A; la sua durata è il periodo T.

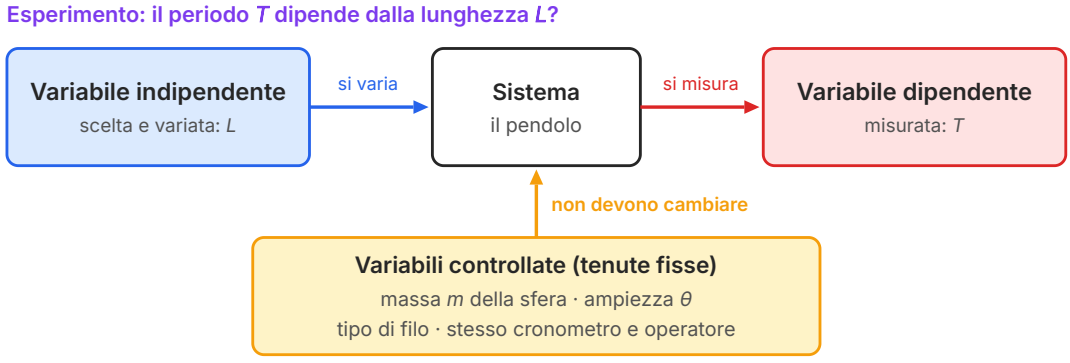

Figura 1.4 I ruoli delle variabili nella prima serie di misure. Lo sperimentatore sceglie e fa variare la lunghezza L (variabile indipendente), misura il periodo T (variabile dipendente) e tiene fisse tutte le altre grandezze che potrebbero influire sul risultato (variabili controllate).

1.6.2 Variabili indipendente, dipendente e controllate

In un esperimento ben progettato le grandezze hanno ruoli diversi (Figura 1.4). La **variabile indipendente** è la grandezza che lo sperimentatore sceglie e fa variare deliberatamente; la **variabile dipendente** è la grandezza che si misura per vedere se e come cambia al variare della

prima; le **variabili controllate** sono tutte le altre grandezze che potrebbero influire sul risultato e che perciò vanno tenute fisse. La regola d'oro è: **si fa variare una sola variabile indipendente alla volta**. Se cambiassimo insieme la lunghezza e la massa e vedessimo cambiare il periodo, non sapremmo a quale delle due attribuire l'effetto.

Per il pendolo organizziamo quindi tre serie di misure. Nella prima facciamo variare la lunghezza e teniamo fisse massa e ampiezza; nella seconda facciamo variare la massa, tenendo fisse lunghezza e ampiezza; nella terza facciamo variare l'ampiezza, tenendo fisse lunghezza e massa. In ogni serie il periodo è la variabile dipendente.

1.6.3 Che cosa ci dicono i dati

La Figura 1.5 riporta i risultati tipici della prima serie, in cui varia la lunghezza. Ogni punto rappresenta una coppia di valori (lunghezza, periodo); il trattino verticale che lo attraversa, detto *barra d'incertezza*, ricorda che ogni misura ha un margine di imprecisione (lo studierai nei capitoli 4 e 5). Il grafico mostra con chiarezza che il periodo *cresce* con la lunghezza, ma non nello stesso rapporto: quando la lunghezza passa da 0,20 m a 0,80 m, cioè diventa quattro volte più grande, il periodo passa da 0,90 s a 1,80 s, cioè diventa soltanto due volte più grande. I punti non stanno su una retta, ma su una curva che si piega verso destra.

Abbiamo così trasformato un'osservazione qualitativa («con lo spago lungo il sasso va più piano») in una conoscenza quantitativa e controllabile, che permette previsioni. Per esempio: se con 1,00 m di filo il periodo è circa 2,0 s, quale lunghezza servirebbe per avere un periodo di circa 1,0 s? Poiché dimezzare il periodo richiede una lunghezza quattro volte minore, servono circa 0,25 m. Puoi controllare questa previsione costruendo il pendolo e misurando: è esattamente il ciclo della Figura 1.1.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere una tabella di dati e fare una previsione

Problema. Un gruppo di studenti misura il periodo di tre pendoli di lunghezza diversa (stessa sfera, ampiezza 10°) e ottiene: $L = 0{,}40$ m, $T = 1{,}27$ s; $L = 0{,}80$ m, $T = 1{,}80$ s; $L = 1{,}60$ m, $T = 2{,}54$ s. Uno studente sostiene: «Raddoppiando la lunghezza, raddoppia il periodo». Ha ragione? Che periodo prevedi per $L = 0{,}10$ m?

Soluzione. Confrontiamo i rapporti. Da 0,40 m a 0,80 m la lunghezza raddoppia, ma il periodo passa da 1,27 s a 1,80 s: il rapporto è $1{,}80/1{,}27 \approx 1{,}42$, non 2. Lo stesso accade da 0,80 m a 1,60 m: $2{,}54/1{,}80 \approx 1{,}41$. Lo studente ha torto: raddoppiando la lunghezza il periodo aumenta di circa 1,4 volte. Confrontando invece 0,40 m e 1,60 m (lunghezza quadruplicata) troviamo $2{,}54/1{,}27 = 2{,}00$: il periodo raddoppia. Per prevedere il periodo con $L = 0{,}10$ m, osserviamo che 0,10 m è un quarto di 0,40 m: il periodo sarà la metà di 1,27 s, cioè circa 0,64 s. È una previsione che si può controllare subito in laboratorio.

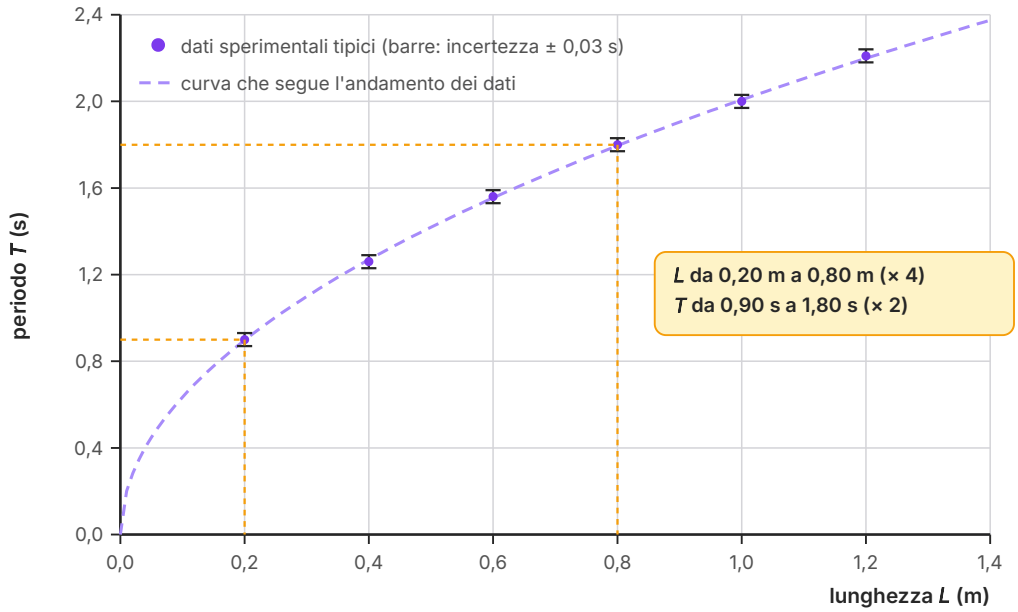

Figura 1.5 Periodo di un pendolo in funzione della sua lunghezza (dati sperimentali tipici, ampiezza 10°). Il periodo aumenta con la lunghezza, ma più lentamente: se la lunghezza diventa quattro volte più grande, il periodo raddoppia. La curva tratteggiata segue l'andamento dei punti.

ESEMPIO SVOLTO

Misurare il periodo contando molte oscillazioni

Problema. Una studentessa misura il tempo di 20 oscillazioni complete di un pendolo e ottiene 28,4 s. (a) Quanto vale il periodo? (b) Usando la Figura 1.5, stima la lunghezza del pendolo. (c) Perché conviene misurare 20 oscillazioni invece di una sola?

Soluzione. (a) Il periodo è il tempo di un'oscillazione: $T = t_{20}/20 = 28{,}4\ \text{s} / 20 = 1{,}42\ \text{s}$.

(b) Nel grafico, il valore $T = 1{,}42$ s cade fra i punti di 0,40 m (1,26 s) e di 0,60 m (1,56 s), un po' più vicino al secondo; seguendo la curva si legge una lunghezza di circa 0,50 m.

(c) Chi usa il cronometro a mano commette un piccolo ritardo nel premere il pulsante, all'inizio e alla fine, che può arrivare a qualche decimo di secondo. Questo ritardo è più o meno lo stesso sia che si misuri un'oscillazione sia che se ne misurino venti; dividendo per 20, però, il suo effetto sul periodo diventa venti volte più piccolo. Misurare molte oscillazioni rende il periodo più affidabile.

Nota che non abbiamo ancora scritto una formula per il periodo: per ora ci basta aver capito *da che cosa* dipende e *come*. Nel capitolo 5 imparerai a riconoscere dai dati il tipo di relazione che

lega due grandezze, e scoprirai che il nostro pendolo nasconde una regolarità molto semplice.

COLLEGAMENTI

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

Materiali. Un sostegno con morsetto; filo sottile e poco elastico (per esempio filo da pesca), lungo circa 1,5 m; tre sfere forate di massa diversa (per esempio 50 g, 100 g, 200 g) oppure dadi metallici; un metro a nastro; un goniometro di cartone fissato dietro al punto di sospensione; un cronometro (va bene quello dello smartphone).

Procedimento. (1) Fissa il filo al sostegno e regola la lunghezza L, misurata fino al centro della sfera. (2) Sposta la sfera di un angolo piccolo, circa 10°, e lasciala andare senza spingerla. (3) Dopo un paio di oscillazioni, fai partire il cronometro mentre la sfera passa per la posizione di equilibrio (il punto più basso, dove il passaggio si individua meglio) e misura il tempo t_{10} di 10 oscillazioni complete, contando i passaggi nello stesso verso; il periodo è $T = t_{10}/10$. (4) Ripeti con lunghezze diverse (stessa sfera, stessa ampiezza), poi con masse diverse (stessa lunghezza, stessa ampiezza), poi con ampiezze diverse, sempre piccole (stessa lunghezza, stessa massa).

Tabella 1.2 Seconda serie: lunghezza fissa L = 0,80 m, ampiezza 10°. Dati tipici.

Massa m (g)	Tempo di 10 oscillazioni t_{10} (s)	Periodo T (s)
50	17,9	1,79
100	18,0	1,80
200	17,9	1,79

Che cosa si conclude. Quadruplicando la massa il periodo resta lo stesso: le piccole differenze (un centesimo di secondo) sono dello stesso ordine delle imprecisioni del cronometraggio, di cui parleremo nel capitolo 4. Nello stesso modo si trova che, per ampiezze piccole, il periodo quasi non dipende dall'ampiezza. Il periodo dipende invece in modo netto dalla lunghezza (Figura 1.5).

Sicurezza. Fissa bene il sostegno al tavolo con un morsetto e tieni il viso lontano dalla traiettoria della sfera.

Per la relazione. Scrivi una breve relazione con scopo, materiali, procedimento e la tabella dei periodi; per ogni serie di misure dichiara quale grandezza hai fatto variare e quali hai tenuto fisse. Nelle conclusioni rispondi alla domanda del titolo e spiega perché le piccole differenze fra i periodi misurati con masse diverse non bastano a dire che la massa conta. Come si organizza una relazione completa lo vedremo alla fine del capitolo 5.

DA RICORDARE

Per piccole ampiezze il periodo di un pendolo **dipende dalla lunghezza** del filo, **non dipende dalla massa** della sfera e **quasi non dipende dall'ampiezza**. Quadruplicando la lunghezza il periodo raddoppia.

SINTESI

- La fisica studia i fenomeni naturali più generali e li descrive con leggi matematiche controllate da esperimenti e misure.
- I principali settori sono meccanica, termologia, ottica, acustica e onde, elettromagnetismo e fisica moderna.
- La tecnologia applica le conoscenze scientifiche per costruire dispositivi; la scienza usa gli strumenti della tecnologia.
- Il metodo sperimentale procede per osservazione, ipotesi, esperimento, analisi dei dati, legge, teoria e previsioni: è un ciclo che non si chiude mai.
- Un'ipotesi è una risposta provvisoria e controllabile; una legge è una relazione verificata e riproducibile; una teoria è un sistema coerente di leggi che spiega e prevede.
- Galileo pose le basi del metodo moderno sulle «sensate esperienze e necessarie dimostrazioni» e scrisse che il libro della natura è scritto «in lingua matematica».
- Un modello è una rappresentazione semplificata della realtà; punto materiale, corpo rigido e fluido ideale sono modelli fondamentali.
- Le idealizzazioni (assenza di attrito, filo inestensibile) funzionano quando ciò che trascurano ha effetti piccoli.
- Un'affermazione scientifica deve essere falsificabile; ogni legge vale entro un dominio di validità.
- I risultati devono essere riproducibili e vengono vagliati dalla comunità scientifica.
- In un esperimento si fa variare una sola variabile indipendente alla volta, si misura la variabile dipendente e si tengono fisse le variabili controllate.
- Il periodo di un pendolo dipende dalla lunghezza, non dalla massa e, per piccole ampiezze, quasi non dall'ampiezza.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● La parola «fisica» deriva da un termine greco che significa:
   - **A.** movimento
   - **B.** natura
   - **C.** misura
   - **D.** materia

2. ● Quale sequenza mette nell'ordine corretto alcune fasi del metodo sperimentale?
   - **A.** legge, ipotesi, esperimento, osservazione
   - **B.** ipotesi, osservazione, legge, esperimento
   - **C.** osservazione, ipotesi, esperimento, legge
   - **D.** esperimento, legge, osservazione, ipotesi

3. ● Un'ipotesi scientifica è:
   - **A.** una risposta provvisoria che si può controllare con un esperimento
   - **B.** una legge già verificata da molti esperimenti
   - **C.** un'opinione personale che non si può controllare
   - **D.** il risultato di una misura

4. ● In un esperimento sul pendolo si fa variare la lunghezza del filo e si misura il periodo. Il periodo è la variabile:
   - **A.** indipendente
   - **B.** controllata
   - **C.** costante
   - **D.** dipendente

5. ● Secondo Galileo la conoscenza della natura si fonda su:
   - **A.** l'autorità degli antichi e il buon senso
   - **B.** le «sensate esperienze» e le «necessarie dimostrazioni»
   - **C.** l'intuizione e l'immaginazione
   - **D.** l'osservazione, senza bisogno di calcoli

6. ●● Il modello del punto materiale è adatto quando:
   - **A.** il corpo è molto leggero
   - **B.** il corpo è fermo
   - **C.** le dimensioni del corpo sono trascurabili rispetto alle distanze in gioco
   - **D.** il corpo non si deforma

7. ●● Quale di queste affermazioni è falsificabile?
   A. «Esistono forze che nessuno strumento potrà mai rilevare.»
   B. «Domani forse pioverà, oppure no.»
   C. «La natura è armoniosa.»
   D. «Il periodo di un pendolo non dipende dalla massa della sfera.»

8. ●● In fisica una teoria è:
   A. un sistema coerente di principi e leggi che spiega molti fenomeni e permette previsioni
   B. un'idea non ancora controllata dagli esperimenti
   C. una verità definitiva che non potrà mai essere corretta
   D. la descrizione di un singolo fenomeno

9. ●●● Un risultato sperimentale si dice riproducibile se:
   A. lo sperimentatore lo ottiene almeno una volta
   B. chiunque ripeta l'esperimento nelle stesse condizioni ottiene risultati compatibili
   C. è stato pubblicato su una rivista
   D. è confermato da un calcolo al computer

Vero o falso

10. ● Una legge fisica, una volta scoperta, vale in qualunque condizione. V / F

11. ● Nel linguaggio scientifico una «teoria» è una semplice congettura non ancora controllata. V / F

12. ●● In un esperimento ben progettato si fa variare una sola variabile indipendente alla volta. V / F

13. ● La tecnologia usa le conoscenze scientifiche per costruire dispositivi e risolvere problemi pratici. V / F

14. ●● Un esperimento che smentisce una previsione è inutile per la scienza. V / F

Applicare

15. ● Un pendolo compie 10 oscillazioni complete in 15,0 s. Calcola il periodo.

16. ● Completa. In un esperimento la grandezza che lo sperimentatore sceglie e fa variare si chiama variabile _____ ; quella che misura per vedere come cambia si chiama variabile _____ ; quelle che tiene fisse si chiamano variabili _____ .

17. ● Indica a quale settore della fisica appartiene principalmente ciascun fenomeno: (a) l'arcobaleno; (b) l'acqua che bolle in una pentola; (c) una calamita che attira un chiodo; (d) una mela che cade; (e) la radioattività di un minerale.

18. ●● Usa il grafico della Figura 1.5. (a) Quanto vale il periodo di un pendolo lungo 0,60 m? (b) Quale lunghezza deve avere un pendolo per avere un periodo di circa 2,0 s?

19. ● Classifica ciascuna frase come osservazione, ipotesi, legge o previsione. (a) «La sfera torna al punto di partenza dopo circa due secondi.» (b) «Forse il periodo dipende dalla lunghezza del filo.» (c) «Per piccole ampiezze il periodo di un pendolo non dipende dalla massa della sfera.» (d) «Con un filo di 0,25 m il periodo sarà di circa 1 s.»

20. ● Quale modello (punto materiale, corpo rigido, fluido ideale) useresti per descrivere: (a) la Terra nel suo moto attorno al Sole; (b) una porta che ruota sui cardini; (c) l'acqua ferma in una piscina, di cui si vuole calcolare la pressione sul fondo; (d) un'automobile nel viaggio da Roma a Milano?

21. ●● Si vuole stabilire se il tempo che una pallina impiega a cadere da un tavolo dipende dalla sua massa. Indica la variabile indipendente, la variabile dipendente e almeno due variabili controllate.

22. ● Un pendolo ha un periodo di 1,8 s. Quanto tempo impiega a compiere 25 oscillazioni complete?

Problemi

23. ●● Nella Tabella 1.2 sono riportati i tempi di 10 oscillazioni di un pendolo lungo 0,80 m con sfere di massa diversa. (a) Verifica i valori del periodo. (b) Di quante volte aumenta la massa dalla prima all'ultima riga? (c) Che cosa concludi sulla dipendenza del periodo dalla massa?

24. ●● Luca misura direttamente una sola oscillazione di un pendolo e ottiene 1,6 s. Poi misura 20 oscillazioni e ottiene 36,2 s. (a) Quanto vale il periodo secondo la seconda misura? (b) Quale delle due misure è più affidabile e perché?

25. ●●● Un gruppo misura: $L = 0{,}25$ m, $T = 1{,}00$ s; $L = 1{,}00$ m, $T = 2{,}01$ s; $L = 2{,}25$ m, $T = 3{,}01$ s. (a) Di quante volte aumenta la lunghezza passando dal primo al secondo pendolo, e di quante il periodo? E dal primo al terzo? (b) Prevedi il periodo di un pendolo lungo 4,00 m. (c) Prevedi la lunghezza di un pendolo con periodo 0,50 s.

26. ●●● Un orologio a pendolo è regolato in modo che il pendolo abbia un periodo di 2,00 s; il meccanismo fa avanzare le lancette di 2 s a ogni oscillazione completa. (a) Quante oscillazioni compie il pendolo in un'ora? (b) In estate l'asta del pendolo si dilata e il periodo diventa 2,001 s. Quante oscillazioni compie in un giorno (86 400 s)? (c) Di quanti secondi resta indietro l'orologio in un giorno?

27. ●● Marta confronta due pendoli: il primo ha $L = 0{,}40$ m e una sfera di 100 g, e ha periodo 1,27 s; il secondo ha $L = 0{,}80$ m e una sfera di 200 g, e ha periodo 1,80 s. Conclude: «Il periodo aumenta con la massa». (a) Perché la conclusione non è giustificata? (b) Una terza misura con $L = 0{,}80$ m e sfera di 100 g dà 1,79 s. Che cosa si può concludere ora?

28. ●●● Nel riquadro sul GPS si afferma che le onde radio percorrono circa 300 000 km al secondo. (a) Quanti metri percorrono in un milionesimo di secondo? (b) Se l'orologio di un satellite fosse in errore di 38 milionesimi di secondo, quale distanza percorrerebbe il segnale in quel tempo? Esprimi il risultato in chilometri. (c) Perché questo calcolo spiega la necessità di correggere gli orologi dei satelliti?

Ragionare e argomentare

29. ●● Trova l'errore nel ragionamento: «Ho lasciato cadere insieme un foglio di carta e una pietra: la pietra è arrivata prima. Quindi è dimostrato che i corpi più pesanti cadono sempre più in fretta.» Proponi un esperimento semplice per mettere alla prova la conclusione.

30. ●●● Progetta un esperimento per stabilire se il periodo di un pendolo dipende dall'ampiezza delle oscillazioni. Indica le variabili, il procedimento e il risultato che ti aspetti.

31. ●● Perché il modello del punto materiale è adatto a descrivere la Terra nel suo moto attorno al Sole, ma non a spiegare l'alternarsi del giorno e della notte?

32. ●●● Un compagno afferma: «La relatività è solo una teoria, quindi non è detto che sia vera». Rispondi spiegando il significato scientifico delle parole «teoria» e «ipotesi», e cita un'applicazione tecnologica che dipende dalla relatività.

PER APPROFONDIRE

- [SAG] Galileo Galilei, *Il Saggiatore*: il passo sul «libro della natura» scritto in lingua matematica.
- [GAL] Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*: le osservazioni sul pendolo e sulla caduta dei corpi.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: come le idee della fisica sono cambiate confrontandosi con gli esperimenti.
- [FEY] R. P. Feynman et al., *La fisica di Feynman*, vol. I, capitolo 1: la fisica come ricerca delle regole del «gioco» della natura.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: il capitolo introduttivo sul metodo scientifico.

Glossario del capitolo

Corpo rigido
Modello di un corpo esteso che non si deforma: le distanze fra i suoi punti restano costanti.

Dominio di validità
Insieme delle condizioni entro cui le previsioni di una legge o di una teoria concordano con le misure.

Esperimento
Osservazione provocata e controllata: il fenomeno viene riprodotto in condizioni scelte, variando un fattore alla volta e misurando.

Falsificabilità
Proprietà di un'affermazione per cui si può immaginare un esperimento il cui risultato la smentirebbe; è un requisito delle affermazioni scientifiche.

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

Fisica
Scienza che studia i fenomeni naturali più generali e li descrive con leggi matematiche controllate da esperimenti e misure.

Idealizzazione
Semplificazione consapevole delle condizioni di un problema (assenza di attrito, filo inestensibile, nessuna resistenza dell'aria) giustificata quando l'effetto trascurato è piccolo.

Ipotesi
Risposta provvisoria a una domanda su un fenomeno, formulata in modo da poter essere controllata ed eventualmente smentita da un esperimento.

Legge fisica
Relazione stabile tra grandezze, verificata sperimentalmente in modo riproducibile, che descrive come si svolge un fenomeno; vale entro un dominio di validità.

Metodo sperimentale
Procedimento della scienza moderna in cui le ipotesi sui fenomeni vengono formulate in modo preciso e controllate con esperimenti ripetibili; è un ciclo che non si chiude mai.

Modello
Rappresentazione semplificata di un sistema reale che conserva solo le caratteristiche essenziali per il fenomeno studiato.

Periodo (di un pendolo)
Tempo impiegato per compiere un'oscillazione completa (andata e ritorno); simbolo T, unità il secondo (s).

Previsione
Affermazione su ciò che accadrà in una situazione non ancora osservata, ricavata da una legge o da una teoria; il suo controllo sperimentale mette alla prova la teoria.

Punto materiale
Modello di un corpo di cui si trascurano forma e dimensioni, rappresentato da un punto dotato di massa; adatto quando le dimensioni sono piccole rispetto alle distanze in gioco.

Riproducibilità
Proprietà di un risultato sperimentale che si ottiene di nuovo, in modo compatibile, ripetendo l'esperimento nelle stesse condizioni, anche da parte di altri.

Tecnologia
Insieme delle applicazioni delle conoscenze scientifiche alla costruzione di dispositivi e alla soluzione di problemi pratici.

Teoria
Sistema coerente di principi, leggi e modelli che spiega una vasta classe di fenomeni e permette di fare previsioni controllabili.

Variabile controllata
In un esperimento, una grandezza che potrebbe influire sul risultato e che perciò viene tenuta fissa.

Variabile dipendente
In un esperimento, la grandezza che si misura per vedere se e come cambia al variare della variabile indipendente.

Variabile indipendente
In un esperimento, la grandezza che lo sperimentatore sceglie e fa variare deliberatamente.

Soluzioni

1. B. *Phýsis* in greco significa «natura».

2. C. Si osserva un fenomeno, si formula un'ipotesi, la si controlla con un esperimento e, se è confermata in modo riproducibile, si arriva a una legge.

3. A. Un'ipotesi è una risposta provvisoria, formulata in modo da poter essere controllata (ed eventualmente smentita) con un esperimento.

4. D. Il periodo è la grandezza che si misura al variare della lunghezza: è la variabile dipendente.

5. B. È la formula della *Lettera a Cristina di Lorena* (1615): esperimenti e ragionamenti matematici rigorosi.

6. C. Il punto materiale trascura forma e dimensioni: va bene quando queste sono piccole rispetto alle distanze in gioco, indipendentemente dalla massa.

7. D. Si può immaginare un esperimento (due pendoli uguali con sfere di massa diversa) che la smentirebbe; le altre tre affermazioni non possono essere smentite da nessuna misura.

8. A. Una teoria è un sistema coerente di principi e leggi, confermato da molti esperimenti, che spiega e prevede; resta comunque correggibile.

9. B. Riproducibile significa che chiunque ripeta l'esperimento nelle stesse condizioni ottiene risultati compatibili.

10. F. Ogni legge vale entro un dominio di validità (per esempio, l'isocronismo del pendolo vale per piccole ampiezze).

11. F. Nel linguaggio scientifico la congettura da controllare è l'ipotesi; la teoria è un sistema di leggi confermato da molti esperimenti.

12. V. Solo così si può attribuire con certezza la variazione della variabile dipendente alla variabile che è stata cambiata.

13. V. È la definizione di tecnologia data nel paragrafo 1.1.2.

14. F. Un esperimento che smentisce una previsione è un'informazione preziosa: mostra che l'ipotesi o la teoria va corretta, o ne delimita il dominio di validità.

15. $T = t_{10}/10 = 15{,}0\text{ s} / 10 = 1{,}50\text{ s}$.

16. indipendente; dipendente; controllate.

17. (a) ottica; (b) termologia; (c) elettromagnetismo; (d) meccanica; (e) fisica moderna (fisica nucleare).

18. (a) Circa 1,56 s (lettura del punto a 0,60 m). (b) Circa 1,00 m.

19. (a) osservazione (quantitativa); (b) ipotesi; (c) legge; (d) previsione.

20. (a) punto materiale; (b) corpo rigido; (c) fluido ideale (l'acqua ferma è praticamente incomprimibile e gli attriti interni non contano); (d) punto materiale.

21. Indipendente: la massa della pallina. Dipendente: il tempo di caduta. Controllate (esempi): l'altezza del tavolo, la forma e le dimensioni della pallina, il modo di lasciarla cadere (senza spinta), lo strumento di misura del tempo.

22. $t = 25 \cdot T = 25 \cdot 1{,}8\text{ s} = 45\text{ s}$.

23. (a) 17,9 s / 10 = 1,79 s; 18,0 s / 10 = 1,80 s; 17,9 s / 10 = 1,79 s: i valori sono corretti. (b) Da 50 g a 200 g la massa diventa 4 volte più grande. (c) Il periodo resta praticamente lo stesso (differenze di 0,01 s, dell'ordine delle imprecisioni del cronometraggio): il periodo non dipende dalla massa.

24. (a) $T = 36{,}2\text{ s} / 20 = 1{,}81\text{ s}$. (b) È più affidabile la seconda: il ritardo nell'azionare il cronometro (fino a qualche decimo di secondo) pesa allo stesso modo su una o su venti oscillazioni, ma dividendo per 20 il suo effetto sul periodo diventa venti volte più piccolo. Infatti la misura singola (1,6 s) si discosta di circa 0,2 s dal valore più affidabile.

25. (a) Dal primo al secondo: lunghezza × 4 (1,00/0,25), periodo × 2,01 ≈ 2. Dal primo al terzo: lunghezza × 9 (2,25/0,25), periodo × 3,01 ≈ 3. (b) 4,00 m = 16 × 0,25 m, quindi il periodo diventa circa 4 volte 1,00 s: $T \approx 4{,}0$ s. (c) Per dimezzare il periodo (da 1,00 s a 0,50 s) la lunghezza deve diventare 4 volte più piccola: $L \approx 0{,}25$ m / 4 ≈ 0,063 m, cioè circa 6 cm.

26. (a) 3600 s / 2,00 s = 1800 oscillazioni. (b) 86 400 s / 2,001 s ≈ 43 178 oscillazioni (invece delle 43 200 previste). (c) L'orologio segna 43 178 × 2 s ≈ 86 357 s invece di 86 400 s: resta indietro di circa 43 s al giorno.

27. (a) Marta ha cambiato insieme due variabili (lunghezza e massa): non può sapere quale delle due abbia causato l'aumento del periodo. (b) Confrontando le due misure con $L = 0{,}80$ m (100 g → 1,79 s; 200 g → 1,80 s), a parità di lunghezza il periodo non cambia con la massa; confrontando le due misure con 100 g (0,40 m → 1,27 s; 0,80 m → 1,79 s) si vede che il periodo cresce con la lunghezza. È la lunghezza, non la massa, a far variare il periodo.

28. (a) 300 000 km = 300 000 000 m; in un milionesimo di secondo: 300 000 000 m / 1 000 000 = 300 m. (b) 38 × 300 m = 11 400 m ≈ 11 km. (c) Il ricevitore calcola le distanze dai tempi di arrivo dei segnali: un errore di pochi milionesimi di secondo negli orologi produce errori di chilometri nella posizione, quindi gli orologi devono essere corretti anche per gli effetti previsti dalla relatività.

29. Traccia di risposta. Errori: si generalizza da un solo esperimento; si sono cambiate insieme più variabili (massa, forma, superficie esposta all'aria), quindi non si può attribuire la differenza al peso; si trascura la resistenza dell'aria. Esperimento: appallottolare lo stesso foglio e lasciarlo cadere insieme alla pietra dalla stessa altezza: arrivano quasi insieme, anche se la massa del foglio non è cambiata. È la resistenza dell'aria, non il peso, a rallentare il foglio disteso.

30. Traccia di risposta. Variabile indipendente: l'ampiezza θ (per esempio 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, misurata con un goniometro dietro il punto di sospensione). Variabile dipendente: il periodo T. Controllate: lunghezza del filo, massa e tipo di sfera, cronometro e operatore. Procedimento: per ogni ampiezza si misura il tempo di 10 (o 20) oscillazioni e si divide per il numero di oscillazioni; si ripete più volte e si raccolgono i dati in una tabella e in un grafico T–θ. Risultato atteso: per piccole ampiezze il periodo è praticamente costante (differenze inferiori all'1% fino a circa 20°); per ampiezze grandi il periodo aumenta leggermente. Attenzione: l'ampiezza diminuisce durante le oscillazioni, quindi conviene usare poche oscillazioni o ampiezze iniziali non troppo grandi.

31. Traccia di risposta. Nel moto attorno al Sole contano le distanze (circa 150 milioni di km), enormemente maggiori delle dimensioni della Terra: forma e dimensioni sono trascurabili. Il giorno e la notte dipendono invece dalla rotazione della Terra su se stessa e da quale metà della sua superficie è illuminata: sono fenomeni legati proprio all'estensione e alla forma del corpo, che il punto materiale ignora. Serve un modello di corpo esteso che ruota.

32. Traccia di risposta. Nel linguaggio scientifico l'idea ancora da controllare è l'*ipotesi*; una *teoria* è un sistema coerente di principi e leggi, confermato da moltissimi esperimenti e capace di previsioni. La relatività ha superato numerosi controlli sperimentali; come ogni teoria resta correggibile se nuovi esperimenti la smentissero, ma non è una congettura. Un'applicazione: il sistema GPS, che deve correggere gli orologi dei satelliti per gli effetti previsti dalla relatività (circa 38 milionesimi di secondo al giorno), altrimenti accumulerebbe errori di chilometri.