CAPITOLO

11

La temperatura e la dilatazione termica

La temperatura non si vede e il tatto la sbaglia; ma un ponte d'acciaio lungo un chilometro, fra l'inverno e l'estate, cambia lunghezza di decine di centimetri.

OBIETTIVI

1. Spiegare perché il tatto non misura la temperatura e come la si definisce operativamente con un termometro.
2. Usare le scale Celsius e Kelvin, sapendo che lo zero assoluto vale −273,15 °C e che una differenza di temperatura vale lo stesso in K e in °C.
3. Enunciare il principio zero e spiegare perché su di esso si basa l'uso del termometro.
4. Calcolare la dilatazione lineare, superficiale e volumica di un solido, e prevedere che un foro in una lastra scaldata si allarga.
5. Calcolare la dilatazione di un liquido in un recipiente e descrivere il comportamento anomalo dell'acqua fra 0 °C e 4 °C.
6. Misurare in laboratorio il coefficiente di dilatazione lineare di un metallo, con la sua incertezza.

INDICE DEL CAPITOLO

11.1 Dal tatto al termometro 2
11.2 Le scale di temperatura 3
11.3 L'equilibrio termico 6
11.4 La dilatazione dei solidi 8
11.5 La dilatazione dei liquidi e dei gas 13

Fisica 2 · Parte IV · I fenomeni termici · versione 1.0
Capitolo 11: La temperatura e la dilatazione termica · pagine 273–294 del volume completo · estratto per lo studio

Immergi una mano in una bacinella di acqua calda e l'altra in una di acqua fredda; dopo un minuto mettile entrambe in una terza bacinella di acqua tiepida. La mano che era nel caldo sente freddo, quella che era nel freddo sente caldo: la stessa acqua, nello stesso istante, sembra a una mano fresca e all'altra calda. Il tatto ci dice se la nostra pelle sta perdendo o acquistando energia, non quanto è caldo un oggetto. Per fare fisica serve qualcosa di più affidabile: uno strumento e una grandezza misurabile, la *temperatura*.

Con questo capitolo comincia la quarta parte del libro, dedicata ai fenomeni termici. In *Scienze 1* hai già incontrato temperatura, calore e stati della materia con il modello particellare; qui li trattiamo come grandezze fisiche, con le loro leggi, le loro unità e le incertezze delle misure. Vedremo come funziona un termometro e perché funziona, come sono costruite le scale Celsius e Kelvin, che cosa vuol dire che due corpi sono in equilibrio termico. Poi studieremo il primo effetto misurabile di una variazione di temperatura: quasi tutti i corpi, scaldandosi, si dilatano. È un effetto piccolo, ma i progettisti di ponti, binari e termostati devono farci i conti ogni giorno. Nota un cambio di simbolo: in questa parte T indica la temperatura, mentre il tempo resta t.

11.1 Dal tatto al termometro

11.1.1 Il tatto inganna

La prova delle tre bacinelle non è l'unico inganno. In una mattina d'inverno tocca una ringhiera di metallo e poi una panchina di legno che stanno lì accanto da tutta la notte: il metallo sembra molto più freddo. Eppure i due oggetti sono alla stessa temperatura, quella dell'aria. La differenza è nella rapidità con cui sottraggono energia alla mano, più calda di loro: il metallo la porta via molto più in fretta del legno (è la conducibilità termica, che studierai nel prossimo capitolo). D'estate, al sole, succede il contrario: la ringhiera rovente scotta, il legno no.

Le sensazioni di caldo e freddo dipendono quindi dallo stato della nostra pelle e dal materiale che tocchiamo. Per confrontare in modo oggettivo lo stato termico dei corpi serve un fenomeno fisico che cambi in modo regolare e riproducibile quando un corpo si scalda: il volume di un liquido, la lunghezza di una sbarra, la resistenza elettrica di un filo. Su uno di questi fenomeni si costruisce uno strumento.

11.1.2 Dal termoscopio al termometro

Il primo passo è un **termoscopio**: un dispositivo che mostra se un corpo è più caldo o più freddo di un altro, senza però assegnare un numero. Un esempio è un'ampolla di vetro piena di li-

quido colorato, chiusa da un tappo attraversato da un tubicino sottile. Scaldando l'ampolla il liquido si dilata e sale nel tubicino; raffreddandola scende. Il livello permette di confrontare due corpi, ma non dice ancora «di quanto» uno è più caldo dell'altro.

Per passare a un **termometro**, cioè a uno strumento che misura, servono una **scala** e un'**unità**. Si scelgono due fenomeni che avvengono sempre alla stessa temperatura, facili da riprodurre in qualunque laboratorio: sono i **punti fissi**. I più usati sono la fusione del ghiaccio e l'ebollizione dell'acqua, a pressione atmosferica normale. Si segna il livello del liquido nei due casi, si assegnano a quei segni due numeri e si divide l'intervallo in parti uguali. In questo modo si definisce la **temperatura** in modo **operativo**: la temperatura di un corpo è il valore che si legge su un termometro tarato messo in contatto con esso, quando la lettura si è stabilizzata.

Dividere l'intervallo in parti uguali presuppone che il liquido si dilati in modo proporzionale alla temperatura. Per l'alcol e il mercurio, fra 0 °C e 100 °C, questo è vero con buona approssimazione; per l'acqua no, come vedremo nella sezione sui liquidi, ed è uno dei motivi per cui non si costruiscono termometri ad acqua.

APPROFONDIMENTO

Il termoscopio di Galileo

Fra la fine del Cinquecento e i primi anni del Seicento Galileo Galilei costruì, secondo le testimonianze dei suoi allievi e corrispondenti, un termoscopio ad aria. Era un'ampolla di vetro grande più o meno come un uovo di gallina, con un lungo collo sottile; si scaldava l'ampolla con le mani e si capovolgeva il collo in un recipiente d'acqua. Raffreddandosi, l'aria rimasta nell'ampolla si contraeva e l'acqua risaliva un poco nel collo. Da quel momento ogni variazione di temperatura dell'ambiente faceva salire o scendere la colonnina d'acqua: si contraeva l'aria con il freddo e l'acqua saliva, si espandeva con il caldo e l'acqua scendeva.

Lo strumento era sensibile, perché l'aria si dilata molto più dei liquidi, ma aveva un difetto che allora non si poteva capire: il livello dipendeva anche dalla pressione atmosferica, che varia con il tempo meteorologico. Nel corso del Seicento si passò ai termometri a liquido sigillati, insensibili alla pressione esterna. Il termoscopio non misurava ancora nulla, ma mostrava un'idea fondamentale: lo stato termico di un corpo si rende *visibile* attraverso la dilatazione di un altro corpo.

11.2 Le scale di temperatura

11.2.1 La scala Celsius

Nella **scala Celsius** si assegna il valore 0 alla temperatura del ghiaccio che fonde e il valore 100 a quella dell'acqua che bolle, entrambe alla pressione atmosferica normale; l'intervallo è diviso in 100 parti uguali, i **gradi Celsius** (°C). Le temperature più basse di quella del ghiaccio fondente sono negative. La scala prende il nome dall'astronomo svedese Anders Celsius, che la propo-

se nel 1742 con i valori invertiti: 0 per l'ebollizione e 100 per la fusione. Pochi anni dopo la scala fu capovolta, assumendo la forma che usiamo oggi.

11.2.2 La scala Kelvin e lo zero assoluto

Esiste una temperatura più bassa di tutte, alla quale nessun corpo può arrivare né scendere sotto: è lo **zero assoluto**, che nella scala Celsius vale −273,15 °C. In *Scienze 1* hai visto la sua interpretazione: è la temperatura alla quale l'agitazione delle particelle raggiungerebbe il minimo possibile. I laboratori di fisica delle basse temperature arrivano oggi a molto meno di un millesimo di grado sopra lo zero assoluto, ma non lo raggiungono mai.

Lo zero assoluto è il punto di partenza naturale per una scala di temperatura. La **scala Kelvin**, o scala assoluta, fissa lo zero proprio lì e usa un'unità di ampiezza uguale al grado Celsius: il **kelvin** (K), unità di misura della temperatura nel Sistema Internazionale. Il passaggio da una scala all'altra è quindi una semplice traslazione:

$$T_K = T_C + 273{,}15$$

Una temperatura misurata in kelvin si chiama **temperatura assoluta** ed è sempre positiva. La temperatura ambiente di 20 °C corrisponde a 293,15 K; l'azoto liquido bolle a −196 °C, cioè a 77 K. Si scrive «293 K» e si legge «293 kelvin», senza il simbolo di grado. Dal 2019 il kelvin è definito fissando il valore esatto di una costante della natura, la costante di Boltzmann; la scala Celsius è a sua volta definita a partire dal kelvin, e i suoi due punti fissi restano 0 °C e 100 °C con ottima approssimazione.

Poiché le due unità hanno la stessa ampiezza, una **differenza** di temperatura ha lo stesso valore numerico nelle due scale: se l'acqua di una pentola passa da 20 °C a 80 °C, la variazione è ΔT = 60 °C = 60 K. Le temperature, invece, hanno valori diversi: 80 °C sono 353,15 K. La Figura 11.1 mette a confronto le scale e i loro punti fissi.

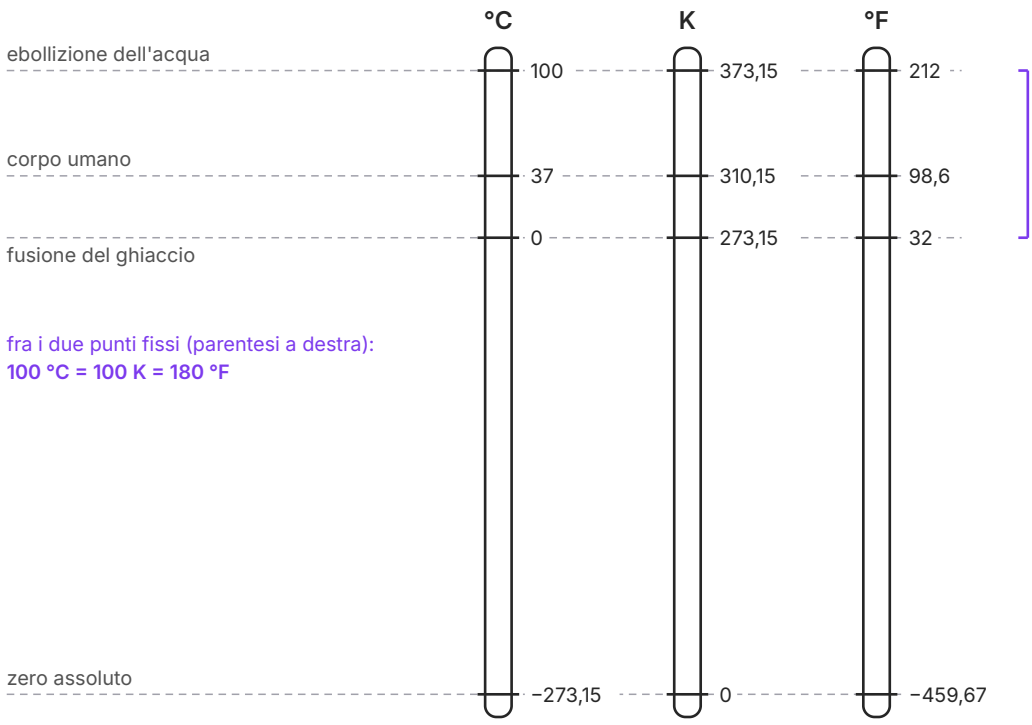


Figura 11.1 Tre scale di temperatura a confronto, con quattro temperature di riferimento allineate. Lo zero assoluto vale 0 K, −273,15 °C e −459,67 °F. L'intervallo fra la fusione del ghiaccio e l'ebollizione dell'acqua è di 100 gradi nelle scale Celsius e Kelvin e di 180 gradi nella scala Fahrenheit. La scala verticale è proporzionale alla temperatura.

ERRORE FREQUENTE

«20 °C è il doppio di 10 °C»: **no**. Lo zero della scala Celsius è stato scelto per comodità, non è un vero zero, e i rapporti fra temperature Celsius non hanno significato fisico. In kelvin le due temperature sono 293,15 K e 283,15 K: la prima supera la seconda di circa il 3,5%, non del 100%. Ha senso dire che una temperatura è doppia di un'altra solo nella scala assoluta.

Altri due errori da evitare. Non si scrive «°K»: il kelvin è un'unità come il metro, senza il simbolo di grado. E non si confondono temperatura e variazione: per convertire una temperatura si aggiunge 273,15, per convertire una differenza no, perché ΔT vale lo stesso in °C e in K.

COLLEGAMENTI

La scala Fahrenheit

Negli Stati Uniti le previsioni del tempo, le ricette e i termometri clinici usano la scala del fisico e costruttore di strumenti Daniel Gabriel Fahrenheit, nato a Danzica e attivo nei Paesi Bassi nel primo Settecento. In questa scala il ghiaccio fonde a 32 °F e l'acqua bolle a 212 °F: fra i due punti fissi ci sono 180 gradi anziché 100, quindi un grado Fahrenheit è più piccolo di un grado Celsius (1 °C di variazione corrisponde a 1,8 °F). La relazione, che hai già usato in *Fisica 1* (capitolo 5) come esempio di dipendenza lineare, è

$$T_F = 1{,}8\, T_C + 32$$

Una temperatura corporea di 37,0 °C corrisponde a $1{,}8 \times 37{,}0 + 32 = 98{,}6$ °F; una giornata estiva a 86 °F corrisponde a $(86 - 32)/1{,}8 = 30$ °C.

11.3 L'equilibrio termico

11.3.1 Il principio zero

Che cosa succede quando un termometro tocca un corpo? Se il corpo è più caldo, il termometro si scalda e il corpo si raffredda un poco; se è più freddo, avviene il contrario. Dopo un certo tempo i due smettono di cambiare: si dice che hanno raggiunto l'**equilibrio termico**. Due corpi in equilibrio termico hanno, per definizione, la stessa temperatura: è proprio questa la grandezza che diventa uguale. Lo stesso accade a una tazza di tè lasciata sul tavolo, che si raffredda fino alla temperatura della stanza, o a una bibita tolta dal frigorifero, che si scalda fino alla stessa temperatura. Lo scambio di energia che porta all'equilibrio si chiama calore; lo studierai nel prossimo capitolo.

Alla base dell'uso del termometro c'è un fatto sperimentale così semplice che fu formulato come principio solo dopo gli altri principi della termodinamica, e per questo prese il nome di **principio zero della termodinamica**:

se un corpo A è in equilibrio termico con un corpo C, e un corpo B è in equilibrio termico con lo stesso corpo C,
allora A e B sono in equilibrio termico fra loro.

Il corpo C è il termometro. Se il termometro segna 36,8 °C a contatto con la fronte di Marta e 36,8 °C a contatto con quella di Luca, possiamo dire che le due persone hanno la stessa temperatura senza metterle a contatto: il termometro fa da intermediario. Senza il principio zero il numero letto sul termometro non direbbe nulla degli altri corpi.

DA RICORDARE

Come si usa un termometro. Il termometro misura la propria temperatura; per sapere quella di un corpo bisogna aspettare che i due siano in equilibrio termico. Per questo la lettura richiede qualche istante e il termometro deve essere piccolo rispetto al corpo: un termometro grande e freddo immerso in un bicchierino di acqua calda la raffredderebbe, misurando una temperatura diversa da quella che l'acqua aveva prima.

11.3.2 Che cosa misura la temperatura

In *Scienze 1* hai descritto la materia come un insieme di particelle in continuo movimento, il moto di agitazione termica. In questa immagine la temperatura è legata alla rapidità media di quel moto: più un corpo è caldo, più velocemente si muovono in media le sue particelle. Quando un corpo caldo tocca un corpo freddo, le particelle più veloci urtano quelle più lente e cedono loro energia, finché la rapidità media diventa la stessa: è l'equilibrio termico. Lo stesso modello spiega la dilatazione: particelle che si agitano di più occupano più spazio, e la distanza media fra loro cresce. La descrizione quantitativa di queste idee, la teoria cinetica, è un argomento degli anni successivi; in questo capitolo ci basta il punto di vista macroscopico.

11.3.3 Tipi di termometro

Ogni fenomeno che varia con la temperatura in modo regolare può diventare un termometro, a patto di tararlo con i punti fissi o per confronto con un termometro campione.

- **Termometro a liquido.** Un bulbo di vetro collegato a un tubo capillare, con alcol colorato o una lega liquida. Il volume del liquido cresce con la temperatura e il capillare sottile trasforma una piccola variazione di volume in uno spostamento ben visibile. In Europa i termometri clinici a mercurio non si vendono più, perché il mercurio è tossico.
- **Termometro bimetallico.** Usa la curvatura di una lamina formata da due metalli diversi, che descriveremo nella prossima sezione; una lancetta mostra la temperatura su un quadrante. Si usa, per esempio, nei termometri da forno.
- **Termometro digitale.** Misura una grandezza elettrica che dipende dalla temperatura: la resistenza di un componente, oppure la piccola tensione che compare nella giunzione di due metalli diversi, detta **termocoppia**. Le termocoppie misurano anche temperature di centinaia di gradi, nei forni industriali e nei motori.
- **Termometro a infrarossi.** Misura senza contatto la radiazione infrarossa emessa da ogni corpo, che cresce con la temperatura (ne parleremo a proposito dell'irraggiamento). Si usa per la temperatura frontale e per superfici calde o difficili da raggiungere.

11.4 La dilatazione dei solidi

11.4.1 La dilatazione lineare

Una sbarra di metallo scaldata si allunga. L'aumento di lunghezza è troppo piccolo per vederlo a occhio, ma si misura facilmente con un *comparatore*, uno strumento a lancetta che apprezza il centesimo di millimetro. Gli esperimenti mostrano che l'allungamento Δl di una sbarra:

- è direttamente proporzionale alla variazione di temperatura ΔT, finché questa non è troppo grande;
- è direttamente proporzionale alla lunghezza iniziale l_0: una sbarra lunga il doppio si allunga il doppio, perché ogni suo metro si allunga della stessa quantità;
- dipende dal materiale.

Questi tre fatti si riassumono nella legge della **dilatazione lineare**:

$$\Delta l = \lambda l_0 \, \Delta T \qquad \text{oppure} \qquad l = l_0 \, (1 + \lambda \, \Delta T)$$

La costante di proporzionalità λ si chiama **coefficiente di dilatazione lineare** e caratterizza il materiale. Ricavandola dalla legge, $\lambda = \Delta l/(l_0 \Delta T)$, si vede il suo significato: è l'allungamento relativo $\Delta l/l_0$ per ogni kelvin di aumento della temperatura. Si misura in K^{-1}, o equivalentemente in $^\circ\mathrm{C}^{-1}$. Se la temperatura diminuisce, ΔT e Δl sono negativi: la sbarra si accorcia. Attenzione ai simboli: in questo libro λ indica il coefficiente lineare e α quello volumico; altri testi usano α e β.

Tabella 11.1 Coefficienti di dilatazione termica intorno a 20 °C (valori indicativi; gli stessi dell'appendice, con l'aggiunta dell'ottone).

Solido	λ (K^{-1})	Liquido	α (K^{-1})
alluminio	$2{,}3 \times 10^{-5}$	alcol etilico	$1{,}1 \times 10^{-3}$
ottone	circa $1{,}9 \times 10^{-5}$	glicerina	$5{,}0 \times 10^{-4}$
rame	$1{,}7 \times 10^{-5}$	acqua (20 °C)	$2{,}1 \times 10^{-4}$
acciaio	circa $1{,}2 \times 10^{-5}$	mercurio	$1{,}8 \times 10^{-4}$
calcestruzzo	circa $1{,}2 \times 10^{-5}$		
vetro comune	circa 9×10^{-6}		
vetro borosilicato (Pyrex)	$3{,}3 \times 10^{-6}$		

I valori sono minuscoli: una sbarra d'acciaio lunga 1 m si allunga di circa un centesimo di millimetro per ogni kelvin. Ma su grandi lunghezze e grandi escursioni termiche gli effetti diventa-

no importanti: un ponte d'acciaio lungo 1 km, fra una notte d'inverno e un pomeriggio d'estate ($\Delta T = 50$ K), cambia lunghezza di $1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 1000\ \text{m} \times 50\ \text{K} = 0{,}60\ \text{m}$.

ESEMPIO SVOLTO

Lo spazio fra le rotaie

Problema. In una linea ferroviaria tradizionale le rotaie d'acciaio sono lunghe 18,0 m e vengono posate a 10 °C. D'estate, al sole, una rotaia può arrivare a 50 °C. a) Quanto spazio bisogna lasciare fra una rotaia e la successiva perché non vengano a contatto? b) Di quanto si accorcia ogni rotaia in una notte d'inverno a −10 °C?

Soluzione. a) $\Delta T = 50\ °\text{C} - 10\ °\text{C} = 40$ K. Usiamo $\lambda = 1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$ dalla Tabella 11.1: $\Delta l = \lambda\, l_0\, \Delta T = 1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 18{,}0\ \text{m} \times 40\ \text{K} = 8{,}6 \times 10^{-3}\ \text{m} \approx 9$ mm. Fra due rotaie si lascia quindi uno spazio di circa 9 mm alla temperatura di posa. b) $\Delta T = -10\ °\text{C} - 10\ °\text{C} = -20$ K, quindi $\Delta l = 1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 18{,}0\ \text{m} \times (-20\ \text{K}) \approx -4{,}3 \times 10^{-3}\ \text{m}$: la rotaia si accorcia di circa 4 mm e lo spazio arriva a circa 13 mm.

Controllo. $\text{K}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{K} = \text{m}$. L'allungamento relativo è $1{,}2 \times 10^{-5} \times 40 \approx 0{,}05\%$: piccolo, ma su 18 m sono millimetri, e una rotaia bloccata alle estremità che non potesse allungarsi eserciterebbe sui vincoli forze enormi. Oggi le rotaie sono spesso saldate in lunghe barre continue e fissate saldamente alle traversine, posate a una temperatura scelta con cura, in modo che le variazioni di lunghezza siano impedite in sicurezza.

11.4.2 Applicazioni della dilatazione lineare

Nei ponti, nei viadotti e nelle grandi strutture si lasciano interruzioni progettate apposta, i **giunti di dilatazione**, che permettono alle parti della struttura di allungarsi e accorciarsi liberamente (Figura 11.2). Spesso un'estremità di ogni campata poggia su un appoggio scorrevole. Passando in auto su un viadotto si sente il colpo ritmico delle ruote sui giunti; in molti casi sono pettini metallici a denti incrociati, che si avvicinano d'estate e si allontanano d'inverno.

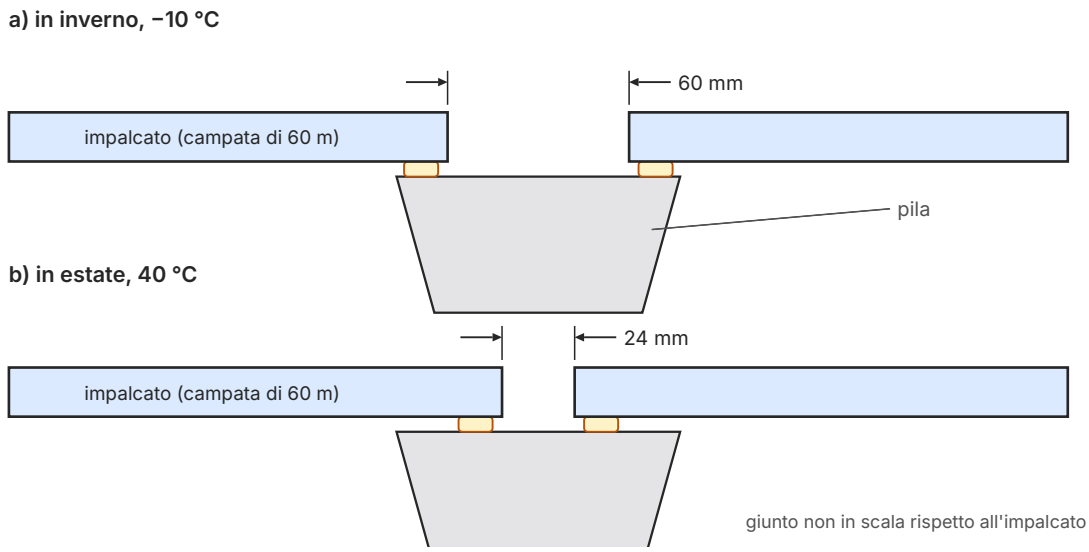


Figura 11.2 Giunto di dilatazione fra due campate di un viadotto in calcestruzzo, in sezione laterale. Ogni campata è lunga 60 m ($\lambda \approx 1{,}2 \times 10^{-5}\ \mathrm{K^{-1}}$); fra −10 °C e 40 °C si allunga di $1{,}2 \times 10^{-5}\ \mathrm{K^{-1}} \times 60\ \mathrm{m} \times 50\ \mathrm{K} = 36\ \mathrm{mm}$, e lo spazio del giunto passa da 60 mm a 24 mm. Il giunto è disegnato ingrandito rispetto all'impalcato.

Una seconda applicazione sfrutta la dilatazione invece di subirla. Una **lamina bimetallica** è formata da due strisce di metalli con coefficienti diversi, per esempio ottone e acciaio, saldate per tutta la lunghezza (Figura 11.3). Scaldandosi, l'ottone si allungherebbe più dell'acciaio; poiché le due strisce sono unite, la lamina si incurva, con l'ottone dalla parte esterna della curva. Raffreddandosi si incurva dall'altra parte. Nei **termostati** di ferri da stiro, scaldabagni e vecchi radiatori elettrici la lamina apre un contatto elettrico quando la temperatura supera il valore desiderato e lo richiude quando scende.

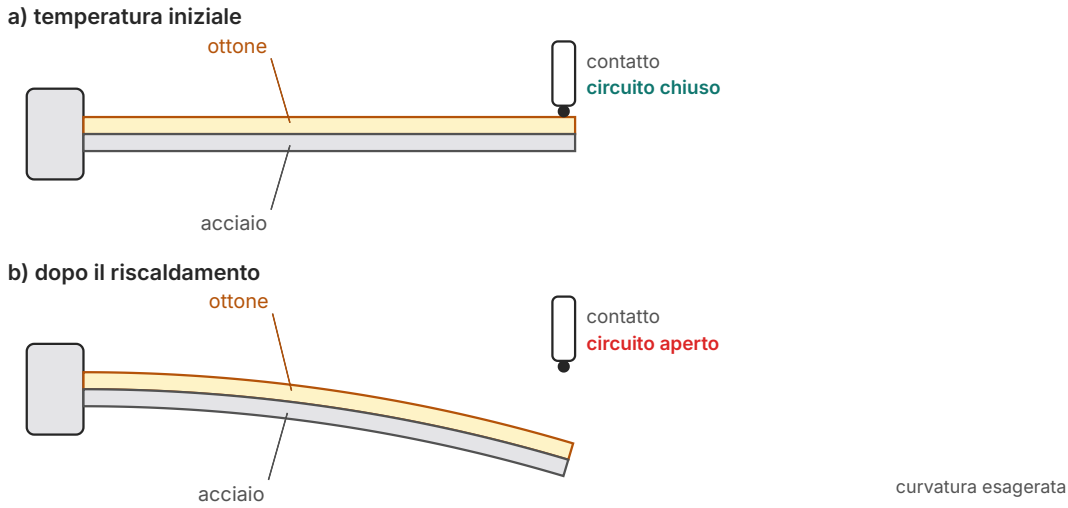


Figura 11.3 Lamina bimetallica ottone–acciaio usata come termostato. a) Alla temperatura iniziale la lamina è diritta e tocca il contatto: il circuito del riscaldatore è chiuso. b) Scaldandosi, l'ottone (coefficiente maggiore) si allunga più dell'acciaio e la lamina si incurva verso l'acciaio, staccandosi dal contatto: il circuito si apre. La curvatura è esagerata.

La scelta dei materiali conta anche quando due materiali diversi devono lavorare insieme. Il cemento armato funziona perché acciaio e calcestruzzo hanno quasi lo stesso coefficiente: scaldandosi si dilatano insieme e non si staccano. Il vetro comune si spacca se viene scaldato bruscamente, perché la parte calda si dilata mentre quella vicina, ancora fredda, la trattiene; il vetro borosilicato, con un coefficiente circa tre volte più piccolo, resiste molto meglio ed è usato per la vetreria da laboratorio.

11.4.3 Dilatazione superficiale e volumica

Un corpo che si scalda non si allunga soltanto: si dilata in tutte le direzioni. In un solido **isotropo**, cioè con le stesse proprietà in tutte le direzioni, ogni dimensione aumenta nella stessa proporzione, $\lambda \Delta T$. Che cosa succede allora a una superficie e a un volume?

Pensa a un piccolo cubo di lato l_0. Scaldandolo, ogni spigolo diventa $l_0(1 + \lambda \Delta T)$, e il volume diventa

$$V = l_0^{\,3}\,(1 + \lambda \Delta T)^3 = V_0\,(1 + 3\lambda \Delta T + 3\lambda^2 \Delta T^2 + \lambda^3 \Delta T^3)$$

Il prodotto $\lambda \Delta T$ è piccolissimo: per le rotaie dell'esempio valeva circa 0,0005. Il suo quadrato vale 0,000 000 25 e il suo cubo è ancora più piccolo: questi termini si trascurano senza conseguenze pratiche. Resta $V \approx V_0(1 + 3\lambda \Delta T)$, cioè la legge della **dilatazione volumica**

$$\Delta V = \alpha V_0 \, \Delta T \quad \text{con} \quad \alpha \approx 3\lambda \quad \text{(solidi isotropi)}$$

dove α è il **coefficiente di dilatazione volumica**. Con lo stesso ragionamento applicato a un quadrato si ottiene la **dilatazione superficiale**: $\Delta S \approx 2\lambda \, S_0 \, \Delta T$. Per l'alluminio, per esempio, $\alpha \approx 3 \times 2{,}3 \times 10^{-5}\ \mathrm{K^{-1}} \approx 6{,}9 \times 10^{-5}\ \mathrm{K^{-1}}$: un blocco di 1 $\mathrm{dm^3}$ scaldato di 100 K aumenta di volume di quasi 7 $\mathrm{cm^3}$.

11.4.4 Il foro si allarga

Una lastra metallica con un foro circolare viene scaldata: il foro si allarga o si restringe? Molti rispondono «si restringe, perché il metallo si dilata verso l'interno». È sbagliato. La dilatazione di un solido isotropo è come un ingrandimento fotografico: **tutte** le distanze fra i punti del corpo crescono nella stessa proporzione, comprese quelle fra punti opposti del bordo del foro (Figura 11.4). Un modo per convincersene: immagina di non aver ancora tagliato il foro. Il disco di metallo che lo riempie si dilaterebbe come il resto della lastra, e il suo bordo sarebbe esattamente il bordo del foro. Togliere il disco non cambia il comportamento del materiale intorno.

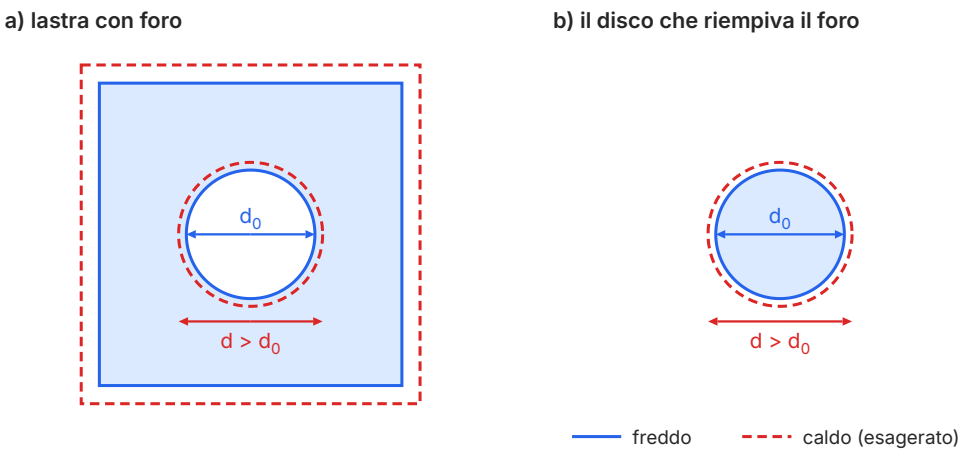


Figura 11.4 a) Una lastra con un foro circolare, prima (in blu) e dopo il riscaldamento (in rosso, dilatazione esagerata): il diametro del foro aumenta nella stessa proporzione dei lati della lastra. b) Il disco che riempiva il foro si dilata allo stesso modo e lo riempirebbe ancora. Per un riscaldamento reale l'ingrandimento è di qualche decimillesimo.

Su questo si basa l'esperimento dell'**anello e della sfera**: una sfera metallica passa appena attraverso un anello quando sono entrambi a temperatura ambiente; se si scalda la sfera, non passa più; se si scalda anche l'anello, passa di nuovo. Per lo stesso motivo un barattolo di vetro con il coperchio metallico bloccato si apre più facilmente dopo aver tenuto il coperchio sotto l'acqua calda: il metallo si dilata più del vetro.

11.5 La dilatazione dei liquidi e dei gas

11.5.1 I liquidi

Un liquido non ha forma propria, quindi non ha senso parlare della sua lunghezza: per i liquidi si considera soltanto la dilatazione volumica, con la stessa legge $\Delta V = \alpha V_0 \Delta T$. I coefficienti dei liquidi (Tabella 11.1) sono in genere da dieci a cento volte maggiori di quelli dei solidi: l'alcol etilico ha $\alpha = 1{,}1 \times 10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}$, l'acciaio $\alpha \approx 3{,}6 \times 10^{-5}\ \mathrm{K^{-1}}$.

Un liquido, però, sta sempre in un recipiente, e anche il recipiente si dilata. Quella che osserviamo è la **dilatazione apparente**: la differenza fra l'aumento di volume del liquido e quello della capacità del recipiente. Poiché i liquidi si dilatano molto più dei solidi, il recipiente pieno trabocca. È il motivo per cui il serbatoio di un'auto non va riempito fino all'orlo in una mattina fredda prima di una giornata calda, e per cui le bottiglie non si riempiono mai del tutto.

ESEMPIO SVOLTO

Il pallone che trabocca

Problema. Un pallone di vetro comune ha una capacità di 250,0 $\mathrm{cm^3}$ a 15 °C ed è riempito fino all'orlo di alcol etilico alla stessa temperatura. Il pallone viene messo in un bagno d'acqua a 35 °C. Quanto alcol trabocca, quando tutto ha raggiunto i 35 °C?

Soluzione. $\Delta T = 20$ K. Il liquido aumenta di volume di $\Delta V_{\text{alcol}} = \alpha_{\text{alcol}}\, V_0\, \Delta T = 1{,}1 \times 10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}} \times 250{,}0\ \mathrm{cm^3} \times 20\ \mathrm{K} = 5{,}5\ \mathrm{cm^3}$. La capacità del pallone si dilata come un pezzo di vetro dello stesso volume, con $\alpha_{\text{vetro}} \approx 3\lambda_{\text{vetro}} = 3 \times 9 \times 10^{-6}\ \mathrm{K^{-1}} = 2{,}7 \times 10^{-5}\ \mathrm{K^{-1}}$: $\Delta V_{\text{pallone}} = 2{,}7 \times 10^{-5}\ \mathrm{K^{-1}} \times 250{,}0\ \mathrm{cm^3} \times 20\ \mathrm{K} \approx 0{,}14\ \mathrm{cm^3}$. Trabocca la differenza: $5{,}5\ \mathrm{cm^3} - 0{,}14\ \mathrm{cm^3} \approx 5{,}4\ \mathrm{cm^3}$.

Controllo. La dilatazione del vetro corregge il risultato di appena il 2-3%: per un recipiente di vetro è spesso trascurabile, ma va sempre stimata, perché per un liquido poco dilatabile in un recipiente metallico la correzione può essere grande.

11.5.2 Il comportamento anomalo dell'acqua

L'acqua è un'eccezione importante. Scaldando acqua da 0 °C a circa 4 °C, il suo volume **diminuisce**; solo sopra i 4 °C l'acqua si dilata come gli altri liquidi. La densità dell'acqua quindi ha un massimo, a 3,98 °C, dove vale 999,97 $\mathrm{kg/m^3}$ (Figura 11.5). Questo **comportamento anomalo dell'acqua** è legato alla struttura delle sue molecole, che vicino al punto di congelamento tendono a disporsi in modo ordinato e poco compatto, come nel ghiaccio. Il ghiaccio, infatti, è ancora meno denso: 917 $\mathrm{kg/m^3}$, e per questo galleggia.

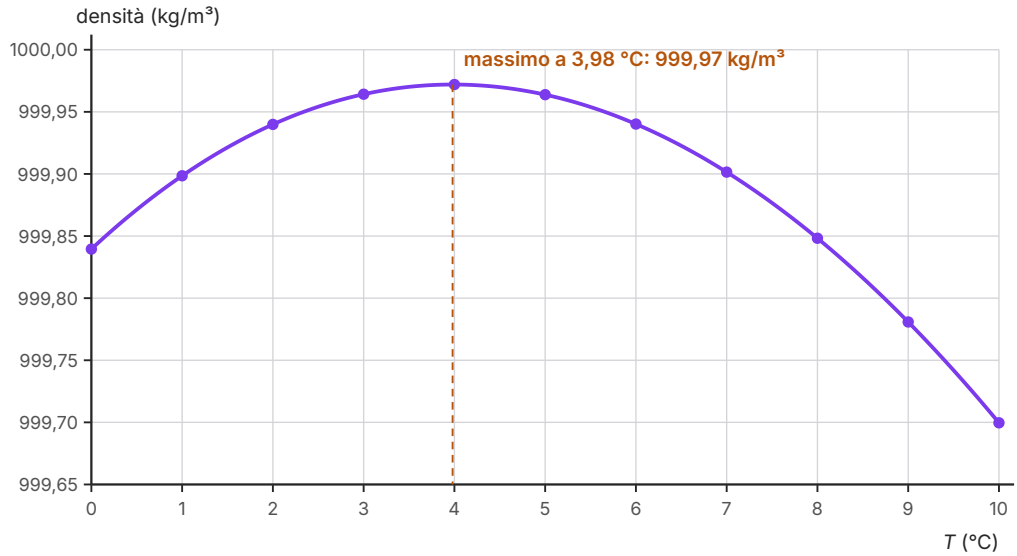


Figura 11.5 Densità dell'acqua alla pressione atmosferica normale fra 0 °C e 10 °C, calcolata con una formula empirica che riproduce le misure (Kell, 1975); i punti sono i valori ai gradi interi. La densità ha un massimo di 999,97 kg/m³ a 3,98 °C. Nota la scala verticale: tutte le variazioni sono inferiori a 0,3 kg/m³, cioè a tre decimillesimi.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere il grafico della densità dell'acqua

Problema. Usando la Figura 11.5, calcola il volume occupato da 1,000 kg di acqua a 0 °C, a 4 °C e a 10 °C, e descrivi come cambia il volume quando l'acqua viene scaldata da 0 °C a 10 °C.

Soluzione. Dal grafico leggiamo le densità: 999,84 kg/m^3 a 0 °C, 999,97 kg/m^3 a 4 °C, 999,70 kg/m^3 a 10 °C. Il volume è $V = m/d$: a 0 °C, V = 1,000 kg / 999,84 kg/m^3 = 1,000 16 × 10^{-3} m^3 = 1000,16 cm^3; a 4 °C, 1000,03 cm^3; a 10 °C, 1000,30 cm^3. Da 0 °C a 4 °C il volume diminuisce di 0,13 cm^3; da 4 °C a 10 °C aumenta di 0,27 cm^3.

Controllo. Le variazioni sono di qualche decimillesimo, come la dilatazione dei solidi: per vederle servono quattro o cinque cifre significative, e un termometro ad acqua sarebbe inutilizzabile vicino a 4 °C, dove a due temperature diverse corrisponde lo stesso volume. Il coefficiente α dell'acqua non è costante: vale circa 2,1 × 10^{-4} K^{-1} a 20 °C, è nullo a 4 °C ed è negativo sotto i 4 °C. Per confronto, 1,000 kg di ghiaccio occupa circa 1091 cm^3: il 9% in più dell'acqua liquida.

11.5.3 I gas

Anche i gas si dilatano quando vengono scaldati, ma con una differenza importante: il volume di un gas dipende fortemente anche dalla pressione, e per confrontare le dilatazioni bisogna te-

nere costante la pressione. In queste condizioni si osserva un fatto notevole: tutti i gas si dilatano in modo molto simile, con un coefficiente che, a partire da 0 °C, è di circa 1/273 del volume iniziale per ogni grado, cioè circa $3{,}7 \times 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$.

È un valore dieci volte maggiore di quello dei liquidi e cento volte maggiore di quello dei solidi: un palloncino vicino a un termosifone si gonfia visibilmente. La coincidenza fra il numero 273 e lo zero assoluto non è casuale: lo scoprirai nel prossimo anno, quando studierai le leggi dei gas.

COLLEGAMENTI

Perché i laghi gelano dalla superficie

In autunno l'acqua superficiale di un lago si raffredda a contatto con l'aria fredda, diventa più densa e scende verso il fondo, sostituita da acqua più calda che sale. Questo rimescolamento continua finché tutto il lago arriva a circa 4 °C. Da quel momento l'acqua di superficie che si raffredda ulteriormente diventa *meno* densa e resta in alto: si raffredda fino a 0 °C e gela, mentre sul fondo di un lago abbastanza profondo l'acqua resta intorno ai 4 °C per tutto l'inverno. Lo strato di ghiaccio, che galleggia, isola l'acqua sottostante dall'aria gelida.

Se l'acqua si comportasse come gli altri liquidi, i laghi gelerebbero dal fondo e, nei climi freddi, potrebbero ghiacciare interamente. Il comportamento anomalo permette invece ai pesci e agli altri organismi acquatici di sopravvivere all'inverno: è uno dei collegamenti fra fisica e biologia che hai già incontrato in *Scienze 1*.

IN SINTESI

Le formule della temperatura e della dilatazione

$T_K = T_C + 273{,}15$ — conversione fra le scale Celsius (°C) e Kelvin (K); una variazione ΔT ha lo stesso valore in K e in °C. Lo zero assoluto è 0 K = −273,15 °C.

$T_F = 1{,}8\ T_C + 32$ — conversione nella scala Fahrenheit (°F).

$\Delta l = \lambda\ l_0\ \Delta T$ — dilatazione lineare: l'allungamento (m) è proporzionale alla lunghezza iniziale l_0 (m) e alla variazione di temperatura ΔT (K); λ (K^{-1}) dipende dal materiale.

$\Delta S \approx 2\lambda\ S_0\ \Delta T$ — dilatazione superficiale di un solido isotropo (m^2).

$\Delta V = \alpha\ V_0\ \Delta T$ — dilatazione volumica (m^3) di solidi e liquidi; per i solidi isotropi $\alpha \approx 3\lambda$. Per un liquido in un recipiente, ciò che trabocca è la differenza fra la dilatazione del liquido e quella del recipiente.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: il coefficiente di dilatazione del rame

Materiali. Un tubo di rame lungo circa 60 cm, fissato a un'estremità a un supporto; un comparatore centesimale (sensibilità 0,01 mm) appoggiato all'altra estremità; un metro a nastro (sensibilità 1 mm); un termometro digitale (sensibilità 0,1 °C); un recipiente da cui far scorrere nel tubo acqua calda a diverse temperature, oppure, per l'ultima misura, il vapore di un bollitore azionato dall'insegnante; tubi di gomma; guanti da forno.

Procedimento. 1) Misura la lunghezza del tubo fra il punto fisso e il tastatore del comparatore: $l_0 = (600 \pm 1)$ mm. 2) Misura la temperatura ambiente, che è quella iniziale del tubo: $T_0 = (20{,}0 \pm 0{,}5)$ °C, e azzera il comparatore. 3) Fai scorrere nel tubo acqua a temperatura costante finché la lancetta del comparatore si ferma; leggi l'allungamento e la temperatura dell'acqua all'uscita del tubo. 4) Ripeti con acqua più calda e infine con il vapore. 5) Per ogni misura calcola $\Delta T = T - T_0$ e $\lambda = \Delta l / (l_0 \Delta T)$.

Tabella 11.2 Allungamento di un tubo di rame lungo 600 mm (dati tipici di una prova).

misura	T (°C)	ΔT (K)	Δl (mm)	λ (10^{-5} K^{-1})
1	40,0	20,0	0,21	1,75
2	55,0	35,0	0,35	1,67
3	70,0	50,0	0,52	1,73
4	85,0	65,0	0,66	1,69
5 (vapore)	99,5	79,5	0,82	1,72
media ± semidispersione				1,71 ± 0,04

Che cosa concludere. I cinque valori di λ sono vicini fra loro e non mostrano una tendenza con la temperatura: nell'intervallo studiato l'allungamento è proporzionale a ΔT, come prevede la legge. La media è $\lambda = (1{,}71 \pm 0{,}04) \times 10^{-5}$ K^{-1}, con un'incertezza relativa del 2%; il valore della Tabella 11.1 per il rame, $1{,}7 \times 10^{-5}$ K^{-1}, cade dentro l'intervallo: la misura è compatibile. La fonte principale di incertezza è la lettura di allungamenti di pochi decimi di millimetro con un comparatore che apprezza il centesimo: per la prima misura l'incertezza relativa su Δl è quasi del 5%.

Sicurezza. L'acqua calda e soprattutto il vapore provocano ustioni gravi: il bollitore è manovrato solo dall'insegnante, i tubi di gomma si fissano prima di aprire l'acqua calda e il tubo di rame si tocca soltanto con i guanti, anche alla fine della prova.

Per la relazione. Segui lo schema di *Fisica 1*, capitolo 5. Riporta la tabella dei dati con le incertezze, il grafico di Δl in funzione di ΔT con le barre d'errore e la retta passante per l'origine che meglio approssima i punti: la sua pendenza è λl_0, e da essa puoi ricavare λ in un secondo

modo. Confronta i due risultati fra loro e con il valore tabulato. Discuti gli errori sistematici: la temperatura del tubo può essere un po' più bassa di quella dell'acqua all'uscita, soprattutto con l'acqua meno calda; il supporto e il comparatore stesso possono scaldarsi e dilatarsi; il tubo si raffredda verso l'aria mentre leggi.

SINTESI

- Il tatto non misura la temperatura: dipende dallo stato della pelle e dalla rapidità con cui un materiale le sottrae o le cede energia.
- La temperatura si definisce in modo operativo con il termometro, uno strumento basato su un fenomeno che varia in modo regolare con la temperatura e tarato con due punti fissi.
- Nella scala Celsius il ghiaccio fonde a 0 °C e l'acqua bolle a 100 °C, a pressione atmosferica normale. Nella scala Kelvin, quella del SI, lo zero è lo zero assoluto: $T_K = T_C + 273{,}15$.
- Lo zero assoluto, −273,15 °C, è la temperatura più bassa possibile e non può essere raggiunto. Una differenza di temperatura ha lo stesso valore in kelvin e in gradi Celsius.
- Due corpi a contatto raggiungono l'equilibrio termico, cioè la stessa temperatura. Il principio zero (se A e B sono in equilibrio con C, lo sono fra loro) è ciò che rende significativa la lettura di un termometro.
- Nel modello particellare una temperatura più alta corrisponde a un'agitazione più rapida delle particelle.
- Un solido si allunga in proporzione alla lunghezza iniziale e alla variazione di temperatura: $\Delta l = \lambda\, l_0\, \Delta T$, con λ caratteristico del materiale (per i metalli circa $10^{-5}\ \mathrm{K^{-1}}$).
- Giunti di dilatazione, spazi fra le rotaie e lamine bimetalliche dei termostati sono applicazioni tecniche della dilatazione lineare.
- Superficie e volume di un solido isotropo crescono con coefficienti circa doppio e triplo di quello lineare: $\Delta V = \alpha\, V_0\, \Delta T$, $\alpha \approx 3\lambda$. Un foro in una lastra scaldata si allarga.
- I liquidi si dilatano più dei solidi; un recipiente pieno trabocca perché il liquido si dilata più del recipiente.
- L'acqua ha densità massima a 3,98 °C: fra 0 °C e 4 °C si contrae scaldandosi. Per questo i laghi gelano dalla superficie e sul fondo restano intorno ai 4 °C.
- A pressione costante tutti i gas si dilatano in modo simile, di circa 1/273 del volume a 0 °C per ogni grado: molto più dei liquidi e dei solidi.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Due corpi in equilibrio termico hanno sicuramente uguale:
   A. massa
   B. temperatura
   C. energia interna
   D. volume

2. ● In una mattina d'inverno una ringhiera di metallo sembra più fredda di una panchina di legno vicina. Il motivo è che:
   A. il metallo è a una temperatura più bassa del legno
   B. il legno produce energia
   C. il metallo sottrae energia alla mano più rapidamente del legno
   D. il metallo si è contratto durante la notte

3. ● La temperatura di 300 K corrisponde a:
   A. 573,15 °C
   B. −26,85 °C
   C. 300 °C
   D. 26,85 °C

4. ● Una variazione di temperatura di 25 °C corrisponde a una variazione di:
   A. 25 K
   B. 298,15 K
   C. 248,15 K
   D. 45 K

5. ●● Una sbarra di rame lunga l_0, scaldata di ΔT, si allunga di Δl. Una sbarra dello stesso rame lunga $2l_0$, scaldata di $\Delta T/2$, si allunga di:
   A. $\Delta l/2$
   B. Δl
   C. $2\Delta l$
   D. $4\Delta l$

6. ●● Una lastra di metallo con un foro circolare viene scaldata. Il diametro del foro:
   A. diminuisce
   B. resta uguale
   C. aumenta
   D. aumenta o diminuisce a seconda del metallo

7. ● Il corpo A è in equilibrio termico con il corpo C, e il corpo B è in equilibrio termico con C. Allora:
   A. A e B sono in equilibrio termico fra loro
   B. A e B hanno la stessa massa
   C. C è più caldo sia di A sia di B
   D. A e B, messi a contatto, si scambiano energia fino all'equilibrio

8. ●● Un metallo ha coefficiente di dilatazione lineare $2{,}0 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$. Il suo coefficiente di dilatazione volumica è circa:
   A. $2{,}0 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$
   B. $4{,}0 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$
   C. $8{,}0 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$
   D. $6{,}0 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$

9. ●● In pieno inverno un lago profondo ha la superficie ghiacciata. L'acqua sul fondo è a circa:
   A. −4 °C
   B. 0 °C
   C. 4 °C
   D. 10 °C

Vero o falso

10. ● Lo zero assoluto corrisponde a −273,15 °C. V / F

11. ● Un corpo caldo contiene più calore di un corpo freddo. V / F

12. ●● Dal punto di vista fisico, una temperatura di 20 °C è il doppio di una temperatura di 10 °C. V / F

13. ●● Quando una sfera di ferro si scalda, l'aumento percentuale del suo volume è circa il triplo dell'aumento percentuale del suo diametro. V / F

14. ● L'acqua a 4 °C è più densa dell'acqua a 0 °C. V / F

Applicare

15. ● Converti: a) 37,0 °C in kelvin; b) 77 K in gradi Celsius; c) −40 °C in kelvin.

16. ● In una località di montagna la temperatura passa da −5 °C di notte a 12 °C nel pomeriggio. Quanto vale la variazione di temperatura in gradi Celsius e in kelvin?

17. ● Un'asta di alluminio lunga 2,00 m viene scaldata da 20 °C a 70 °C. Di quanto si allunga? Usa la Tabella 11.1.

18. ● Un filo di rame lungo 50,0 m viene teso fra due pali a 30 °C. Di quanto cambia la sua lunghezza in una notte d'inverno a −10 °C?

19. ●● Completa. Nella scala Kelvin lo zero corrisponde a _____ °C; una variazione di 1 K equivale a una variazione di _____ °C; la densità dell'acqua è massima intorno a _____ °C; per un solido isotropo il coefficiente di dilatazione volumica è circa _____ volte quello lineare.

20. ●● La Figura 11.6 riporta l'allungamento di due aste metalliche, A e B, entrambe lunghe 1,000 m a 20 °C, in funzione della variazione di temperatura. a) Leggi sul grafico l'allungamento di ciascuna asta per $\Delta T = 100$ K. b) Calcola i due coefficienti di dilatazione lineare. c) Usando la Tabella 11.1, di quali metalli possono essere fatte le aste?

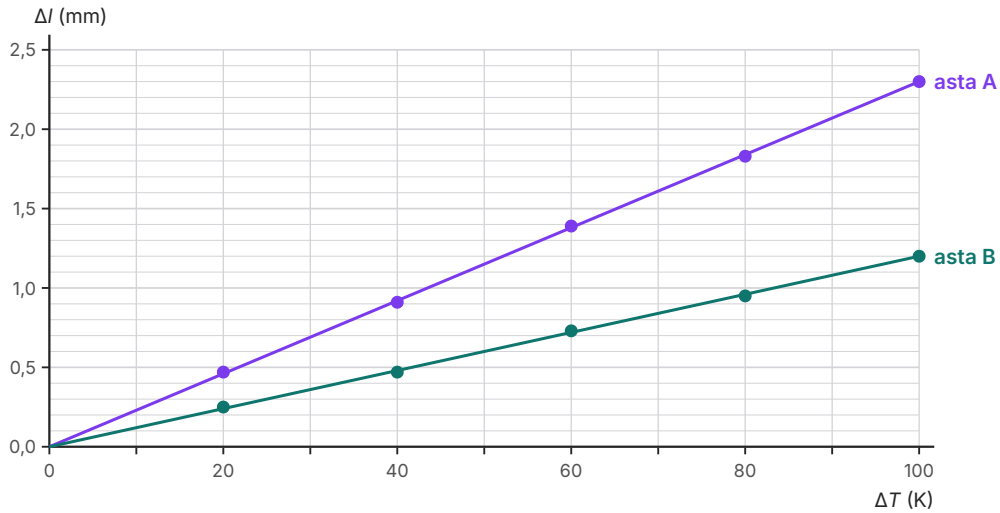


Figura 11.6 Allungamento in funzione della variazione di temperatura per due aste metalliche lunghe 1,000 m (dati tipici; per un esercizio della sezione «Applicare»).

21. ● Una lamiera d'acciaio quadrata ha un'area di 1,00 m^2 a 10 °C. Di quanto aumenta la sua area a 50 °C?

22. ●● Una sfera di rame ha un volume di 100,0 cm^3 a 20 °C. Quanto aumenta il suo volume se viene scaldata a 220 °C?

23. ● Una previsione meteorologica americana annuncia 86 °F. Quanti gradi Celsius sono?

Problemi

24. ●● Un viadotto in calcestruzzo armato è lungo 420 m e la temperatura della sua struttura varia fra −15 °C in inverno e 45 °C in estate. a) Qual è la differenza fra la sua lunghezza massima e quella minima? b) Se il viadotto è stato costruito a 15 °C, di quanto si allunga d'estate e di quanto si accorcia d'inverno rispetto alla lunghezza di costruzione?

25. ●●● Un anello d'acciaio ha diametro interno di 25,000 mm e una sfera di ottone ha diametro di 25,025 mm, entrambi a 20 °C. a) A quale temperatura bisogna scaldare il solo anello perché la sfera possa passarci? b) Se si scaldassero insieme l'anello e la sfera, per esempio di 100 K, la sfera passerebbe? Giustifica con un calcolo.

26. ●●● Un blocco di alluminio ha una densità di 2700 kg/m^3 a 20 °C. Quale densità ha a 320 °C? (Ricorda dal primo volume la definizione di densità, $d = m/V$: la massa non cambia scaldando il blocco.)

27. ●● Il serbatoio d'acciaio di un'auto ha una capacità di 50,0 L a 10 °C e viene riempito fino all'orlo di benzina alla stessa temperatura ($\alpha_{\text{benzina}} \approx 9{,}5 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-1}$). L'auto resta poi al sole e serbatoio e benzina arrivano a 35 °C. Quanta benzina trabocca dal tubo di sfiato?

28. ●●● In un laboratorio si misura l'allungamento di un tubo metallico. La lunghezza iniziale è (800 ± 1) mm a 20,0 °C; scaldato con il vapore a 99,5 °C, il tubo si allunga di (1,46 ± 0,01) mm. L'incertezza sulla variazione di temperatura è di 1 K. a) Calcola il coefficiente di dilatazione lineare con la sua incertezza. b) Il risultato è compatibile con il valore di qualche metallo della Tabella 11.1?

29. ●●● Il bulbo di un termometro contiene 0,250 cm^3 di mercurio e il capillare ha una sezione di 0,0100 mm^2. a) Trascurando la dilatazione del vetro, di quanti millimetri sale il mercurio nel capillare per un aumento di temperatura di 1 °C? b) Come cambia il risultato se si tiene conto della dilatazione del bulbo di vetro comune?

30. ●● a) A quale temperatura le scale Celsius e Fahrenheit segnano lo stesso numero? b) E a quale temperatura la scala Kelvin e la scala Fahrenheit segnano lo stesso numero?

Ragionare e argomentare

31. ●● Un compagno sostiene: «Se scaldo un anello di metallo, il metallo si dilata in tutte le direzioni, anche verso il centro, e quindi il foro si restringe». Trova l'errore nel suo ragionamento e spiega che cosa succede davvero.

32. ●●● Stima di ordine di grandezza. Se una linea ferroviaria lunga circa 600 km fosse fatta di un'unica rotaia d'acciaio libera di dilatarsi: di quanto cambierebbe la sua lunghezza fra l'inverno e l'estate? Indica le ipotesi che fai sull'escursione termica e commenta il risultato.

33. ●● Quando si immerge un termometro a liquido in acqua molto calda, si osserva a volte che per un istante il livello del liquido scende leggermente, prima di cominciare a salire. Spiega perché.

PER APPROFONDIRE

- [MAX] J. C. Maxwell, *Theory of Heat*: i primi capitoli, sulla misura della temperatura, sui termometri e sulla dilatazione dei corpi, scritti da uno dei fondatori della fisica moderna per un pubblico di non specialisti.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: il capitolo su temperatura, calore e dilatazione, con molti esempi quotidiani e una bella discussione del comportamento dell'acqua vicino a 4 °C.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulla temperatura, con il principio zero, le scale termometriche e la dilatazione termica.
- [TAY] J. R. Taylor, *Introduzione all'analisi degli errori*: per la relazione di laboratorio, i capitoli sulla propagazione delle incertezze e sul confronto fra un valore misurato e uno atteso.

Glossario del capitolo

Coefficiente di dilatazione lineare
Allungamento relativo di un materiale per ogni kelvin di aumento di temperatura (λ, in K^{-1}).

Coefficiente di dilatazione volumica
Aumento relativo di volume per ogni kelvin (α, in K^{-1}); per i solidi isotropi $\alpha \approx 3\lambda$.

Comportamento anomalo dell'acqua
Contrazione dell'acqua scaldata fra 0 °C e circa 4 °C; la densità dell'acqua è massima a 3,98 °C.

Dilatazione apparente
Dilatazione di un liquido osservata in un recipiente: differenza fra l'aumento di volume del liquido e quello della capacità del recipiente.

Dilatazione lineare
Aumento di lunghezza di un solido scaldato: $\Delta l = \lambda\, l_0\, \Delta T$.

Equilibrio termico
Condizione di due corpi a contatto che hanno raggiunto la stessa temperatura e non cambiano più il loro stato termico.

Giunto di dilatazione
Interruzione progettata in un ponte, in una strada o in un edificio che permette alle parti della struttura di dilatarsi e contrarsi liberamente.

Kelvin
Unità SI della temperatura (K), di ampiezza uguale al grado Celsius; si scrive senza il simbolo di grado.

Lamina bimetallica
Striscia formata da due metalli con coefficienti di dilatazione diversi saldati insieme, che si incurva al variare della temperatura; si usa nei termostati.

Principio zero della termodinamica
Se due corpi sono ciascuno in equilibrio termico con un terzo, sono in equilibrio termico fra loro. Giustifica l'uso del termometro.

Punti fissi
Fenomeni che avvengono sempre alla stessa temperatura, come la fusione del ghiaccio e l'ebollizione dell'acqua a pressione normale, usati per tarare i termometri.

Scala Celsius
Scala di temperatura con 0 °C alla fusione del ghiaccio e 100 °C all'ebollizione dell'acqua, a pressione atmosferica normale.

Scala Kelvin
Scala assoluta di temperatura, con lo zero allo zero assoluto e unità uguale al grado Celsius: $T_K = T_C + 273{,}15$.

Temperatura
Grandezza che descrive lo stato termico di un corpo, definita operativamente come il valore letto su un termometro in equilibrio termico con il corpo. Unità SI: kelvin (K).

Temperatura assoluta
Temperatura espressa nella scala Kelvin; è sempre positiva.

Termocoppia
Giunzione di due metalli diversi che produce una piccola tensione elettrica dipendente dalla temperatura; si usa nei termometri digitali.

Termometro
Strumento che misura la temperatura sfruttando un fenomeno che varia in modo regolare con essa, tarato con punti fissi.

Termoscopio
Dispositivo che mostra se un corpo è più caldo o più freddo di un altro, senza una scala tarata.

Zero assoluto
La temperatura più bassa possibile, 0 K = −273,15 °C; si può avvicinare ma non raggiungere.

Soluzioni

1. B. È la definizione di equilibrio termico: la temperatura diventa uguale; massa, volume ed energia interna possono essere diversi.

2. C. Ringhiera e panchina sono alla stessa temperatura, quella dell'aria; il metallo conduce meglio e porta via energia alla mano più in fretta.

3. D. $T_C = T_K - 273{,}15 = 300 - 273{,}15 = 26{,}85$ °C.

4. A. Kelvin e grado Celsius hanno la stessa ampiezza: una differenza ha lo stesso valore numerico nelle due scale.

5. B. $\Delta l = \lambda\, l_0\, \Delta T$: raddoppiare l_0 e dimezzare ΔT lascia invariato il prodotto.

6. C. La dilatazione ingrandisce tutte le distanze nella stessa proporzione, anche quelle fra i punti del bordo del foro.

7. A. È l'enunciato del principio zero; due corpi in equilibrio termico fra loro non si scambiano energia.

8. D. $\alpha \approx 3\lambda = 3 \times 2{,}0 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} = 6{,}0 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$.

9. C. L'acqua a circa 4 °C è la più densa e resta sul fondo; quella più fredda galleggia sopra e in superficie gela.

10. V. È il valore dello zero assoluto nella scala Celsius, 0 K.

11. F. Un corpo non contiene calore: possiede energia interna. Il calore è l'energia che passa da un corpo all'altro a causa di una differenza di temperatura (capitolo 12).

12. F. Le temperature assolute sono 293,15 K e 283,15 K: il rapporto è circa 1,035, non 2.

13. V. $\Delta V/V_0 = \alpha \Delta T \approx 3\lambda \Delta T = 3 \cdot \Delta d/d_0$.

14. V. La densità dell'acqua è massima a 3,98 °C (999,97 kg/m^3), mentre a 0 °C vale 999,84 kg/m^3.

15. a) 37,0 + 273,15 = 310,15 K ≈ 310,2 K. b) 77 − 273,15 = −196,15 °C ≈ −196 °C. c) −40 + 273,15 = 233,15 K ≈ 233 K.

16. $\Delta T = 12$ °C − (−5 °C) = 17 °C = 17 K.

17. $\Delta l = \lambda\, l_0\, \Delta T = 2{,}3 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 2{,}00\ \text{m} \times 50\ \text{K} = 2{,}3 \times 10^{-3}\ \text{m} = 2{,}3\ \text{mm}$.

18. $\Delta T = -40$ K; $\Delta l = 1{,}7 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 50{,}0\ \text{m} \times (-40\ \text{K}) = -3{,}4 \times 10^{-2}$ m: il filo si accorcia di 3,4 cm. Per questo i fili si tendono lasciandoli un po' lenti.

19. −273,15; 1; 4 (più precisamente 3,98); 3.

20. a) Asta A: $\Delta l \approx 2{,}3$ mm; asta B: $\Delta l \approx 1{,}2$ mm. b) $\lambda = \Delta l/(l_0 \Delta T)$: $\lambda_A = 2{,}3 \times 10^{-3}\ \text{m}/(1{,}000\ \text{m} \times 100\ \text{K}) = 2{,}3 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$; $\lambda_B = 1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$. c) A è di alluminio; B di acciaio (il calcestruzzo ha lo stesso coefficiente, ma non è un metallo). I punti stanno su rette passanti per l'origine: l'allungamento è proporzionale a ΔT.

21. $\Delta S \approx 2\lambda\, S_0\, \Delta T = 2 \times 1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 1{,}00\ \text{m}^2 \times 40\ \text{K} = 9{,}6 \times 10^{-4}\ \text{m}^2 = 9{,}6\ \text{cm}^2$.

22. $\alpha \approx 3 \times 1{,}7 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} = 5{,}1 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$; $\Delta V = 5{,}1 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 100{,}0\ \text{cm}^3 \times 200\ \text{K} \approx 1{,}0\ \text{cm}^3$.

23. $T_C = (T_F - 32)/1{,}8 = (86 - 32)/1{,}8 = 30$ °C.

24. a) $\Delta T = 45$ °C − (−15 °C) = 60 K; $\Delta l = 1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 420\ \text{m} \times 60\ \text{K} \approx 0{,}30$ m. b) In entrambi i casi $|\Delta T| = 30$ K: $\Delta l = 1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 420\ \text{m} \times 30\ \text{K} \approx 0{,}15$ m; il viadotto si allunga di circa 15 cm d'estate e si accorcia di circa 15 cm d'inverno. I giunti devono assorbire 30 cm in tutto.

25. a) Il diametro interno dell'anello deve crescere di 0,025 mm: $\Delta T = \Delta d/(\lambda_{\text{acciaio}}\, d_0) = 0{,}025\ \text{mm}/(1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 25{,}000\ \text{mm}) \approx 83$ K, cioè una temperatura di almeno 20 °C + 83 K ≈ 103 °C, circa $1{,}0 \times 10^2$ °C. b) Con $\Delta T = 100$ K: anello 25,000 mm × $(1 + 1{,}2 \times 10^{-3})$ = 25,030 mm; sfera 25,025 mm × $(1 + 1{,}9 \times 10^{-3}) \approx$ 25,073 mm. La sfera non passa: è già più grande ed è fatta di un materiale che si dilata di più, quindi la differenza aumenta.

26. Il volume cresce di $\Delta V/V_0 = 3\lambda \Delta T = 3 \times 2{,}3 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 300\ \text{K} = 0{,}0207$. Con la stessa massa, $d = m/V =$

$d_0/(1 + 0{,}0207) = 2700\ \text{kg/m}^3/1{,}0207 \approx 2{,}65 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$ ($2645\ \text{kg/m}^3$): la densità diminuisce di circa il 2%.

27. $\Delta T = 25$ K. Benzina: $\Delta V = 9{,}5 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-1} \times 50{,}0\ \text{L} \times 25\ \text{K} \approx 1{,}19$ L. Serbatoio: $\alpha \approx 3 \times 1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} = 3{,}6 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$, $\Delta V = 3{,}6 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 50{,}0\ \text{L} \times 25\ \text{K} = 0{,}045$ L. Trabocca la differenza: 1,19 L − 0,045 L ≈ 1,1 L.

28. a) $\Delta T = 99{,}5\ ^\circ\text{C} - 20{,}0\ ^\circ\text{C} = 79{,}5$ K; $\lambda = \Delta l/(l_0 \Delta T) = 1{,}46\ \text{mm}/(800\ \text{mm} \times 79{,}5\ \text{K}) \approx 2{,}30 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$. Incertezza relativa: 0,01/1,46 + 1/800 + 1/79,5 ≈ 0,7% + 0,1% + 1,3% ≈ 2,1%, cioè $0{,}05 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$: $\lambda = (2{,}30 \pm 0{,}05) \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$. b) L'intervallo $2{,}25–2{,}35 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$ contiene il valore dell'alluminio, $2{,}3 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$: il tubo è probabilmente di alluminio. Nessun altro metallo della tabella è compatibile.

29. a) $\Delta V = \alpha\, V_0\, \Delta T = 1{,}8 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-1} \times 250\ \text{mm}^3 \times 1\ \text{K} = 0{,}045\ \text{mm}^3$ ($0{,}250\ \text{cm}^3 = 250\ \text{mm}^3$). Il liquido sale di $h = \Delta V/S = 0{,}045\ \text{mm}^3/0{,}0100\ \text{mm}^2 = 4{,}5$ mm. b) Anche la capacità del bulbo aumenta, con $\alpha_{\text{vetro}} \approx 3 \times 9 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1} = 2{,}7 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$. Conta la dilatazione apparente, con coefficiente $1{,}8 \times 10^{-4} - 0{,}27 \times 10^{-4} \approx 1{,}5 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-1}$: il mercurio sale di circa 3,8 mm per grado, il 15% in meno.

30. a) Si pone $T_F = T_C = x$: $x = 1{,}8x + 32$, quindi $-0{,}8x = 32$ e $x = -40$. A −40 °C = −40 °F le due scale coincidono. b) Si pone $T_C + 273{,}15 = 1{,}8T_C + 32$: $0{,}8T_C = 241{,}15$, $T_C \approx 301{,}4$ °C, cioè circa 574,6 K = 574,6 °F.

31. Traccia di risposta. L'errore è pensare che il metallo «riempia» il foro dilatandosi verso l'interno. Ogni pezzetto di metallo si dilata, ma i pezzetti attorno al foro si allontanano tutti gli uni dagli altri, anche lungo la circonferenza del bordo: la circonferenza si allunga e quindi il diametro cresce. La dilatazione è un ingrandimento uniforme di tutte le distanze. Prova: il disco che riempirebbe il foro si dilaterebbe come il resto della lastra; l'esperimento dell'anello e della sfera lo conferma.

32. Ipotesi: escursione fra la rotaia d'inverno e quella al sole d'estate di circa 40 K; $\lambda \approx 1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$. $\Delta l \approx 1{,}2 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} \times 6 \times 10^5\ \text{m} \times 40\ \text{K} \approx 3 \times 10^2$ m. Una rotaia libera cambierebbe lunghezza di qualche centinaio di metri: per questo le rotaie si posano in tratti separati da spazi, oppure si saldano e si fissano saldamente in modo che non possano allungarsi. Con un'escursione di 20 K o di 60 K l'ordine di grandezza resta lo stesso: centinaia di metri.

33. Traccia di risposta. L'acqua calda scalda prima il vetro del bulbo, che è a contatto con essa, e solo dopo il liquido interno. Il bulbo si dilata, la sua capacità aumenta e il liquido, ancora freddo, scende un poco nel capillare. Appena il calore arriva al liquido, che si dilata molto più del vetro, il livello comincia a salire. È una conferma che ciò che leggiamo è la dilatazione apparente del liquido rispetto al recipiente.