CAPITOLO

1

Il metodo scientifico: grandezze e misure

«La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo)...»
— Galileo Galilei, Il Saggiatore (1623)

OBIETTIVI

1. Descrivere le tappe del metodo sperimentale e distinguere ipotesi, legge e teoria.
2. Usare le unità del Sistema Internazionale, i prefissi e le equivalenze.
3. Scrivere e calcolare numeri in notazione scientifica e stimare ordini di grandezza.
4. Distinguere massa e peso e calcolare la densità di una sostanza.
5. Esprimere il risultato di una misura con il suo errore e con le cifre significative corrette.
6. Convertire le temperature fra °C e K e leggere un grafico di proporzionalità diretta.

INDICE DEL CAPITOLO

1.1 Le scienze naturali e il metodo sperimentale 2
1.2 Grandezze e unità di misura 4
1.3 Notazione scientifica e ordini di grandezza 7
1.4 Massa, peso, volume e densità 8
1.5 Misurare: strumenti, errori e cifre significative 12
1.6 Temperatura e grafici 15

Scienze naturali 1 · Parte I · La materia e le sue trasformazioni · versione 1.0
Capitolo 1: Il metodo scientifico: grandezze e misure · pagine 23–44 del volume completo · estratto per lo studio

Perché un cubetto di ghiaccio galleggia nel bicchiere, mentre una moneta va a fondo? Quanto è lontana la Luna, e come si fa a saperlo senza andarci con un metro? Quanto dura davvero una tua corsa di cento metri, se il cronometro di un compagno dice 14,2 s e quello di un altro 14,5 s? Sono domande diverse, ma per rispondere serve sempre la stessa cosa: **misurare**, e saper dire quanto ci si può fidare della misura.

Questo capitolo è la cassetta degli attrezzi di tutto il libro. Vedremo come lavora uno scienziato, che cosa sono le grandezze fisiche e le loro unità, come si scrivono i numeri molto grandi e molto piccoli, che cosa distingue la massa dal peso e come si calcola la densità. Infine impareremo che nessuna misura è perfetta: ogni risultato porta con sé un'incertezza, e riconoscerla fa parte del lavoro scientifico tanto quanto la misura stessa.

1.1 Le scienze naturali e il metodo sperimentale

1.1.1 Che cosa studiano le scienze naturali

Le **scienze naturali** studiano i fenomeni del mondo naturale: la materia di cui sono fatti gli oggetti, i corpi celesti, l'aria, le acque, le rocce, gli esseri viventi. In questo volume ci occuperemo di due di esse. La **chimica** studia la composizione della materia, le sue proprietà e le trasformazioni in cui una sostanza diventa un'altra: la ruggine che si forma sul ferro, il gas che si libera da una compressa effervescente, la combustione del metano nel fornello. Le **scienze della Terra** studiano il nostro pianeta: la sua posizione nell'Universo, i suoi moti, l'atmosfera, l'idrosfera e le forze che ne modellano la superficie. La biologia, la scienza dei viventi, la affronterai l'anno prossimo.

Queste discipline sono diverse per oggetto, ma condividono un modo di procedere. Le loro affermazioni non si basano sull'autorità di chi le pronuncia né sul senso comune, ma su osservazioni e misure che chiunque, con gli strumenti adatti, può ripetere e controllare.

1.1.2 Le tappe del metodo sperimentale

Il **metodo sperimentale** (o metodo scientifico) è il procedimento con cui si costruisce una conoscenza controllabile della natura. Non è una ricetta rigida, ma possiamo riconoscervi alcune tappe tipiche, riassunte nella Figura 1.1. Seguiamole con un esempio concreto.

Marta nota che il ghiaccio messo sul davanzale fonde più in fretta in un piattino scuro che in uno bianco (**osservazione**). Si chiede perché (**domanda**). Propone una spiegazione provvisoria: le superfici scure assorbono più luce solare e si scaldano di più. Questa spiegazione è un'**ipotesi**: una risposta che può essere messa alla prova, perché permette una **previsione** controllabile

del tipo «se... allora...». Se l'ipotesi è giusta, allora due cubetti uguali, posti su piattini identici ma di colore diverso e al sole per lo stesso tempo, dovrebbero fondere in tempi diversi.

Per verificarlo Marta progetta un **esperimento controllato**, cioè un esperimento in cui si cambia di proposito *un solo* fattore alla volta. Il fattore che lo sperimentatore modifica si chiama **variabile indipendente** (qui il colore del piattino); il fattore che si misura per vedere se cambia è la **variabile dipendente** (il tempo di fusione). Tutti gli altri fattori che potrebbero influire – dimensione dei cubetti, materiale del piattino, esposizione al sole, temperatura dell'aria – devono restare uguali: sono le **variabili controllate**. Spesso si prepara anche una **prova di controllo**, con cui confrontare i risultati.

Marta ripete la prova più volte, registra i tempi in una tabella e li riporta in un grafico (**analisi dei dati**). Se i dati concordano con la previsione, l'ipotesi esce rafforzata; se non concordano, l'ipotesi è smentita e bisogna formularne un'altra. Questo è un punto decisivo: un'ipotesi scientifica deve poter essere *smentita* dai fatti. Un'affermazione che nessun esperimento potrebbe mai contraddire non è un'ipotesi scientifica.

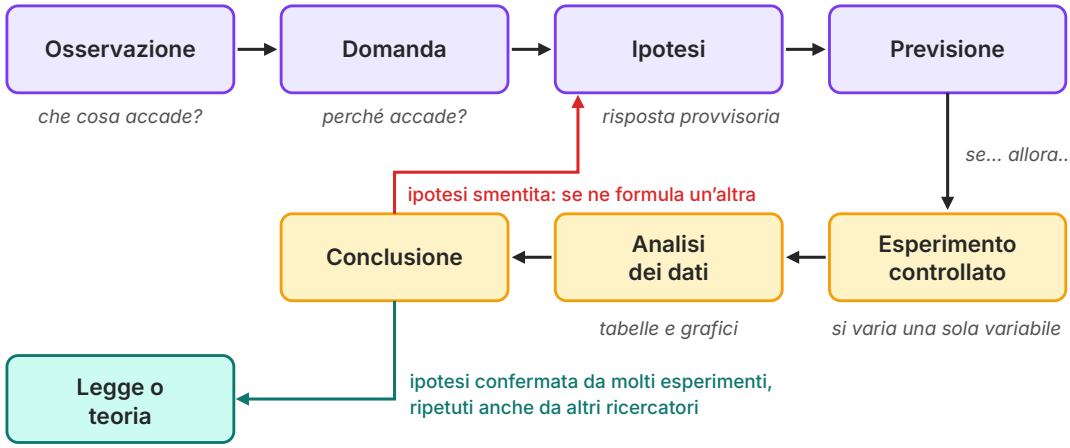

Figura 1.1 Le tappe del metodo sperimentale. Se i dati smentiscono la previsione si torna all'ipotesi; un'ipotesi confermata da molti esperimenti indipendenti entra a far parte di una legge o di una teoria.

1.1.3 Leggi e teorie

Quando un'ipotesi ha superato molti controlli, ripetuti anche da ricercatori diversi in laboratori diversi, può diventare parte di una legge o di una teoria. Una **legge** scientifica descrive *come* si comporta la natura, spesso con una relazione matematica fra grandezze: per esempio, vedrai che in un composto gli elementi si combinano sempre nello stesso rapporto di massa (Capitolo 6). Una **teoria** è un sistema più ampio di idee che *spiega* molte leggi e molti fenomeni diversi a partire da pochi principi: la teoria atomica, per esempio, spiega le leggi della chimica con l'esistenza degli atomi.

Nel linguaggio di tutti i giorni «è solo una teoria» significa «è solo un'opinione». In scienza è il contrario: una teoria è la forma più solida di conoscenza di cui disponiamo. Resta però sempre aperta alla revisione, se nuove osservazioni la contraddicono.

APPROFONDIMENTO

Galileo e la lingua della natura

Galileo Galilei (Pisa 1564 – Arcetri 1642) è considerato il padre del metodo sperimentale. Nel 1610, nel *Sidereus Nuncius*, descrisse ciò che aveva visto puntando il cannocchiale verso il cielo: i monti della Luna, quattro satelliti di Giove, una moltitudine di stelle invisibili a occhio nudo. Studiò il moto dei corpi facendo rotolare sfere lungo piani inclinati e misurando gli spazi percorsi in tempi uguali, in modo da rallentare la caduta e renderla misurabile con gli strumenti dell'epoca.

La novità di Galileo non fu soltanto guardare la natura, ma interrogarla con esperimenti costruiti apposta e descriverne i risultati con numeri e proporzioni. Per lui il «libro» dell'universo è scritto in lingua matematica: per leggerlo bisogna misurare. Le sue opere principali sulla fisica, i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, uscirono nel 1638.

1.2 Grandezze e unità di misura

1.2.1 Che cos'è una grandezza fisica

«Bello», «simpatico», «difficile» sono proprietà reali, ma non si possono misurare in modo oggettivo. La lunghezza di un banco, la massa di un sasso, la temperatura dell'acqua sì. Una **grandezza fisica** è una proprietà di un corpo o di un fenomeno che si può misurare. Per ogni grandezza serve una **definizione operativa**: la descrizione delle operazioni con cui la si misura, cioè quale strumento usare e come usarlo.

Misurare una grandezza significa confrontarla con una grandezza dello stesso tipo scelta come campione, l'**unità di misura**, e contare quante volte l'unità è contenuta nella grandezza. Dire che un banco è lungo 1,2 m significa che il metro vi è contenuto 1,2 volte. Il risultato di una misura è quindi sempre formato da un **numero** e da un'**unità**: «1,2» da solo non significa nulla, perché potrebbe trattarsi di metri, di centimetri o di chilometri.

1.2.2 Il Sistema Internazionale

Per secoli ogni città ha avuto le sue unità: braccia, piedi, libbre, once, tutte diverse da un luogo all'altro. Per capirsi e commerciare, gli scienziati hanno costruito un sistema comune, il **Sistema Internazionale di unità** (SI), adottato ufficialmente nel 1960 e oggi legale in quasi tutto il mondo, Italia compresa. Il SI sceglie sette **grandezze fondamentali**, indipendenti fra loro, ciascuna con la propria unità (Tabella 1.1). Tutte le altre sono **grandezze derivate**: si ottengono

combinando le fondamentali con moltiplicazioni e divisioni. L'area è il prodotto di due lunghezze e si misura in m^2; il volume in m^3; la velocità è una lunghezza divisa per un tempo e si misura in m/s.

Tabella 1.1 Le sette grandezze fondamentali del SI. In questo volume useremo soprattutto le prime cinque.

Grandezza	Unità	Simbolo	Strumento tipico
lunghezza	metro	m	metro a nastro, calibro
massa	kilogrammo	kg	bilancia
tempo	secondo	s	cronometro
temperatura	kelvin	K	termometro
quantità di sostanza	mole	mol	(Capitolo 7, approfondimento)
intensità di corrente elettrica	ampere	A	amperometro
intensità luminosa	candela	cd	fotometro

I simboli delle unità si scrivono senza punto finale e non vanno al plurale: si scrive 5 kg, non «5 kgs» né «5 Kg.». Tra il numero e il simbolo si lascia uno spazio: 25 °C, 3,0 m.

DA RICORDARE

Oggi tutte e sette le unità SI sono definite a partire da costanti della natura, uguali ovunque e per sempre. Il secondo è legato alla frequenza di una radiazione emessa dagli atomi di cesio; il metro è la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in 1/299 792 458 di secondo. Fino al 2019 il kilogrammo era invece la massa di un cilindro di platino e iridio custodito a Sèvres, vicino a Parigi: dal 20 maggio 2019 anche il kilogrammo è definito tramite una costante fisica.

1.2.3 Multipli, sottomultipli e prefissi

Misurare lo spessore di un capello o la distanza fra Milano e Palermo con la stessa unità porterebbe a numeri scomodi. Per questo il SI usa dei **prefissi**, che moltiplicano l'unità per una potenza di 10 (Tabella 1.2). Il prefisso si scrive attaccato all'unità: km, mg, µs. Nota che il kilogrammo è l'unica unità fondamentale che contiene già un prefisso: i prefissi della massa si applicano quindi al grammo (1 mg = 10^{-3} g, non 10^{-3} kg).

Tabella 1.2 I prefissi del SI più usati nelle scienze.

Prefisso	Simbolo	Fattore	Esempio
tera	T	10^{12}	1 Tm = 1 000 000 000 000 m
giga	G	10^{9}	1 GB = un miliardo di byte
mega	M	10^{6}	1 Mm = 1000 km
kilo	k	10^{3}	1 km = 1000 m
etto	h	10^{2}	1 hg = 100 g
deca	da	10^{1}	1 dam = 10 m
deci	d	10^{-1}	1 dm = 0,1 m
centi	c	10^{-2}	1 cm = 0,01 m
milli	m	10^{-3}	1 mL = 0,001 L
micro	µ	10^{-6}	1 µm = 0,001 mm
nano	n	10^{-9}	1 nm = 0,000 001 mm
pico	p	10^{-12}	1 pm = 10^{-12} m

1.2.4 Le equivalenze

Fare un'**equivalenza** significa esprimere la stessa grandezza con un'altra unità. Il valore non cambia: cambia solo il modo di scriverlo. Per le lunghezze ogni gradino della scala km, hm, dam, m, dm, cm, mm vale un fattore 10. Per le aree, che sono il prodotto di due lunghezze, ogni gradino vale $10 \times 10 = 100$: $1\ m^2 = 100\ dm^2 = 10\,000\ cm^2$. Per i volumi ogni gradino vale $10 \times 10 \times 10 = 1000$: $1\ m^3 = 1000\ dm^3 = 1\,000\,000\ cm^3$.

In chimica si usano spesso il **litro** (L) e il millilitro (mL). Il litro non è un'unità SI, ma è ammesso accanto al SI ed è definito come $1\ L = 1\ dm^3$. Ne segue una catena da sapere a memoria:

$$1\ L = 1\ dm^3 = 1000\ cm^3 = 1000\ mL \quad \text{e quindi} \quad 1\ mL = 1\ cm^3$$

ESEMPIO SVOLTO

Tre equivalenze

a) 2,5 L in cm^3. Poiché $1\ L = 1000\ cm^3$: $2{,}5 \times 1000 =$ **$2500\ cm^3$**.

b) 0,35 m^2 in cm^2. Da m^2 a cm^2 si scende di due gradini, ognuno di fattore 100: $0{,}35 \times 100 \times 100 =$ **$3500\ cm^2$**.

c) 750 mL in dm^3. Poiché $1\ mL = 1\ cm^3$ e $1\ dm^3 = 1000\ cm^3$: $750 / 1000 =$ **$0{,}750\ dm^3$**, cioè 0,750 L.

Un controllo di buon senso evita molti errori: passando a un'unità più piccola il numero deve *crescere*, passando a una più grande deve *diminuire*.

1.3 Notazione scientifica e ordini di grandezza

1.3.1 Scrivere numeri molto grandi e molto piccoli

La distanza media fra la Terra e il Sole è di circa 149 600 000 km; il diametro di un atomo di idrogeno è dell'ordine di 0,000 000 000 1 m. Scritti così, questi numeri sono difficili da leggere, da confrontare e da usare nei calcoli. La **notazione scientifica** li scrive come prodotto di due fattori:

$$a \times 10^n \quad \text{con } 1 \le a < 10 \text{ e } n \text{ numero intero}$$

Il numero a (la mantissa) ha una sola cifra prima della virgola, e questa cifra non è zero. Per trovare l'esponente n si conta di quanti posti va spostata la virgola: se la si sposta verso sinistra (numero grande) l'esponente è positivo, se la si sposta verso destra (numero piccolo) è negativo. Così 149 600 000 km = $1{,}496 \times 10^8$ km (la virgola si sposta di 8 posti a sinistra) e 0,000 045 m = $4{,}5 \times 10^{-5}$ m (5 posti a destra).

1.3.2 Calcolare con le potenze di 10

La notazione scientifica rende semplici le operazioni, grazie alle proprietà delle potenze:

$$10^m \cdot 10^n = 10^{m+n} \qquad \frac{10^m}{10^n} = 10^{m-n} \qquad (10^m)^k = 10^{m \cdot k} \qquad 10^0 = 1$$

Nei prodotti si moltiplicano le mantisse e si sommano gli esponenti; nei quozienti si dividono le mantisse e si sottraggono gli esponenti. Se la mantissa ottenuta non è compresa fra 1 e 10, la si sistema spostando la virgola e correggendo l'esponente.

ESEMPIO SVOLTO

Calcoli in notazione scientifica

a) $(3{,}0 \times 10^4) \cdot (2{,}0 \times 10^{-7}) = (3{,}0 \cdot 2{,}0) \times 10^{4+(-7)} = \mathbf{6{,}0 \times 10^{-3}}$.

b) $(8{,}4 \times 10^6) / (2{,}1 \times 10^2) = (8{,}4 / 2{,}1) \times 10^{6-2} = \mathbf{4{,}0 \times 10^4}$.

c) $(5{,}0 \times 10^3) \cdot (4{,}0 \times 10^5) = 20 \times 10^8$. La mantissa 20 non è minore di 10: $20 = 2{,}0 \times 10^1$, quindi il risultato è $\mathbf{2{,}0 \times 10^9}$.

1.3.3 L'ordine di grandezza

Spesso non serve il valore esatto, ma solo un'idea della «taglia» di una grandezza. L'**ordine di grandezza** di un numero è la potenza di 10 che gli è più vicina. In pratica, scritto il numero in notazione scientifica, si tiene 10^n se la mantissa è minore di 5 e si passa a 10^{n+1} se è uguale o maggiore di 5. La distanza media Terra–Luna, 384 400 km = $3{,}844 \times 10^5$ km, ha ordine di grandezza 10^5 km; il raggio medio della Terra, 6371 km = $6{,}371 \times 10^3$ km, ha ordine di grandezza 10^4 km.

Gli ordini di grandezza permettono stime rapide e controlli di buon senso: se calcoli che un'aula è lunga 10^4 m, sai subito che hai sbagliato qualcosa, perché un'aula misura circa 10 m. Due grandezze che differiscono di tre ordini di grandezza stanno fra loro come 1 a 1000.

COLLEGAMENTI

Matematica e informatica

La notazione scientifica è la stessa che usa la calcolatrice quando mostra «6.022E23»: la lettera E sta per «× 10 elevato a». In matematica studierai le potenze con esponente intero negativo, $10^{-n} = 1/10^n$: è proprio questa proprietà che fa funzionare i sottomultipli.

1.4 Massa, peso, volume e densità

1.4.1 Grandezze estensive e intensive

Prendi una bottiglia d'acqua e versane metà in un bicchiere. La massa e il volume dell'acqua nel bicchiere sono la metà di quelli iniziali; la temperatura e il colore no. Le grandezze che dipendono dalla quantità di materia, come massa, volume e peso, si chiamano **grandezze estensive**. Quelle che non ne dipendono, come temperatura, densità, temperatura di fusione, si chiamano **grandezze intensive**. Le grandezze intensive sono preziose in chimica perché sono caratteristiche di una sostanza: un grammo o una tonnellata di ferro hanno la stessa densità e fondono alla stessa temperatura.

1.4.2 Massa e peso

Nel linguaggio comune «peso» e «massa» si usano come sinonimi, ma in scienza sono grandezze diverse. La **massa** misura la quantità di materia di un corpo; nel SI si misura in kilogrammi e si determina con la bilancia a bracci uguali, confrontando il corpo con masse campione. La massa di un corpo non cambia se il corpo viene spostato: un sasso di 2 kg ha massa 2 kg a Roma, sulla vetta del Monte Bianco e sulla Luna.

Il **peso** è invece una **forza**: la forza con cui un corpo è attratto da un pianeta (nel nostro caso, dalla Terra). Come tutte le forze si misura in **newton** (N) con un dinamometro. Il peso è propor-

zionale alla massa:

$$P = m \cdot g$$

dove g è l'accelerazione di gravità, che sulla superficie terrestre vale circa 9,81 N/kg e sulla Luna circa 1,62 N/kg. Un ragazzo di 50 kg pesa sulla Terra $50 \times 9{,}81 \approx 491$ N, sulla Luna soltanto $50 \times 1{,}62 = 81$ N, circa un sesto: la sua massa, però, è rimasta 50 kg.

> **ERRORE FREQUENTE**
> «Peso 50 kg» è un'espressione comune, ma scientificamente scorretta: il kilogrammo è l'unità della **massa**, non del peso. La frase corretta è «ho una massa di 50 kg» oppure «peso circa 491 N». La bilancia pesapersone misura in realtà una forza, ma è tarata per mostrare la massa corrispondente sulla Terra: sulla Luna darebbe un valore sbagliato.

1.4.3 Il volume e la sua misura

Il **volume** è lo spazio occupato da un corpo. Per un solido di forma regolare lo si calcola con le formule della geometria: un parallelepipedo di spigoli a, b, c ha volume $V = a \cdot b \cdot c$; un cubo di spigolo 2,0 cm ha volume 8,0 cm^3.

Il volume dei liquidi si misura con recipienti graduati: il cilindro graduato per misure di routine, la pipetta e la buretta quando serve più esattezza. In un recipiente stretto, la superficie dell'acqua non è piatta ma si incurva verso l'alto lungo le pareti, formando un **menisco** concavo. La lettura si fa in corrispondenza del **fondo del menisco**, con l'occhio alla stessa altezza della superficie del liquido (Figura 1.2). Se si guarda dall'alto si legge un valore troppo alto, se si guarda dal basso uno troppo basso: è l'**errore di parallasse**. Il mercurio, al contrario dell'acqua, forma un menisco convesso, e se ne legge la sommità.

Il volume di un solido irregolare, come un sasso o una chiave, si misura **per immersione**: si versa acqua in un cilindro graduato e se ne legge il volume V_1; poi vi si immerge completamente l'oggetto e si legge il nuovo livello V_2. L'acqua spostata occupa esattamente lo spazio dell'oggetto, quindi il volume dell'oggetto è $V = V_2 - V_1$ (Figura 1.3). Il metodo funziona se l'oggetto affonda, non si scioglie e non assorbe acqua.

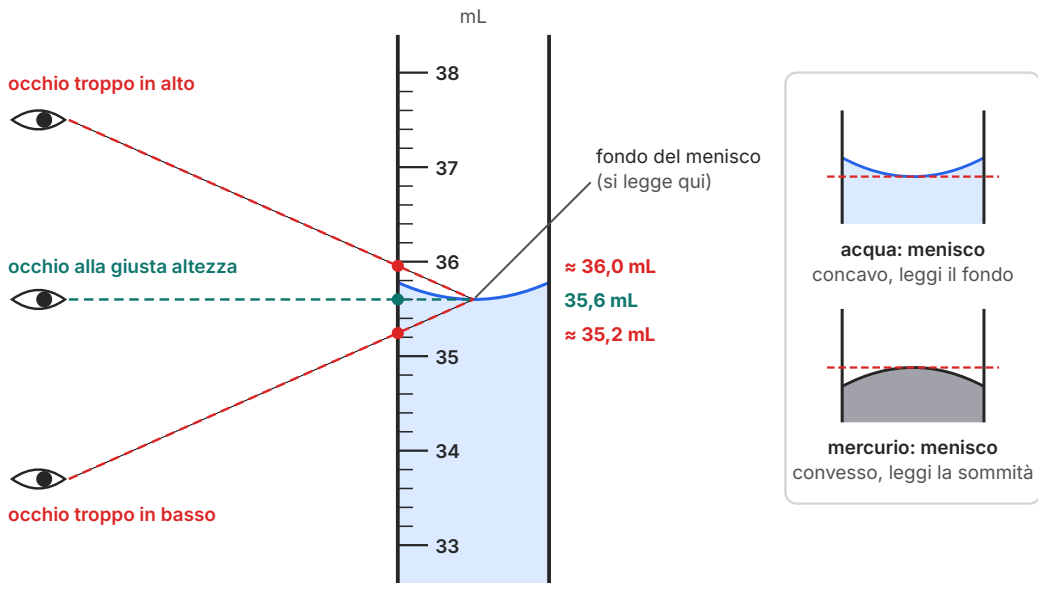

Figura 1.2 Lettura di un cilindro graduato con tacche ogni 0,2 mL (sensibilità 0,2 mL). Si legge il fondo del menisco con l'occhio alla sua altezza: 35,6 mL. Guardando dall'alto o dal basso, la linea di vista incontra la scala più in alto o più in basso (errore di parallasse). Riquadro: menisco concavo dell'acqua e convesso del mercurio.

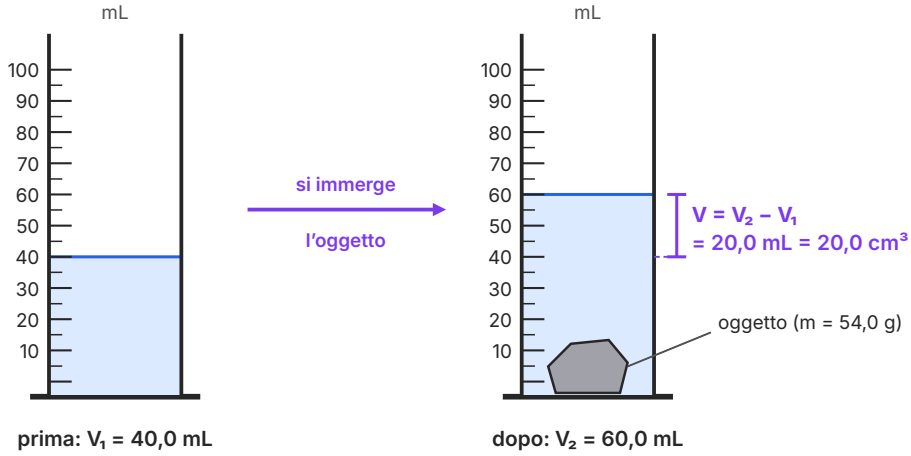

Figura 1.3 Misura del volume di un solido irregolare per immersione: il volume dell'oggetto è uguale al volume di acqua spostata, $V = V_2 - V_1 = 20{,}0\ \text{cm}^3$.

1.4.4 La densità

Un kilogrammo di piume e un kilogrammo di piombo hanno la stessa massa, ma il piombo occupa uno spazio molto più piccolo. La grandezza che esprime questa differenza è la **densità**, il rapporto fra la massa di un corpo e il suo volume:

$$d = \frac{m}{V}$$

Nel SI la densità si misura in kg/m³, ma in laboratorio si usa di solito il g/cm³ (uguale al g/mL). Poiché 1 kg = 1000 g e 1 m³ = 1 000 000 cm³, vale 1 g/cm³ = 1000 kg/m³. La densità è una grandezza derivata e intensiva: dipende dalla sostanza (e un po' dalla temperatura), ma non dalla quantità di campione. Per questo serve a riconoscere le sostanze (Tabella 1.3). Dalla definizione si ricavano anche le formule inverse $m = d \cdot V$ e $V = m / d$.

Tabella 1.3 Densità di alcune sostanze e materiali comuni, a circa 20 °C e alla pressione atmosferica normale (valori arrotondati; per i materiali naturali il valore è indicativo).

Sostanza	d (g/cm³)	Sostanza	d (g/cm³)
aria	0,0012	acqua di mare	≈ 1,025
sughero	0,12–0,24	vetro comune	≈ 2,5
legno di abete	≈ 0,45	alluminio	2,70
alcol etilico	0,789	ferro	7,87
olio d'oliva	≈ 0,92	rame	8,96
ghiaccio (a 0 °C)	0,917	piombo	11,3
acqua (a 4 °C)	1,000	mercurio	13,5
acqua (a 20 °C)	0,998	oro	19,3

ESEMPIO SVOLTO

Esperienza di laboratorio: di che metallo è fatto?

Un oggetto metallico ha massa m = 54,0 g, misurata con una bilancia elettronica. Lo si immerge in un cilindro graduato contenente 40,0 mL di acqua, e il livello sale a 60,0 mL (Figura 1.3).

Volume: V = 60,0 mL − 40,0 mL = 20,0 mL = 20,0 cm³.

Densità: $d = m / V$ = 54,0 g / 20,0 cm³ = **2,70 g/cm³** = 2700 kg/m³.

Conclusione: il valore coincide con quello dell'alluminio nella Tabella 1.3. Attenzione: la densità da sola non basta a identificare con certezza una sostanza (due materiali diversi possono avere densità simili), ma è un ottimo primo indizio.

La densità spiega perché alcuni corpi galleggiano. In prima approssimazione, un corpo pieno galleggia su un liquido se la sua densità è minore di quella del liquido, e affonda se è maggiore. Il ghiaccio (0,917 g/cm^3) galleggia sull'acqua; l'olio (≈ 0,92 g/cm^3) resta sopra l'acqua in un'insalatiera; un chiodo di ferro (7,87 g/cm^3) affonda, ma galleggia sul mercurio (13,5 g/cm^3). Una nave d'acciaio galleggia perché è cava: conta la sua *densità media*, cioè la massa totale divisa per il volume complessivo, aria compresa, che è minore di quella dell'acqua. La spiegazione completa, con la spinta di Archimede, la vedrai in fisica.

Accanto alla densità si usa talvolta il **peso specifico**, il rapporto fra il peso di un corpo e il suo volume, che si misura in N/m^3. È una grandezza diversa dalla densità, perché dipende anche dal valore di g: sulla Luna il peso specifico del ferro è circa sei volte minore, la sua densità resta la stessa.

IN SINTESI

$d = m / V$ · $m = d \cdot V$ · $V = m / d$ · 1 g/cm^3 = 1 g/mL = 1000 kg/m^3 · $P = m \cdot g$ (in newton). La massa si misura con la bilancia e non cambia da un luogo all'altro; il peso è una forza e dipende dal luogo.

1.5 Misurare: strumenti, errori e cifre significative

1.5.1 Gli strumenti di misura

Ogni strumento ha delle caratteristiche che ne limitano l'uso. La **portata** è il valore massimo che lo strumento può misurare: una bilancia da cucina con portata 5 kg non serve per pesare un sacco di cemento. La **sensibilità** è la più piccola variazione della grandezza che lo strumento riesce a rilevare; negli strumenti a scala corrisponde al valore di una divisione. Un righello millimetrato ha sensibilità 1 mm; il cilindro della Figura 1.2, con tacche ogni 0,2 mL, ha sensibilità 0,2 mL; una bilancia elettronica che mostra 54,0 g ha sensibilità 0,1 g.

Le misure si distinguono in **dirette**, quando si legge il valore su uno strumento (la massa sulla bilancia, il volume sul cilindro), e **indirette**, quando il valore si calcola a partire da altre misure. La densità dell'esempio precedente è una misura indiretta: nessuno strumento l'ha mostrata, l'abbiamo ottenuta da una massa e da un volume.

1.5.2 Errori sistematici e casuali

Nessuna misura è perfetta. La differenza fra il valore misurato e il valore vero, che non conosciamo mai esattamente, si chiama errore di misura. In scienza «errore» non vuol dire «sbaglio», ma **incertezza**: anche lo sperimentatore più attento ne commette. Gli errori sono di due tipi.

Gli **errori sistematici** agiscono sempre nello stesso verso, facendo risultare tutte le misure troppo alte o tutte troppo basse. Nascono da uno strumento starato (una bilancia che segna 3 g anche quando è vuota), da un metodo sbagliato (leggere sempre il cilindro dall'alto) o dalle condizioni di lavoro. Non si riducono ripetendo la misura: si eliminano controllando e tarando gli strumenti e correggendo il metodo.

Gli **errori casuali** sono dovuti a tante piccole cause imprevedibili – il riflesso con cui si fa partire il cronometro, una vibrazione del tavolo, una corrente d'aria – e fanno oscillare le misure ora in eccesso ora in difetto. Non si possono eliminare, ma il loro effetto si riduce ripetendo più volte la misura e calcolando la media.

A questi due tipi di errore corrispondono due qualità diverse di una serie di misure (Figura 1.4). L'**accuratezza** indica quanto il risultato si avvicina al valore vero: è compromessa soprattutto dagli errori sistematici. La **precisione** indica quanto le misure ripetute sono vicine fra loro: è compromessa dagli errori casuali. Una serie di misure può essere molto precisa e poco accurata, come le freccette raggruppate ma lontane dal centro.

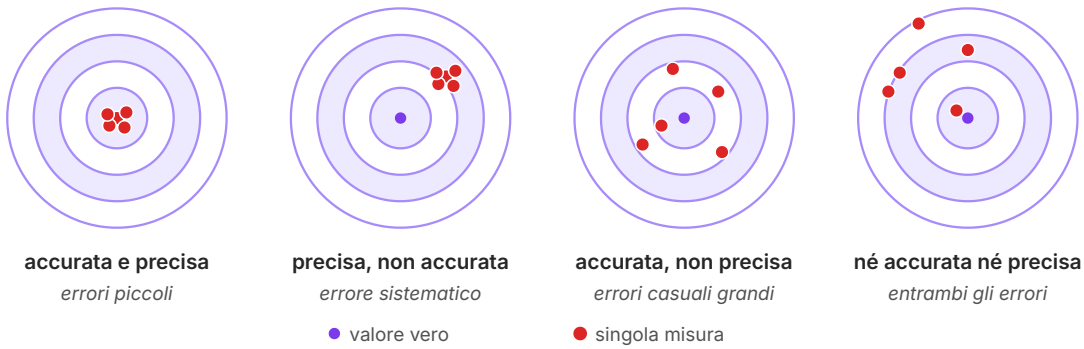

Figura 1.4 Accuratezza e precisione. Ogni punto rosso è una misura, il centro è il valore vero. Gli errori sistematici spostano tutte le misure dalla stessa parte (minore accuratezza); gli errori casuali le disperdono (minore precisione).

1.5.3 Valore medio ed errore assoluto

Quando una misura viene ripetuta più volte, il **valore medio** è la miglior stima del valore vero: si sommano i valori e si divide per il loro numero. Come stima dell'incertezza, al primo anno si usa la **semidispersione**, metà della differenza fra il valore massimo e il minimo; questo numero è l'**errore assoluto** E_a, che ha la stessa unità della misura. Se la misura è una sola, l'errore assoluto si assume uguale alla sensibilità dello strumento. Il risultato si scrive

$$\text{valore} = (\text{valore medio} \pm E_a)\ \text{unità}$$

L'errore assoluto da solo non dice se una misura è buona: 1 cm di incertezza è enorme sulla larghezza di un francobollo, trascurabile sulla lunghezza di un campo da calcio. Per confrontare

misure diverse si usa l'**errore relativo**, il rapporto fra errore assoluto e valore medio, che è un numero puro (senza unità). Moltiplicato per 100 diventa l'**errore percentuale**:

$$E_r = \frac{E_a}{\text{valore medio}} \qquad E_{\%} = E_r \times 100$$

ESEMPIO SVOLTO

Il tempo di caduta di una pallina

Cinque studenti cronometrano la caduta di una pallina dalla stessa altezza e ottengono: 1,32 s; 1,28 s; 1,35 s; 1,30 s; 1,31 s.

Valore medio: (1,32 + 1,28 + 1,35 + 1,30 + 1,31) s / 5 = 6,56 s / 5 = 1,312 s.

Errore assoluto: (1,35 s − 1,28 s) / 2 = 0,035 s, che si arrotonda a una cifra: 0,04 s.

Risultato: il valore medio si arrotonda allo stesso ordine decimale dell'errore: t = (1,31 ± 0,04) s.

Errore relativo: 0,04 / 1,31 ≈ 0,03, cioè circa il **3 %**.

1.5.4 Cifre significative e arrotondamenti

Il numero di cifre con cui si scrive una misura comunica quanto la si conosce bene. Le **cifre significative** sono tutte le cifre certe più la prima cifra incerta. Scrivere che una massa è 54,0 g dice che la bilancia distingue i decimi di grammo; scrivere 54 g dice che conosciamo la massa solo al grammo. Per contarle si seguono poche regole:

- le cifre diverse da zero sono sempre significative: 2,47 ha tre cifre significative;
- gli zeri fra cifre non nulle sono significativi: 1005 ne ha quattro;
- gli zeri iniziali non sono significativi, servono solo a collocare la virgola: 0,0034 ne ha due;
- gli zeri finali dopo la virgola sono significativi: 0,003 40 ne ha tre, 2,50 ne ha tre;
- gli zeri finali di un numero intero sono ambigui (1200 ne ha due, tre o quattro?): la notazione scientifica toglie il dubbio, perché $1{,}20 \times 10^3$ ne ha chiaramente tre.

Per **arrotondare** si guarda la prima cifra da eliminare: se è minore di 5 la cifra precedente resta invariata, se è uguale o maggiore di 5 la cifra precedente aumenta di 1. Così 2,346 arrotondato a tre cifre diventa 2,35; arrotondato a due diventa 2,3.

Nei calcoli con misure, il risultato non può essere più affidabile dei dati. Valgono due regole:

- **prodotti e quozienti**: il risultato ha tante cifre significative quante ne ha il dato che ne ha *meno*. Esempio: 12,52 cm × 3,1 cm = 38,812 cm^2, che si scrive **39 cm^2** (due cifre, come 3,1);
- **somme e differenze**: il risultato ha tante cifre decimali quante ne ha il dato che ne ha *meno*. Esempio: 12,52 cm + 3,1 cm = 15,62 cm, che si scrive **15,6 cm** (un decimale, come 3,1).

I numeri esatti, come il 2 nella formula della semidispersione o i fattori delle equivalenze, non limitano le cifre del risultato.

ERRORE FREQUENTE

La calcolatrice dice che 54,0 g / 20,0 cm^3 fa 2,7 e che 25,0 / 3,12 fa 8,012 820 51… Nessuno dei due risultati va copiato così. Nel primo caso i dati hanno tre cifre significative e il risultato si scrive 2,70 g/cm^3 (lo zero finale è un'informazione, non un ornamento); nel secondo si scrive 8,01. Arrotonda solo il risultato finale, non i passaggi intermedi.

1.6 Temperatura e grafici

1.6.1 Temperatura e calore

La **temperatura** è la grandezza che misuriamo con il termometro e che esprime quanto un corpo è caldo o freddo. Il **calore** è invece energia che passa da un corpo a temperatura più alta a uno a temperatura più bassa, finché le due temperature diventano uguali; come ogni energia, nel SI si misura in joule (J). Le due grandezze sono legate ma diverse: una vasca di acqua tiepida può cedere molto più calore di una tazzina di caffè bollente, pur essendo a temperatura più bassa. Il significato di temperatura e calore a livello delle particelle lo vedrai nel Capitolo 2.

In Italia si usa la scala **Celsius** (°C), che fissa 0 °C alla temperatura di fusione del ghiaccio e 100 °C a quella di ebollizione dell'acqua, entrambe alla pressione atmosferica normale, e divide l'intervallo in 100 parti. Nel SI la temperatura si misura invece in **kelvin** (K), sulla scala assoluta o scala Kelvin. Il suo zero, lo **zero assoluto**, è la temperatura più bassa possibile e corrisponde a −273,15 °C. Un kelvin è ampio esattamente quanto un grado Celsius, quindi le due scale sono soltanto spostate l'una rispetto all'altra (Figura 1.5):

$$T\,(\mathrm{K}) = t\,(^\circ\mathrm{C}) + 273{,}15 \qquad t\,(^\circ\mathrm{C}) = T\,(\mathrm{K}) - 273{,}15$$

Nei calcoli di tutti i giorni si arrotonda spesso a 273: 25 °C ≈ 298 K, e l'azoto liquido, che bolle a 77 K, si trova a circa −196 °C. Sulla scala Kelvin non esistono temperature negative, e il simbolo è K, senza il segno di grado.

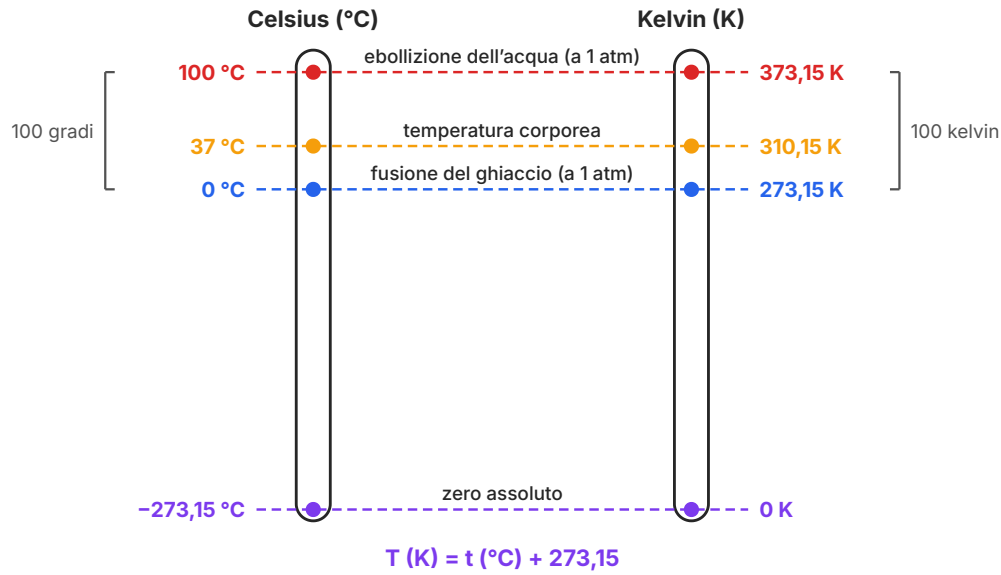

Figura 1.5 Le scale Celsius e Kelvin a confronto (in scala). Le due scale hanno divisioni della stessa ampiezza e differiscono solo per la posizione dello zero.

ERRORE FREQUENTE

«Questo maglione contiene molto calore» è una frase sbagliata: un corpo non *contiene* calore, possiede energia interna e una certa temperatura. Il calore è energia *in transito*. Il maglione tiene caldo perché rallenta il passaggio di calore dal tuo corpo all'aria fredda.

1.6.2 Leggere e costruire un grafico

Una tabella di dati diventa molto più eloquente se la trasformiamo in un grafico cartesiano. Sull'asse orizzontale (ascisse) si riporta di solito la variabile indipendente, su quello verticale (ordinate) la variabile dipendente. Ogni asse deve avere il nome della grandezza, l'unità di misura fra parentesi e una scala regolare, scelta in modo che i dati occupino buona parte del foglio. Si riportano poi i punti misurati e, se l'andamento è regolare, si traccia la linea che meglio li rappresenta, senza necessariamente passare per tutti i punti: i dati reali contengono sempre un po' di errore.

Proviamo a misurare massa e volume di vari pezzi di alluminio di grandezza diversa. Raddoppiando il volume raddoppia la massa, triplicando il volume la massa triplica: il rapporto m/V resta costante ed è proprio la densità. Due grandezze legate così si dicono in **proporzionalità diretta**: il loro rapporto è costante e il loro grafico è una retta che passa per l'origine. La **pendenza** della retta, cioè il rapporto fra un aumento Δm sull'asse verticale e il corrispondente aumento ΔV sull'asse orizzontale, è uguale alla costante di proporzionalità, quindi alla densità

(Figura 1.6). Più una sostanza è densa, più la sua retta è ripida: quella del ferro sale quasi tre volte più rapidamente di quella dell'alluminio.

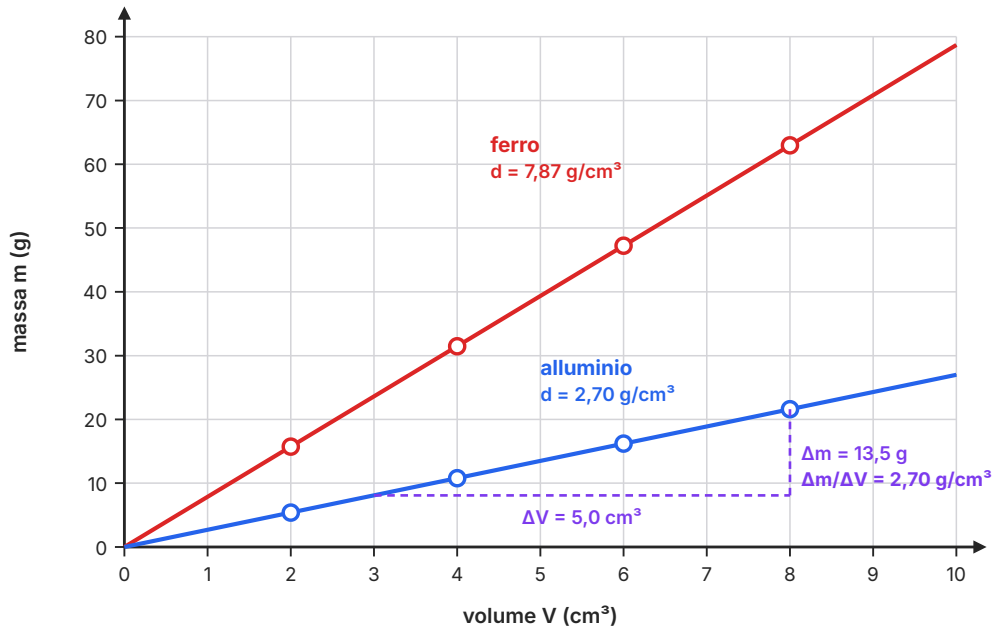

Figura 1.6 Grafico massa–volume per ferro e alluminio, calcolato da m = d · V. Le rette passano per l'origine (proporzionalità diretta); la pendenza di ciascuna retta è la densità della sostanza.

Il grafico è anche uno strumento di calcolo: per sapere quanta massa ha un pezzo di ferro di 6,0 cm^3 basta salire dal valore 6,0 dell'asse orizzontale fino alla retta del ferro e leggere sull'asse verticale circa 47 g, in accordo con il calcolo 7,87 $g/cm^3 \times 6{,}0\ cm^3 \approx 47$ g. Se un punto sperimentale cade lontano dalla retta, conviene ripetere quella misura: può nascondere un errore.

COLLEGAMENTI

Quando le unità costano care

Nel settembre 1999 la sonda *Mars Climate Orbiter* della NASA andò perduta mentre entrava in orbita attorno a Marte: passò troppo vicino al pianeta e fu probabilmente distrutta nell'atmosfera. L'inchiesta scoprì che un programma usato a terra forniva i dati sugli impulsi dei piccoli motori di manovra in unità anglosassoni (libbre-forza · secondo), mentre il software di navigazione li interpretava come se fossero in unità SI (newton · secondo). Un semplice errore di unità di misura costò una missione intera: per questo in scienza ogni numero va sempre accompagnato dalla sua unità.

SINTESI

- Il **metodo sperimentale** procede per osservazione, domanda, ipotesi, previsione, esperimento controllato, analisi dei dati e conclusione; un'ipotesi deve poter essere smentita.
- In un esperimento controllato si cambia una sola **variabile indipendente** e si misura la **variabile dipendente**, tenendo costanti tutte le altre.
- Una **legge** descrive come si comporta la natura; una **teoria** spiega molte leggi e fenomeni a partire da pochi principi.
- Una **grandezza fisica** è una proprietà misurabile; il risultato di una misura è un numero più un'unità.
- Il **SI** ha 7 grandezze fondamentali (m, kg, s, K, mol, A, cd); le altre sono derivate. I prefissi indicano potenze di 10; 1 L = 1 dm^3 e 1 mL = 1 cm^3.
- In **notazione scientifica** un numero si scrive $a \times 10^n$ con $1 \le a < 10$; l'ordine di grandezza è la potenza di 10 più vicina.
- La **massa** (kg) misura la quantità di materia ed è invariabile; il **peso** è una forza (N): $P = m \cdot g$.
- La **densità** $d = m/V$ è una grandezza intensiva, caratteristica di ogni sostanza; un corpo galleggia su un liquido più denso.
- Portata e sensibilità caratterizzano uno strumento; gli **errori sistematici** riducono l'accuratezza, quelli **casuali** la precisione.
- Il risultato di misure ripetute si scrive (valore medio ± errore assoluto); l'errore relativo permette di confrontare la qualità di misure diverse.
- Nei prodotti e quozienti conta il minor numero di **cifre significative**, nelle somme e differenze il minor numero di decimali.
- T (K) = t (°C) + 273,15; in un grafico di **proporzionalità diretta** la retta passa per l'origine e la sua pendenza è la costante di proporzionalità.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale fra queste è una grandezza fondamentale del SI?

   A. la massa
   B. il volume
   C. la densità
   D. la velocità

2. ● Il prefisso micro (μ) corrisponde al fattore:

A. 10^{-3}
B. 10^{-9}
C. 10^{-6}
D. 10^{6}

3. ● 1 mL equivale a:

A. 1 dm^3
B. 10 cm^3
C. 0,1 L
D. 1 cm^3

4. ● In una ricerca sperimentale, l'ipotesi è:

A. una legge già confermata da molti esperimenti
B. il valore numerico ottenuto da una misura
C. una spiegazione provvisoria che si può controllare con esperimenti
D. l'elenco degli strumenti necessari

5. ● Quale di queste grandezze è intensiva?

A. la massa
B. la densità
C. il volume
D. il peso

6. ●● Un'astronauta si trasferisce dalla Terra alla Luna. Che cosa accade?

A. massa e peso restano invariati
B. la massa diminuisce, il peso resta invariato
C. la massa resta invariata, il peso diminuisce
D. massa e peso diminuiscono entrambi

7. ●● Un errore sistematico:

A. agisce sempre nello stesso verso e non si riduce facendo la media di più misure
B. si riduce ripetendo molte volte la misura
C. è dovuto soltanto al caso
D. non dipende mai dallo strumento

8. ●● Quante cifre significative ha la misura 0,003 40 kg?

A. 2
B. 3
C. 5
D. 6

9. ●● Nel grafico massa–volume di una sostanza pura, la pendenza della retta rappresenta:
   A. il volume
   B. la massa
   C. il peso specifico
   D. la densità

Vero o falso

10. ● Il litro è l'unità di volume del Sistema Internazionale.

11. ● Una variazione di temperatura di 1 °C è uguale a una variazione di 1 K.

12. ● La massa di un corpo diminuisce se il corpo viene portato sulla Luna.

13. ●● Se raddoppio il volume di un campione di rame, raddoppia anche la sua densità.

14. ●● Il numero $4{,}50 \times 10^3$ ha tre cifre significative.

15. ●● Una serie di misure molto precisa è sempre anche accurata.

Applicare e calcolare

16. ● Esegui le equivalenze: a) 3,5 km in m; b) 250 mL in L; c) 0,8 dm^3 in cm^3; d) 1,2 m^2 in cm^2.

17. ● Scrivi in notazione scientifica: a) 0,000 72 m; b) 149 600 000 km. Poi calcola, dando il risultato in notazione scientifica: c) $(6{,}0 \times 10^5) \cdot (3{,}0 \times 10^{-2})$; d) $(9{,}0 \times 10^{-4}) / (3{,}0 \times 10^{-7})$.

18. ● Converti: a) 25 °C in kelvin; b) 77 K in gradi Celsius; c) −18 °C in kelvin.

19. ● Un campione di olio ha massa 46,0 g e volume 50,0 mL. Calcola la sua densità in g/cm^3 e in kg/m^3. Galleggia sull'acqua?

20. ●● Un anello ha massa 9,65 g; immerso in un recipiente pieno d'acqua fino all'orlo, fa traboccare 0,500 mL di liquido, raccolti e misurati con una buretta. Calcola la densità del metallo. È compatibile con l'oro puro (Tabella 1.3)?

21. ●● a) Che volume occupa 1,00 kg di mercurio (d = 13,5 g/cm^3)? b) Qual è la massa di 2,00 L di alcol etilico (d = 0,789 g/cm^3)?

22. ●● Un tablet ha massa 480 g. Calcola il suo peso sulla Terra (g = 9,81 N/kg) e sulla Luna (g = 1,62 N/kg). Qual è la sua massa sulla Luna?

23. ●● La lunghezza di un banco viene misurata cinque volte: 120,3 cm; 120,6 cm; 120,4 cm; 120,8 cm; 120,4 cm. Calcola il valore medio, l'errore assoluto (semidispersione), l'errore percentuale, e scrivi il risultato nella forma corretta.

24. ●●● Esegui le operazioni ed esprimi il risultato con il numero corretto di cifre significative: a) 4,52 cm × 2,1 cm; b) 13,46 g + 2,3 g; c) 25,0 g / 3,12 cm^3; d) 100,0 °C − 4,37 °C.

Leggere dati e figure

25. ● Usa la Figura 1.6: qual è la massa di 6,0 cm^3 di ferro? E di 6,0 cm^3 di alluminio? Quale volume di alluminio ha massa 27 g? Verifica le letture con un calcolo.

26. ●● Osserva la Figura 1.2. Qual è la sensibilità del cilindro? Quale valore legge l'osservatore con l'occhio troppo in alto, e di quanto sbaglia? Se un compagno leggesse sempre da quella posizione, che tipo di errore commetterebbe?

27. ●● Usa la Tabella 1.3: quali sostanze della tabella galleggiano sull'acqua? Quali metalli della tabella galleggiano sul mercurio? Perché il ghiaccio galleggia sia sull'acqua dolce sia sull'acqua di mare?

28. ●●● Anna e Marco pesano più volte un campione da laboratorio di massa nota 10,00 g. Anna ottiene 10,41 g; 10,42 g; 10,40 g; 10,41 g. Marco ottiene 9,8 g; 10,3 g; 9,9 g; 10,1 g. Calcola per ciascuno valore medio ed errore assoluto. A quale bersaglio della Figura 1.4 corrisponde ciascuna serie? Quale errore ha probabilmente la bilancia di Anna?

Indagare e argomentare

29. ●● Progetta un esperimento controllato per stabilire se la temperatura dell'acqua influisce sul tempo necessario a sciogliere una zolletta di zucchero. Indica la variabile indipendente, la variabile dipendente, almeno tre variabili controllate e come presenteresti i risultati.

30. ●● Spiega perché una nave d'acciaio galleggia mentre un chiodo dello stesso acciaio affonda.

31. ●●● Un tappo di sughero galleggia e quindi non si può misurarne il volume per semplice immersione. Proponi un metodo per determinarne la densità con bilancia e cilindro graduato.

32. ●● Rileggi il riquadro sulla sonda *Mars Climate Orbiter*. Perché la comunità scientifica ha bisogno di un sistema di unità comune? Fai un esempio della vita quotidiana in cui un'unità sbagliata o mancante può creare un problema.

PER APPROFONDIRE

- [ATK] Il capitolo introduttivo sulle misure e sulle cifre significative.
- [PAU] I primi capitoli, sul metodo della chimica e sulle proprietà della materia.
- [SAG] Il racconto della nascita della scienza moderna e del ruolo della misura.

Glossario del capitolo

Accuratezza
Vicinanza del risultato di una misura al valore vero; è ridotta soprattutto dagli errori sistematici.

Cifre significative
Le cifre certe di una misura più la prima cifra incerta; indicano quanto bene è nota la grandezza.

Densità
Rapporto fra massa e volume di un corpo, $d = m/V$; si misura in g/cm^3 o kg/m^3 ed è caratteristica di ogni sostanza.

Errore assoluto
Incertezza di una misura, con la stessa unità della grandezza; per misure ripetute si stima con la semidispersione.

Errore casuale
Errore dovuto a cause imprevedibili, che fa oscillare le misure in eccesso e in difetto; si riduce facendo la media di più misure.

Errore relativo
Rapporto fra errore assoluto e valore medio; moltiplicato per 100 dà l'errore percentuale.

Errore sistematico
Errore che sposta tutte le misure nello stesso verso, dovuto a strumento starato o metodo scorretto; non si riduce con la media.

Esperimento controllato
Esperimento in cui si modifica una sola variabile alla volta, tenendo costanti tutte le altre.

Grandezza fisica
Proprietà di un corpo o di un fenomeno che si può misurare, cioè confrontare con un'unità di misura.

Grandezza intensiva
Grandezza che non dipende dalla quantità di materia, come la temperatura o la densità; le grandezze estensive (massa, volume) invece ne dipendono.

Ipotesi
Spiegazione provvisoria di un fenomeno, da cui si ricava una previsione che gli esperimenti possono confermare o smentire.

Massa
Grandezza che misura la quantità di materia di un corpo; unità SI il kilogrammo; non cambia da un luogo all'altro.

Menisco
Superficie curva di un liquido in un recipiente stretto; per l'acqua è concavo e si legge il suo fondo.

Notazione scientifica
Scrittura di un numero nella forma $a \times 10^n$, con $1 \le a < 10$ e n intero.

Peso
Forza con cui un corpo è attratto da un pianeta; $P = m \cdot g$, si misura in newton (N).

Precisione
Vicinanza fra loro dei risultati di misure ripetute; è ridotta dagli errori casuali.

Sensibilità
La più piccola variazione di una grandezza che uno strumento riesce a rilevare.

Sistema Internazionale (SI)
Sistema di unità di misura adottato nel 1960, basato su sette grandezze fondamentali: metro, kilogrammo, secondo, kelvin, mole, ampere, candela.

Teoria
Sistema di idee, ampiamente confermato dagli esperimenti, che spiega molte leggi e fenomeni a partire da pochi principi.

Zero assoluto
La temperatura più bassa possibile: 0 K = −273,15 °C.

Soluzioni

1. A. La massa (unità: kilogrammo) è una delle sette grandezze fondamentali; volume, densità e velocità sono derivate.

2. C. 1 μ = 10^{-6}.

3. D. 1 mL = 10^{-3} L = 10^{-3} dm^3 = 1 cm^3.

4. C. L'ipotesi è una spiegazione provvisoria da cui si ricava una previsione controllabile.

5. B. La densità non dipende dalla quantità di materia; massa, volume e peso sì.

6. C. La massa non cambia; il peso P = m · g diminuisce perché sulla Luna g ≈ 1,62 N/kg invece di 9,81 N/kg (circa un sesto).

7. A. Un errore sistematico sposta tutte le misure nello stesso verso; si elimina tarando lo strumento o correggendo il metodo, non con la media.

8. B. Gli zeri iniziali non contano; 3, 4 e lo zero finale sì: tre cifre significative.

9. D. La pendenza Δm/ΔV è il rapporto massa/volume, cioè la densità.

10. F. L'unità SI di volume è il metro cubo (m^3); il litro (1 L = 1 dm^3) è un'unità ammessa accanto al SI.

11. V. Il kelvin e il grado Celsius hanno la stessa ampiezza; le scale differiscono solo per lo zero.

12. F. La massa non cambia; è il peso a diminuire.

13. F. Raddoppiano sia la massa sia il volume, quindi il rapporto m/V, cioè la densità, resta invariato: la densità è intensiva.

14. V. Le cifre 4, 5 e lo zero finale sono significative.

15. F. Le misure possono essere vicine fra loro ma tutte lontane dal valore vero, a causa di un errore sistematico (Figura 1.4, secondo bersaglio).

16. a) 3,5 km = 3500 m; b) 250 mL = 0,250 L; c) 0,8 dm^3 = 800 cm^3; d) 1,2 m^2 = 1,2 × 10 000 cm^2 = 12 000 cm^2 = 1,2 × 10^4 cm^2.

17. a) 7,2 × 10^{-4} m; b) 1,496 × 10^8 km; c) 18 × 10^3 = 1,8 × 10^4; d) 3,0 × $10^{-4-(-7)}$ = 3,0 × 10^3.

18. a) 25 + 273,15 = 298,15 K ≈ 298 K; b) 77 − 273,15 = −196,15 °C ≈ −196 °C; c) −18 + 273,15 = 255,15 K ≈ 255 K.

19. d = 46,0 g / 50,0 cm^3 = 0,920 g/cm^3 = 920 kg/m^3. Sì, galleggia: 0,920 g/cm^3 è minore della densità dell'acqua (≈ 1,00 g/cm^3).

20. d = 9,65 g / 0,500 cm^3 = 19,3 g/cm^3. Il valore coincide con la densità dell'oro (19,3 g/cm^3): è compatibile con l'oro puro, anche se la sola densità non è una prova definitiva.

21. a) V = m/d = 1000 g / 13,5 g/cm^3 = 74,07… cm^3 ≈ 74,1 cm^3. b) 2,00 L = 2000 cm^3; m = d · V = 0,789 g/cm^3 × 2000 cm^3 = 1578 g ≈ 1,58 × 10^3 g = 1,58 kg.

22. m = 0,480 kg. Terra: P = 0,480 × 9,81 = 4,7088 N ≈ 4,71 N. Luna: P = 0,480 × 1,62 = 0,7776 N ≈ 0,778 N. La massa sulla Luna è sempre 480 g.

23. Somma = 602,5 cm; media = 602,5/5 = 120,5 cm. Semidispersione = (120,8 − 120,3)/2 = 0,25 cm ≈ 0,3 cm. Risultato: (120,5 ± 0,3) cm. Errore percentuale = 0,3/120,5 × 100 ≈ 0,2 %.

24. a) 9,492 → 9,5 cm^2 (due cifre, come 2,1); b) 15,76 → 15,8 g (un decimale, come 2,3); c) 8,0128… → 8,01 g/cm^3 (tre cifre); d) 95,63 → 95,6 °C (un decimale, come 100,0).

25. Dal grafico: ferro ≈ 47 g, alluminio ≈ 16 g; 27 g di alluminio corrispondono a 10 cm^3. Calcolo: 7,87 × 6,0 = 47,2 g ≈ 47 g; 2,70 × 6,0 = 16,2 g ≈ 16 g; V = 27 g / 2,70 g/cm^3 = 10 cm^3.

26. Le tacche sono ogni 0,2 mL: sensibilità 0,2 mL. L'osservatore con l'occhio in alto legge ≈ 36,0 mL invece di 35,6 mL: sbaglia per eccesso di circa 0,4 mL (con l'occhio in basso leggerebbe ≈ 35,2 mL, per difetto). Leggendo sempre dalla stessa posizione commetterebbe un errore sistematico (di parallasse), che la media non elimina.

27. Galleggiano sull'acqua le sostanze con d < 1,00 g/cm³: sughero, legno di abete, alcol etilico (che però con l'acqua si mescola, quindi non forma uno strato), olio d'oliva, ghiaccio; l'aria sale in forma di bolle. Sul mercurio (13,5 g/cm³) galleggiano alluminio, ferro, rame e piombo; l'oro (19,3 g/cm³) affonda. Il ghiaccio (0,917 g/cm³) è meno denso sia dell'acqua dolce (≈ 1,00 g/cm³) sia di quella di mare (≈ 1,025 g/cm³).

28. Anna: media 41,64/4 = 10,41 g; semidispersione (10,42 − 10,40)/2 = 0,01 g; (10,41 ± 0,01) g: precisa ma non accurata (secondo bersaglio). Marco: media 40,1/4 = 10,025 g ≈ 10,0 g; semidispersione (10,3 − 9,8)/2 = 0,25 g ≈ 0,3 g; (10,0 ± 0,3) g: accurata ma poco precisa (terzo bersaglio). La bilancia di Anna ha probabilmente un errore sistematico di circa +0,4 g (è starata e va tarata).

29. Traccia: variabile indipendente = temperatura dell'acqua (per esempio 10, 20, 40, 60 °C); dipendente = tempo di scioglimento completo; controllate = volume d'acqua, tipo e massa della zolletta, recipiente, modo di mescolare (o nessun mescolamento). Ripetere ogni prova almeno tre volte, calcolare la media, riportare i dati in una tabella e in un grafico tempo–temperatura.

30. Traccia: il chiodo è pieno e la sua densità (≈ 7,9 g/cm³) supera quella dell'acqua. La nave è cava: contiene un grande volume di aria, quindi la sua densità media (massa totale divisa per il volume totale dello scafo, aria compresa) è minore di quella dell'acqua. Se lo scafo si riempie d'acqua, la densità media cresce e la nave affonda.

31. Traccia: si misura la massa del tappo con la bilancia. Per il volume, si legge V_1 nel cilindro, poi si spinge il tappo completamente sott'acqua con un ago o un filo sottile (di volume trascurabile) e si legge V_2; oppure si lega il tappo a una zavorra di cui si conosce il volume immerso da sola, e si sottrae. $V = V_2 - V_1$ (meno il volume della zavorra), quindi $d = m/V$. Ci si aspetta d < 1 g/cm³.

32. Traccia: senza unità comuni lo stesso numero indica quantità diverse e i dati di gruppi diversi non si possono confrontare né combinare; il SI garantisce che tutti intendano la stessa cosa. Esempi: una ricetta americana in «cups» e once, la temperatura del forno in °F, la pressione degli pneumatici in psi o bar, la dose di un farmaco in mg invece che in g.