CAPITOLO

6

La temperatura e la dilatazione termica

Il caldo e il freddo li sente la pelle, e ciascuno a modo suo; la temperatura la legge un termometro, ed è la stessa per tutti.

OBIETTIVI

1. Distinguere la sensazione di caldo e di freddo dalla temperatura; definire l'equilibrio termico e il principio zero.
2. Descrivere come si costruisce e si tara un termometro, e conoscere la storia dei primi strumenti.
3. Convertire le temperature fra le scale Celsius, Kelvin e Fahrenheit e spiegare il significato dello zero assoluto.
4. Applicare le leggi della dilatazione lineare, superficiale e volumica di solidi e liquidi, e misurare un coefficiente di dilatazione.
5. Spiegare il comportamento anomalo dell'acqua e le sue conseguenze per la vita nei laghi.

INDICE DEL CAPITOLO

6.1 Caldo e freddo: dalla sensazione all'equilibrio termico 2
6.2 Il termometro e le scale di temperatura 3
6.3 La dilatazione lineare 8
6.4 La dilatazione superficiale e volumica 13
6.5 Il comportamento anomalo dell'acqua 15

Fisica 4 · Parte III · Temperatura e calore · versione 1.0
Capitolo 6: La temperatura e la dilatazione termica · pagine 163–184 del volume completo · estratto per lo studio

Una mattina d'inverno entri in classe e appoggi la mano sul banco: il piano di legno ti sembra tiepido, la gamba di metallo gelata. Eppure banco e gamba sono nella stessa aula da tutta la notte, e un termometro appoggiato all'uno e all'altra segnerebbe lo stesso valore. La mano ti ha detto una cosa e il termometro un'altra: chi ha ragione?

Con questo capitolo comincia lo studio dei fenomeni termici. Vedrai come si passa dalla sensazione di caldo e di freddo a una misura, come è nato il termometro e perché esiste una temperatura sotto la quale non si può scendere. Poi studierai la prima conseguenza visibile di un cambiamento di temperatura: quasi tutti i corpi, scaldandosi, si dilatano. È un effetto piccolo, ma i ponti, i termostati e perfino la vita nei laghi d'inverno dipendono da esso.

6.1 Caldo e freddo: dalla sensazione all'equilibrio termico

6.1.1 Una sensazione relativa

Prepara tre bacinelle: una con acqua calda (non bollente), una con acqua fredda di rubinetto e una, in mezzo, con acqua tiepida. Tieni per un minuto la mano destra nell'acqua calda e la sinistra in quella fredda, poi immergile insieme nella bacinella centrale. La destra sente freddo, la sinistra caldo: la stessa acqua, nello stesso istante, sembra fredda a una mano e calda all'altra.

L'esperimento delle tre bacinelle mostra che la sensazione termica è *relativa*: la pelle non ci dice quanto è caldo un corpo, ma se è più caldo o più freddo della pelle stessa, e quanto rapidamente l'energia passa dall'uno all'altra. È per questo che il metallo del banco sembra più freddo del legno, alla stessa temperatura: il metallo sottrae energia alla mano molto più in fretta. Lo capirai bene nel capitolo 7, studiando la conduzione del calore.

6.1.2 L'equilibrio termico e il principio zero

Metti una lattina presa dal frigorifero in una pentola d'acqua a temperatura ambiente: la lattina si scalda, l'acqua vicina si raffredda, e dopo un po' non cambia più nulla. Due corpi a contatto, isolati dall'ambiente, raggiungono sempre uno stato in cui le loro proprietà macroscopiche smettono di cambiare: diciamo che sono in **equilibrio termico**.

Che cosa hanno in comune due corpi in equilibrio termico? Non la massa né il materiale: hanno in comune il valore di una grandezza, che chiamiamo **temperatura**: due corpi sono in equilibrio termico se e solo se hanno la stessa temperatura. Quando due corpi a temperature diverse vengono messi a contatto, la temperatura del più caldo diminuisce e quella del più freddo aumenta, finché diventano uguali.

Per confrontare le temperature di due corpi A e B che non si possono mettere a contatto, come l'acqua di un lago e quella di un acquario, si usa un terzo corpo C, il termometro: lo si porta in equilibrio con A, poi con B, e si confrontano le letture. Che il metodo funzioni non è ovvio; la fisica lo assume come un principio, confermato da ogni esperienza, il **principio zero della termodinamica**: **se due corpi A e B sono ciascuno in equilibrio termico con un terzo corpo C, allora A e B sono in equilibrio termico fra loro.**

È una proprietà *transitiva*, come quella dell'uguaglianza: se $a = c$ e $b = c$, allora $a = b$. Fu enunciato esplicitamente solo nel Novecento, dopo il primo e il secondo principio che studierai nella quarta parte; poiché però viene logicamente prima di entrambi, gli fu dato il numero zero.

Il principio zero dice anche che cosa misura davvero un termometro: la *propria* temperatura. Questa coincide con quella del corpo soltanto quando i due hanno raggiunto l'equilibrio termico. Per questo un termometro clinico va tenuto a contatto con il corpo per un certo tempo, e un buon termometro deve essere piccolo rispetto al corpo da misurare: raggiungendo l'equilibrio, deve cambiare il meno possibile la temperatura che vuole misurare.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Temperatura viene dal latino *temperatura*, «giusta mescolanza», da *temperare*, che significa mescolare nella giusta proporzione: i Romani «temperavano» il vino con l'acqua. Il senso della parola si adatta bene all'equilibrio termico: mescolando acqua calda e acqua fredda si ottiene una temperatura intermedia.

Termometro e **termoscopio** uniscono il greco θερμός, «caldo», a μέτρον, «misura», e a σκοπέω, «osservare»: il termoscopio permette di *osservare* se un corpo si scalda o si raffredda, il termometro di *misurarne* la temperatura.

Grado viene dal latino *gradus*, «passo, gradino»: i gradi sono i gradini uguali in cui si divide la scala del termometro. **Dilatazione**, infine, viene da *dilatare*, «allargare», formato su *latus*, «largo».

6.2 Il termometro e le scale di temperatura

6.2.1 La proprietà termometrica e i punti fissi

Per misurare la temperatura si sfrutta una **proprietà termometrica**: una grandezza misurabile che cambia, in modo regolare e riproducibile, quando cambia la temperatura. Può essere il volume di un liquido, la pressione di un gas chiuso, la resistenza elettrica di un filo, il colore della luce emessa da un corpo caldo. Fra i primi strumenti basati su un'idea di questo tipo c'è il **termoscopio** attribuito a Galileo Galilei, che lo costruì a Padova intorno al 1600 (Figura 6.1a): un bulbo di vetro pieno d'aria, con un lungo collo capovolto in un vaso d'acqua. Quando l'aria del

bulbo si scalda si dilata e spinge verso il basso l'acqua nel collo; quando si raffredda l'acqua risale.

Il termoscopio *mostra* le variazioni di temperatura, ma non le misura: non ha una scala, e il livello dell'acqua dipende anche dalla pressione atmosferica, che cambia da un giorno all'altro. Per avere un termometro servono tre ingredienti: una proprietà termometrica affidabile, due temperature di riferimento facili da riprodurre ovunque, i **punti fissi**, e una regola per dividere l'intervallo fra di esse. A Firenze, a metà del Seicento, l'Accademia del Cimento usava già termometri di vetro sigillati, pieni di alcol, con le divisioni segnate da gocce di smalto sul tubo: essendo chiusi, non risentivano della pressione dell'aria.

Il **termometro a liquido** moderno (Figura 6.1b) è un bulbo pieno di liquido (alcol colorato, un tempo mercurio) collegato a un tubicino sottilissimo, il capillare. Scaldandosi, il liquido aumenta di volume più del vetro e sale nel capillare; la lunghezza della colonna è la proprietà termometrica. Lo si **tara** immergendolo nel ghiaccio fondente e poi nel vapore dell'acqua che bolle alla pressione di 1 atm, segnando i due livelli e dividendo lo spazio fra essi in parti uguali.

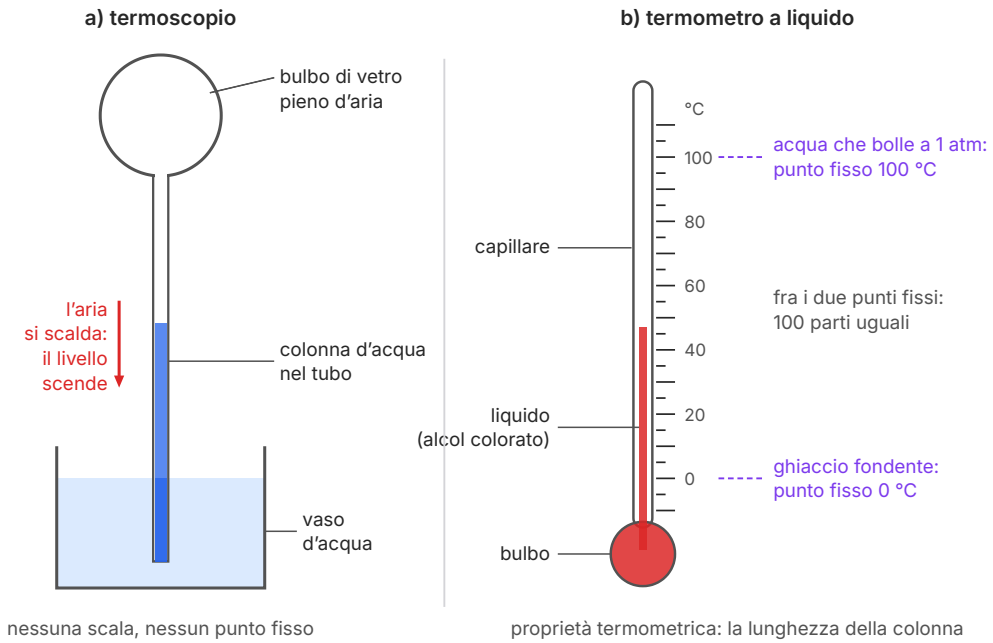


Figura 6.1 a) Il termoscopio: l'aria chiusa nel bulbo, scaldandosi, si dilata e fa scendere l'acqua nel tubo. Lo strumento segnala le variazioni di temperatura ma non ha una scala, e risente della pressione atmosferica. b) Il termometro a liquido: la lunghezza della colonna nel capillare è la proprietà termometrica; i due punti fissi (fusione del ghiaccio ed ebollizione dell'acqua a 1 atm) definiscono la scala Celsius. Nel disegno il termometro segna circa 47 °C.

6.2.2 Le scale Celsius e Fahrenheit

Nella **scala Celsius** al ghiaccio che fonde si assegna 0 °C e all'acqua che bolle alla pressione di 1 atm 100 °C; l'intervallo è diviso in cento parti, ciascuna delle quali è un **grado Celsius** (°C). La scala si estende oltre i punti fissi con gradi della stessa ampiezza, verso l'alto e verso il basso: una notte d'inverno in montagna può arrivare a −20 °C. Il simbolo della temperatura Celsius è t.

Negli Stati Uniti, e in pochi altri paesi, si usa ancora nella vita quotidiana la **scala Fahrenheit** (°F), in cui il ghiaccio fonde a 32 °F e l'acqua bolle a 212 °F. Fra i due punti fissi ci sono quindi 180 gradi Fahrenheit contro 100 gradi Celsius: un grado Fahrenheit è i 100/180 = 5/9 di un grado Celsius. Per passare da una scala all'altra si tiene conto sia dell'ampiezza diversa dei gradi sia dello zero spostato:

$$t_F = \frac{9}{5}t + 32 \qquad t = \frac{5}{9}(t_F - 32)$$

dove t_F è la temperatura in gradi Fahrenheit e t quella in gradi Celsius. Il grafico di t_F in funzione di t è una retta di pendenza 9/5 e ordinata all'origine 32.

ESEMPIO SVOLTO

Febbre in gradi Fahrenheit

Problema. Durante un viaggio negli Stati Uniti un termometro clinico segna 101,3 °F. a) Qual è la temperatura in gradi Celsius? È febbre? b) A quale temperatura le due scale segnano lo stesso numero?

a) $t = \frac{5}{9}(101{,}3 - 32)\ °C = \frac{5}{9} \cdot 69{,}3\ °C = 38{,}5\ °C$. La temperatura normale del corpo, misurata sotto l'ascella, è intorno ai 36–37 °C: 38,5 °C è febbre.

b) Cerchiamo il valore x per cui $t_F = t = x$: $x = \frac{9}{5}x + 32$, cioè $-\frac{4}{5}x = 32$ e $x = -40$. A −40 gradi le due scale coincidono: −40 °C = −40 °F.

Controllo. Una differenza di temperatura di 1 °C equivale a 1,8 °F: la febbre di 38,5 °C è 1,5 °C sopra i 37 °C, cioè 2,7 °F sopra i 98,6 °F. Infatti 98,6 °F + 2,7 °F = 101,3 °F.

6.2.3 Lo zero assoluto e la scala Kelvin

Le scale Celsius e Fahrenheit hanno lo zero in punti scelti per comodità: per questo esistono temperature negative. La fisica ha però scoperto che in natura esiste una temperatura minima, che nessun corpo può raggiungere né, tanto meno, superare verso il basso: lo **zero assoluto**, che nella scala Celsius corrisponde a −273,15 °C. Come lo si sia trovato, estrapolando il comportamento dei gas, e che cosa significhi nel modello delle molecole in moto, lo vedrai nel capitolo 9.

La **scala Kelvin**, o scala assoluta, mette lo zero proprio allo zero assoluto e usa gradi della stessa ampiezza di quelli Celsius. La sua unità è il **kelvin** (K), l'unità di temperatura del Sistema Internazionale che hai incontrato nella tabella delle grandezze fondamentali (Fisica 3, capitolo 2). La **temperatura assoluta** si indica con T, e si ottiene da quella Celsius aggiungendo 273,15:

$$T = t + 273{,}15 \qquad (T \text{ in K}, t \text{ in °C})$$

Il ghiaccio fonde a 273,15 K, l'acqua bolle a 373,15 K, il corpo umano sta intorno a 310 K (Figura 6.2). Nei calcoli che non richiedono grande precisione si arrotonda spesso a 273: 20 °C ≈ 293 K. Nella scala Kelvin non esistono temperature negative, e il simbolo si scrive senza il segno di grado: 300 K, «trecento kelvin», e non «300 °K».

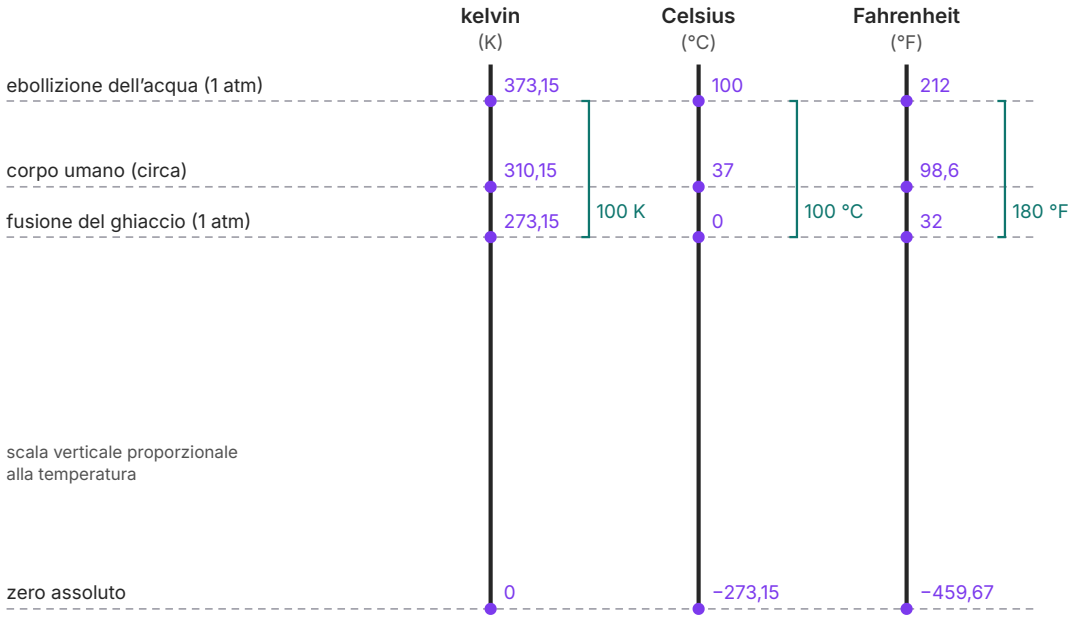


Figura 6.2 Le tre scale di temperatura a confronto, con la stessa scala verticale. Fra la fusione del ghiaccio e l'ebollizione dell'acqua alla pressione di 1 atm ci sono 100 K, 100 °C e 180 °F: i gradi Celsius e i kelvin hanno la stessa ampiezza, i gradi Fahrenheit sono più piccoli (1 °F = 5/9 °C). Lo zero assoluto è 0 K = −273,15 °C = −459,67 °F.

DA RICORDARE

Temperature e differenze di temperatura

Poiché kelvin e gradi Celsius hanno la stessa ampiezza, una *differenza* di temperatura ha lo stesso valore nelle due scale: se l'acqua passa da 20 °C a 80 °C, $\Delta t = 60$ °C e $\Delta T = (353{,}15 - 293{,}15)$ K = 60 K. Nelle formule in cui compare solo una differenza, come quelle della dilatazione, si può usare indifferentemente l'una o l'altra. Una temperatura, invece, cambia: 60 °C sono 333,15 K.

6.2.4 Termometri diversi per usi diversi

I termometri a liquido sono semplici e affidabili, ma lenti, fragili e utilizzabili solo dove il liquido non gela e non bolle: l'alcol solidifica intorno a −114 °C e bolle intorno a 78 °C (Tabella A.4 in Appendice). Il mercurio, molto usato in passato, è tossico: nell'Unione europea i termometri clinici a mercurio non sono più in vendita da anni.

Nei **termometri digitali** la proprietà termometrica è elettrica: un piccolo sensore cambia la sua resistenza elettrica, o un'altra grandezza elettrica, al variare della temperatura, e un circuito converte la misura in un numero sul display. I **termometri a infrarossi**, come quelli che si puntano sulla fronte o le termocamere, non toccano il corpo: misurano la radiazione invisibile che ogni corpo emette, tanto più intensa quanto più è caldo. Ne riparleremo nel capitolo 7, studiando l'irraggiamento.

APPROFONDIMENTO

Cento gradi alla rovescia: Fahrenheit e Celsius

Le prime scale termometriche cambiavano da un costruttore all'altro. Daniel Gabriel Fahrenheit (1686–1736), costruttore di strumenti di origine tedesca che lavorava nei Paesi Bassi, realizzò termometri a mercurio di una precisione nuova, che permettevano di confrontare misure prese in luoghi diversi. Nella sua scala, che usava come riferimento più basso una miscela di ghiaccio, acqua e sale, la fusione del ghiaccio cadde a 32 gradi; nella forma definita più tardi, l'ebollizione dell'acqua è a 212 gradi.

L'astronomo svedese Anders Celsius (1701–1744), professore a Uppsala, propose nel 1742 una scala con cento gradi fra i due punti fissi dell'acqua, e mostrò con misure accurate che la temperatura di ebollizione dipende dalla pressione atmosferica. C'è però una sorpresa: nella scala originale di Celsius l'acqua bolliva a 0 e il ghiaccio fondeva a 100. Negli anni successivi la scala fu capovolta, nella forma che usiamo oggi. Per circa due secoli fu chiamata «centigrada»; nel 1948 una conferenza internazionale sui pesi e le misure stabilì il nome di «grado Celsius». Il kelvin porta invece il nome del fisico britannico William Thomson, lord Kelvin, che a metà dell'Ottocento propose una scala «assoluta», indipendente dalle proprietà di una particolare sostanza.

COLLEGAMENTI

Medicina: Santorio e la febbre misurata

Un medico contemporaneo di Galileo, Santorio Santorio (1561–1636), che insegnò a lungo nello Studio di Padova, fu tra i primi a usare uno strumento di misura per studiare il corpo umano: applicò al termoscopio una scala di riferimento e lo usò per confrontare il calore dei suoi pazienti, che stringevano il bulbo in mano o lo tenevano in bocca, osservando di quanto scendeva il livello in un tempo fissato. Descrisse il metodo in un commento alle opere del medico greco Galeno. Misurare invece di affidarsi al tatto del medico: è l'idea di questo paragrafo, anche se per un termometro clinico affidabile servivano i punti fissi e le scale del Settecento.

6.3 La dilatazione lineare

6.3.1 La legge della dilatazione lineare

Quasi tutti i corpi, scaldandosi, aumentano di dimensioni: è la **dilatazione termica**. Il fenomeno ha una spiegazione semplice nel modello particellare della materia: in un solido gli atomi vibrano intorno a posizioni fisse, e più alta è la temperatura più ampie sono le vibrazioni; in media gli atomi si allontanano un poco gli uni dagli altri, e l'intero corpo si allarga.

Nei corpi lunghi e sottili, come una sbarra, un filo o un binario, conta soprattutto l'aumento di lunghezza: si parla di **dilatazione lineare**. Le misure mostrano che, per variazioni di temperatura non troppo grandi, l'allungamento ΔL è direttamente proporzionale sia alla lunghezza iniziale L_0 sia alla variazione di temperatura ΔT (Figura 6.3). Una sbarra lunga il doppio si allunga il doppio, perché ogni suo metro si allunga della stessa quantità; una variazione di temperatura doppia produce un allungamento doppio. In formula:

$$\Delta L = \lambda \, L_0 \, \Delta T$$

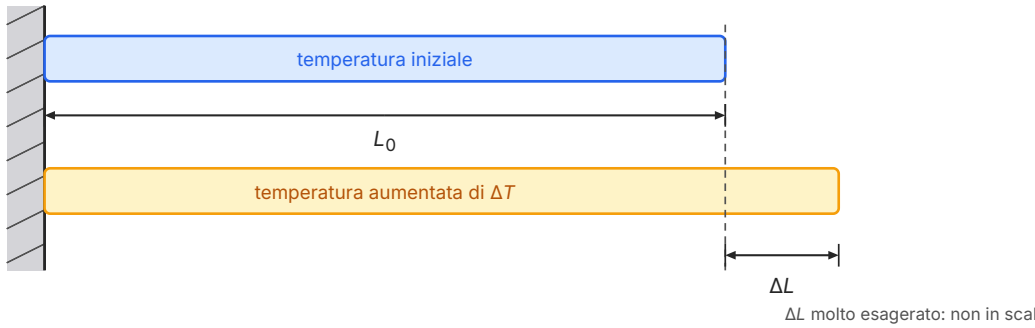


Figura 6.3 Dilatazione lineare di una sbarra fissata a un estremo. Quando la temperatura aumenta di ΔT, la lunghezza passa da L_0 a $L_0 + \Delta L$, con $\Delta L = \lambda L_0 \Delta T$. Nella realtà l'allungamento è piccolissimo: una sbarra di ferro di 1 m scaldata di 50 K si allunga di circa 0,6 mm.

La costante di proporzionalità λ si chiama **coefficiente di dilatazione lineare** e dipende dal materiale. Ricavandola dalla formula, $\lambda = \Delta L/(L_0\,\Delta T)$, si vede il suo significato: è l'allungamento relativo $\Delta L/L_0$ per ogni kelvin di aumento della temperatura. Poiché $\Delta L/L_0$ è un numero puro, λ si misura in $\mathrm{K^{-1}}$ (o, che è lo stesso, in $\mathrm{°C^{-1}}$). Attenzione: molti testi indicano il coefficiente lineare con la lettera α; in questo volume α indicherà il coefficiente di dilatazione volumica.

I valori di λ sono molto piccoli (Tabella 6.1), e per questo si scrivono con la notazione scientifica. Il ferro ha $\lambda \approx 12 \times 10^{-6}\ \mathrm{K^{-1}}$: ogni metro di ferro, per ogni kelvin, si allunga di 12 milionesimi di metro, cioè di 12 µm, molto meno dello spessore di un capello. Sembra niente; ma su un ponte di cento metri, fra l'inverno e l'estate, diventa una questione di centimetri.

Tabella 6.1 Coefficienti di dilatazione lineare di alcuni solidi, a temperatura ambiente (valori indicativi; altri valori nella Tabella A.5 in Appendice).

Materiale	λ ($10^{-6}\ \mathrm{K^{-1}}$)	Allungamento di 1 m per ΔT = 100 K (mm)
alluminio	23	2,3
rame	17	1,7
ferro e acciaio	circa 12	circa 1,2
calcestruzzo	circa 12	circa 1,2
vetro comune	circa 9	circa 0,9
vetro Pyrex	circa 3	circa 0,3

Acciaio e calcestruzzo si dilatano quasi allo stesso modo: per questo nel cemento armato i due materiali non si separano con gli sbalzi di temperatura. La legge, infine, vale finché ΔL è picco-

lo rispetto a L_0, cioè nelle situazioni ordinarie; per salti di temperatura molto grandi λ stesso cambia un poco.

ESEMPIO SVOLTO

Il giunto di un ponte

Problema. Un viadotto stradale ha un'arcata d'acciaio lunga 120 m, misurata a 15 °C. Nella località in cui si trova la temperatura dell'acciaio può scendere a −15 °C d'inverno e salire a 45 °C sotto il sole d'estate. a) Di quanto varia la lunghezza dell'arcata fra l'inverno e l'estate? b) Quanto deve essere largo, a 15 °C, lo spazio libero lasciato fra l'arcata e la spalla del ponte perché d'estate le due strutture non vengano a contatto?

Dati. $L_0 = 120$ m; per l'acciaio $\lambda = 12 \times 10^{-6}\ \mathrm{K^{-1}}$ (Tabella 6.1).

a) Fra −15 °C e 45 °C la variazione di temperatura è $\Delta T = 60$ K. Poiché ΔL è molto piccolo rispetto a L_0, possiamo usare la lunghezza a 15 °C come lunghezza iniziale:

$$\Delta L = \lambda\, L_0\, \Delta T = 12 \times 10^{-6}\ \mathrm{K^{-1}} \cdot 120\ \mathrm{m} \cdot 60\ \mathrm{K} = 0{,}086\ \mathrm{m} \approx 8{,}6\ \mathrm{cm}$$

b) Da 15 °C a 45 °C il salto è di 30 K, la metà: l'arcata si allunga di 4,3 cm. Lo spazio libero a 15 °C deve essere almeno di 4,3 cm; d'inverno si allargherà fino a circa 8,6 cm.

Controllo. $\lambda \Delta T \approx 7 \times 10^{-4}$: l'arcata cambia lunghezza di meno di un millesimo. Ma su 120 m sono più di otto centimetri, abbastanza per spaccare il calcestruzzo se il ponte non potesse muoversi.

6.3.2 Giunti di dilatazione e lamine bimetalliche

Un corpo che si dilata e non può allungarsi liberamente esercita forze enormi su ciò che lo trattiene. Per questo i ponti sono interrotti, a intervalli, da **giunti di dilatazione**: fessure coperte da piastre d'acciaio a pettine, che senti sotto le ruote dell'auto come un colpo regolare. Per la stessa ragione i binari tradizionali erano posati a tratti separati da piccoli spazi (nelle linee moderne le rotaie sono saldate in lunghi tratti e tenute ferme da fissaggi robusti), le tubazioni del vapore hanno curve a U che si flettono quando i tubi si allungano, e i pavimenti sono divisi da giunti di materiale elastico.

Se invece due metalli con coefficienti diversi vengono saldati l'uno sull'altro in una lamina sottile, la dilatazione diventa utile. In una **lamina bimetallica** di ottone e acciaio, per esempio, l'ottone si dilata di più: scaldandosi, la lamina non può allungarsi in modo uniforme e si incurva, con l'ottone all'esterno della curva (Figura 6.4). Raffreddandosi torna diritta; e se la si raffredda sotto la temperatura iniziale si incurva dall'altra parte.

È il principio del **termostato** più semplice, che accende e spegne un apparecchio quando la temperatura supera o scende sotto un valore stabilito: nei ferri da stiro, nei vecchi tostapane, negli scaldabagni. Avvolgendo una lamina bimetallica a spirale si ottiene invece un termome-

tro a lancetta, come quelli dei forni: la spirale si avvolge o si svolge al variare della temperatura e fa ruotare un indice davanti a una scala.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: la dilatazione di un tubo di rame

Materiali. Un tubo di rame da idraulico lungo circa 70 cm; un morsetto da banco; un comparatore centesimale (sensibilità 0,01 mm), strumento a lancetta che misura piccoli spostamenti; un termometro digitale (incertezza ± 0,5 °C); un metro a nastro; acqua a diverse temperature, un imbuto, un tubo di gomma, un secchio.

Procedimento. Fissa il tubo a un estremo con un morsetto; l'altro estremo, libero di scorrere, spinge sul tastatore del comparatore. Misura la distanza fra il morsetto e il tastatore: è la lunghezza L_0 = (600 ± 1) mm che si dilata. Fai scorrere nel tubo acqua sempre più calda e, ogni volta che la lancetta si ferma, leggi la temperatura dell'acqua che esce e l'allungamento ΔL rispetto alla prima misura (Tabella 6.2). Poiché ogni ΔT è la differenza fra due letture di ± 0,5 °C, la sua incertezza è ± 1 K.

Tabella 6.2 Allungamento di un tubo di rame lungo L_0 = 600 mm al variare della temperatura dell'acqua che vi scorre (dati tipici). ΔT è la differenza fra la temperatura di ogni misura e quella della prima.

t (°C) ± 0,5	ΔT (K) ± 1	ΔL (mm) ± 0,01	$\Delta L/\Delta T$ (mm/K)
21,0	0,0	0,00	—
32,0	11,0	0,11	0,0100
43,5	22,5	0,23	0,0102
55,0	34,0	0,34	0,0100
66,5	45,5	0,47	0,0103
78,0	57,0	0,59	0,0104

Che cosa concludere. Riporta ΔL in funzione di ΔT con le barre d'incertezza (Figura 6.5). I punti stanno, entro le incertezze, su una retta che passa per l'origine: l'allungamento è direttamente proporzionale alla variazione di temperatura, come prevede la legge. Dalla pendenza della retta si ricava il coefficiente di dilatazione lineare del rame (Esempio svolto qui sotto).

Sicurezza. L'acqua calda e il tubo possono ustionare: non superare gli 80 °C, maneggia il tubo solo dalla parte fredda e fai scorrere l'acqua che esce nel secchio, lontano dalle prese elettriche.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4: tabella con le incertezze, grafico con le barre d'errore, pendenza con le rette di massima e minima pendenza, λ con la sua incertezza e il confronto con la Tabella 6.1. Discuti le cause d'errore: l'acqua che si raffredda lungo il tubo, il tubo non ancora in equilibrio termico, la dilatazione del supporto.

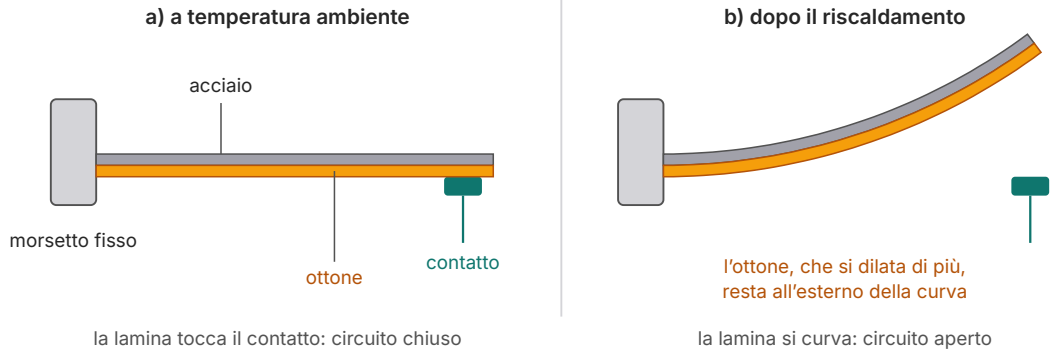


Figura 6.4 Una lamina bimetallica in un termostato. a) A temperatura ambiente la lamina è diritta e tocca il contatto: il circuito della stufa è chiuso e la stufa scalda. b) Quando la temperatura sale, l'ottone si allunga più dell'acciaio e la lamina si incurva verso l'alto, staccandosi dal contatto: il circuito si apre e la stufa si spegne. La curvatura è esagerata.

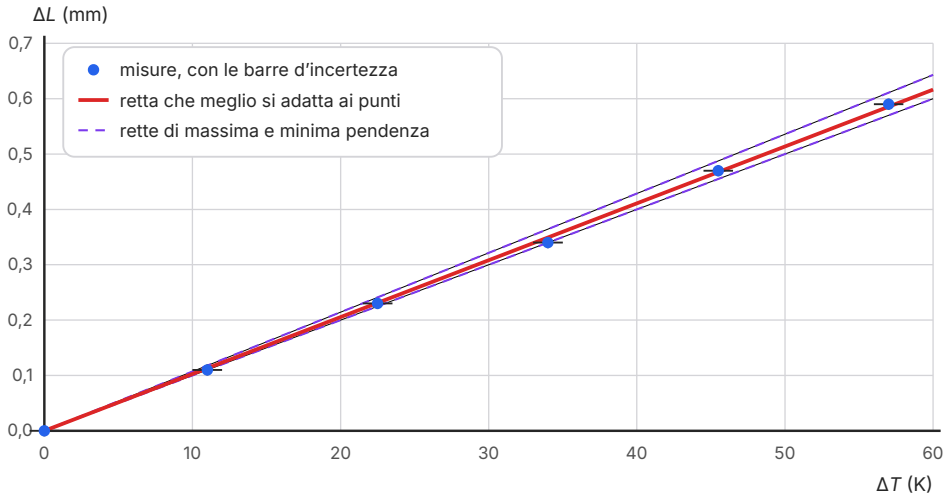


Figura 6.5 Allungamento del tubo di rame in funzione della variazione di temperatura (dati della Tabella 6.2). La retta che meglio si adatta ai punti passa per l'origine con pendenza 0,0103 mm/K; le rette tratteggiate di massima e minima pendenza (0,0107 e 0,0100 mm/K) danno l'incertezza. Dividendo la pendenza per L_0 = 600 mm si ottiene $\lambda \approx 1{,}7 \times 10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1}$.

ESEMPIO SVOLTO

Dal grafico al coefficiente di dilatazione

Problema. Dal grafico della Figura 6.5 ricava il coefficiente di dilatazione lineare del rame con la sua incertezza, e confrontalo con la Tabella 6.1.

La pendenza. La retta che meglio si adatta ai punti passa per l'origine e, per $\Delta T = 50$ K, vale circa $\Delta L = 0{,}515$ mm: la sua pendenza è $m = 0{,}515$ mm/50 K $\approx 0{,}0103$ mm/K. Per l'incertezza tracciamo le rette di massima e minima pendenza compatibili con le barre d'errore; passando per l'origine e per gli estremi della barra dell'ultimo punto ($\Delta T = 57$ K):

$$m_{\max} = \frac{0{,}60\ \text{mm}}{56\ \text{K}} \approx 0{,}0107\ \text{mm/K} \qquad m_{\min} = \frac{0{,}58\ \text{mm}}{58\ \text{K}} = 0{,}0100\ \text{mm/K}$$

La semidifferenza dà l'incertezza: $m = (0{,}0103 \pm 0{,}0004)$ mm/K. **Il coefficiente.** Poiché $\Delta L = (\lambda L_0)\,\Delta T$, la pendenza è λL_0; quindi

$$\lambda = \frac{m}{L_0} = \frac{0{,}0103\ \text{mm/K}}{600\ \text{mm}} \approx 1{,}72 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$$

L'incertezza relativa di λ è la somma di quelle di m (0,0004/0,0103 ≈ 4%) e di L_0 (1/600, meno dello 0,2%): circa il 4%. Il risultato è $\lambda = (1{,}72 \pm 0{,}07) \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$, cioè $(17{,}2 \pm 0{,}7) \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$: compatibile con il valore di riferimento $17 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$.

6.4 La dilatazione superficiale e volumica

6.4.1 Le superfici

Una lastra di metallo, scaldandosi, si allunga in tutte le direzioni del suo piano. Prendiamo una lastra quadrata di lato L_0 e area $A_0 = {L_0}^2$. Dopo un aumento di temperatura ΔT ogni lato misura $L_0(1 + \lambda\Delta T)$, e l'area diventa

$$A = {L_0}^2\,(1 + \lambda\Delta T)^2 = A_0\,(1 + 2\lambda\Delta T + \lambda^2\Delta T^2)$$

Il termine $\lambda^2\Delta T^2$ è trascurabile: se $\lambda\Delta T$ è un millesimo, il suo quadrato è un milionesimo. Resta $\Delta A = A - A_0 \approx 2\lambda\, A_0\, \Delta T$: è la legge della **dilatazione superficiale**, con un coefficiente uguale al *doppio* di quello lineare. Il risultato vale per lastre di qualunque forma, perché ogni figura piana si può pensare formata da tanti piccoli quadrati.

ERRORE FREQUENTE

Il foro si restringe?

Una lastra di metallo ha un foro circolare. Che cosa succede al foro, se la lastra si scalda? Molti rispondono che si restringe, perché il metallo «si allarga verso l'interno». È sbagliato: il foro si *allarga*, esattamente come si allargherebbe il disco di metallo che lo riempiva. La dilatazione è un ingrandimento uniforme, come quello di una fotografia: tutte le distanze fra i punti della lastra crescono nella stessa proporzione, compreso il diametro del foro.

È per questo che, per svitare un coperchio metallico bloccato su un barattolo di vetro, lo si mette sotto l'acqua calda: il coperchio, che ha un coefficiente di dilatazione maggiore del vetro, si allarga più dell'imboccatura. E per montare un anello d'acciaio su un albero un poco più grosso del foro, lo si scalda: il foro si allarga, l'anello si infila, e raffreddandosi stringe l'albero con grande forza.

6.4.2 I volumi dei solidi

Un solido si dilata in tutte e tre le dimensioni. Con lo stesso ragionamento applicato a un cubo di spigolo L_0, il volume diventa $V_0(1 + \lambda\Delta T)^3$; trascurando i termini con λ^2 e λ^3, piccolissimi, si ottiene la legge della **dilatazione volumica**:

$$\Delta V = \alpha\, V_0\, \Delta T \qquad \text{con } \alpha \approx 3\lambda \text{ per i solidi}$$

La costante α è il **coefficiente di dilatazione volumica**, anch'esso in $\mathrm{K^{-1}}$. La relazione $\alpha \approx 3\lambda$ vale per i solidi *isotropi*, che si dilatano allo stesso modo in tutte le direzioni, come i metalli e il vetro (non il legno, che si comporta diversamente lungo le fibre e di traverso). Per l'alluminio, $\alpha \approx 3 \cdot 23 \times 10^{-6}\ \mathrm{K^{-1}} \approx 69 \times 10^{-6}\ \mathrm{K^{-1}}$: un blocco di 1 $\mathrm{dm^3}$, cioè 1000 $\mathrm{cm^3}$, scaldato di 100 K aumenta di volume di circa 7 $\mathrm{cm^3}$.

Le dilatazioni diverse di parti diverse dello stesso corpo spiegano perché un bicchiere di vetro spesso può incrinarsi se ci si versa dentro acqua bollente. Il vetro conduce male il calore: la superficie interna si scalda e si dilata subito, mentre quella esterna è ancora fredda. Le due parti tirano in direzioni opposte e il vetro, che è fragile, si spacca. I recipienti da forno sono di vetro borosilicato, come il Pyrex, che si dilata circa tre volte meno del vetro comune.

6.4.3 I liquidi e la dilatazione apparente

Un liquido non ha una forma propria, e di lui ha senso solo la dilatazione volumica. I liquidi si dilatano molto più dei solidi: per l'acqua intorno a 20 °C $\alpha \approx 2{,}1 \times 10^{-4}\ \mathrm{K^{-1}}$, per l'alcol etilico $\alpha \approx 1{,}1 \times 10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}$, per il mercurio $\alpha \approx 1{,}8 \times 10^{-4}\ \mathrm{K^{-1}}$ (Appendice, nota alla Tabella A.5), contro i circa $3{,}6 \times 10^{-5}\ \mathrm{K^{-1}}$ del ferro (3λ).

Quando si scalda un liquido, però, si scalda anche il recipiente, che a sua volta si dilata e aumenta la sua capacità. Ciò che si osserva, per esempio il livello che sale nel capillare di un ter-

mometro, è la differenza fra le due dilatazioni: la **dilatazione apparente** del liquido, con un coefficiente uguale, con buona approssimazione, alla differenza fra quello del liquido e quello del recipiente. Il termometro a liquido funziona proprio perché il liquido si dilata molto più del vetro. Per lo stesso motivo una tanica piena fino all'orlo e lasciata al sole trabocca.

6.5 Il comportamento anomalo dell'acqua

Esiste una sostanza molto comune che, in un piccolo intervallo di temperature, si comporta al contrario di quasi tutte le altre: l'acqua. Raffreddando l'acqua liquida, il suo volume diminuisce, come ci si aspetta, fino a circa 4 °C; ma se si continua a raffreddarla fra 4 °C e 0 °C l'acqua *aumenta* di volume. Poiché la massa non cambia, la densità dell'acqua liquida è massima a 3,98 °C, cioè quasi esattamente a 4 °C (Figura 6.6). È il **comportamento anomalo dell'acqua**.

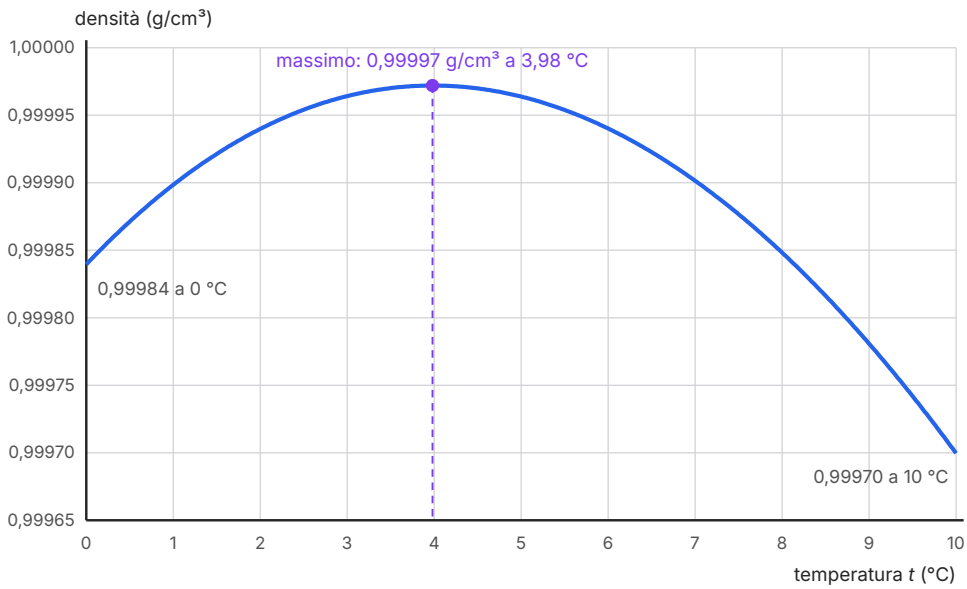


Figura 6.6 Densità dell'acqua liquida fra 0 °C e 10 °C alla pressione di 1 atm, calcolata con la formula empirica di Kell, che riproduce le misure di laboratorio. Il massimo è a 3,98 °C. Osserva la scala verticale: le variazioni riguardano la quarta e la quinta cifra decimale, e la densità dell'acqua a 0 °C è circa uguale a quella a 8 °C.

DA RICORDARE

Dal volume del terzo anno: densità e galleggiamento

La densità di un corpo è il rapporto fra la sua massa e il suo volume, $d = m/V$, e si misura in kg/m^3 o in g/cm^3 (Fisica 3, capitolo 2). Un corpo immerso in un liquido galleggia se la sua densità è minore di quella del liquido; all'equilibrio la frazione immersa del suo volume è uguale al rapporto fra la sua densità e quella del liquido (Fisica 3, capitolo 9). Se un corpo si dilata, la sua massa resta la stessa e la sua densità diminuisce.

L'anomalia continua, e diventa molto più grande, quando l'acqua gela. Il ghiaccio ha una densità di 917 kg/m^3, contro i circa 1000 kg/m^3 dell'acqua liquida: solidificando, l'acqua aumenta di volume di circa il 9%. Quasi tutte le altre sostanze, invece, si contraggono solidificando, e il solido affonda nel proprio liquido: un pezzo di cera solida va a fondo nella cera fusa. La ragione è nella struttura del ghiaccio, un reticolo regolare di molecole pieno di spazi vuoti; nell'acqua liquida vicino a 0 °C sopravvivono piccoli gruppi ordinati in modo simile, che si disfano quando la temperatura sale.

Le conseguenze sono importanti. Un lago, d'inverno, si raffredda dalla superficie, a contatto con l'aria fredda. Finché l'acqua è sopra i 4 °C, quella superficiale raffreddata diventa più densa e scende, sostituita da acqua più calda: il lago si rimescola e si raffredda tutto. Ma quando l'intero lago è arrivato a 4 °C, l'acqua della superficie che si raffredda ancora diventa *meno* densa e resta in alto, finché gela. Il ghiaccio galleggia e forma uno strato che isola l'acqua sottostante dall'aria gelida; sul fondo resta acqua liquida intorno a 4 °C (Figura 6.7).

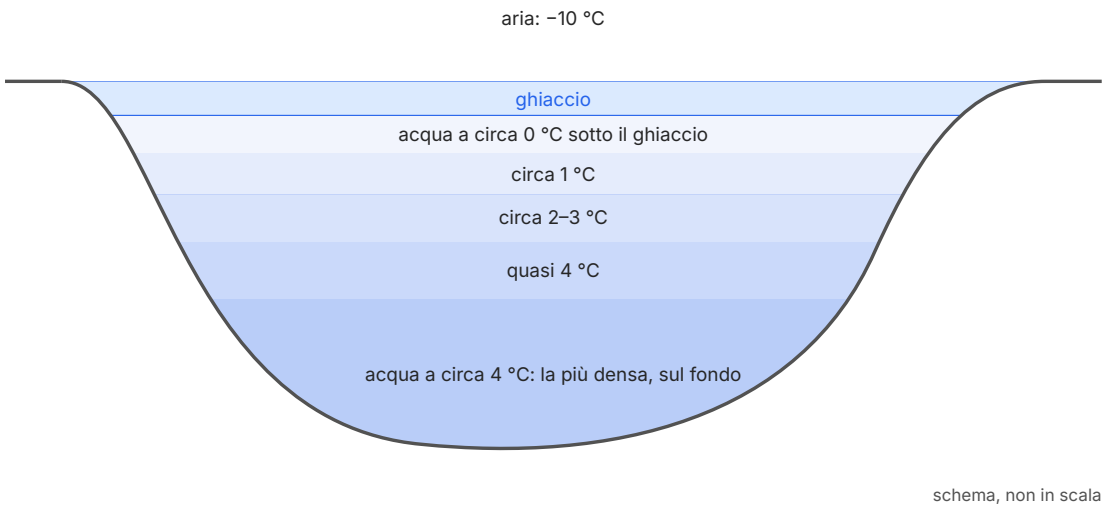


Figura 6.7 Un lago d'inverno. Sotto lo strato di ghiaccio, a 0 °C nella sua parte inferiore, l'acqua si dispone in strati: la più fredda, meno densa, in alto; quella a circa 4 °C, la più densa, sul fondo. Il ghiaccio galleggia e isola l'acqua dall'aria. Schema, non in scala; le temperature degli strati sono indicative.

COLLEGAMENTI

Scienze naturali: la vita sotto il ghiaccio e le rocce spaccate

Se l'acqua si comportasse come gli altri liquidi, l'acqua più fredda andrebbe a fondo e i laghi delle regioni fredde potrebbero gelare dal fondo verso l'alto. Grazie al comportamento anomalo, invece, pesci, piante e piccoli animali d'acqua dolce passano l'inverno nell'acqua liquida del fondo, protetti dal ghiaccio che galleggia sopra di loro.

L'aumento di volume nel congelamento ha anche effetti distruttivi. L'acqua che gela nelle fessure delle rocce le allarga, e dopo molti cicli di gelo e disgelo le frantuma: è uno dei processi di erosione che si studiano in scienze, importante in montagna. Per la stessa ragione d'inverno le tubature esposte al gelo possono scoppiare, e una bottiglia d'acqua dimenticata nel congelatore si rompe.

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Scala Kelvin: $T = t + 273{,}15$, con T in kelvin (K) e t in gradi Celsius (°C). Lo zero assoluto è 0 K = −273,15 °C; le differenze di temperatura sono uguali nelle due scale: ΔT (K) = Δt (°C). Fahrenheit: $t_F = (9/5)\, t + 32$.

Dilatazione lineare: $\Delta L = \lambda\, L_0\, \Delta T$: l'allungamento è proporzionale alla lunghezza iniziale e alla variazione di temperatura; λ, in K^{-1}, è l'allungamento relativo per kelvin e dipende dal materiale.

Dilatazione superficiale: $\Delta A = 2\lambda\, A_0\, \Delta T$; un foro si dilata come il materiale che lo riempiva.

Dilatazione volumica: $\Delta V = \alpha\, V_0\, \Delta T$, con α in K^{-1}; per un solido isotropo $\alpha \approx 3\lambda$. In un recipiente si osserva la dilatazione apparente del liquido, con coefficiente $\alpha_{\text{liquido}} - \alpha_{\text{recipiente}}$.

Acqua: la densità dell'acqua liquida è massima a 3,98 °C; gelando l'acqua aumenta di volume di circa il 9% (ghiaccio: 917 kg/m^3).

SINTESI

- La sensazione di caldo e di freddo è relativa; la temperatura è la grandezza fisica, uguale per tutti, che la sostituisce.
- Due corpi a contatto raggiungono l'equilibrio termico, in cui hanno la stessa temperatura.
- Principio zero: se A e B sono ciascuno in equilibrio termico con C, lo sono fra loro. Per questo un termometro, che misura la propria temperatura, dà quella del corpo quando è in equilibrio con esso.
- Un termometro sfrutta una proprietà termometrica e si tara con due punti fissi. Il termoscopio di Galileo (intorno al 1600) mostrava le variazioni di temperatura senza misurarle.
- Scala Celsius: 0 °C e 100 °C per la fusione del ghiaccio e l'ebollizione dell'acqua a 1 atm; scala Fahrenheit: 32 °F e 212 °F, $t_F = (9/5)t + 32$.
- Lo zero assoluto, −273,15 °C, è la temperatura più bassa possibile; $T = t + 273{,}15$, e una differenza di 1 K è uguale a una di 1 °C.
- Dilatazione lineare: $\Delta L = \lambda L_0 \Delta T$, con λ dell'ordine di 10^{-5} K^{-1} per i metalli; giunti di dilatazione e lamine bimetalliche nascono da questa legge.
- Dilatazione superficiale: $\Delta A = 2\lambda A_0 \Delta T$ (un foro si allarga); volumica: $\Delta V = \alpha V_0 \Delta T$, con $\alpha \approx 3\lambda$ per i solidi isotropi.
- I liquidi si dilatano molto più dei solidi; in un recipiente si osserva la dilatazione apparente.
- L'acqua ha la densità massima a 3,98 °C e gelando aumenta di volume di circa il 9%: il ghiaccio galleggia e i laghi gelano dalla superficie.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Due corpi sono in equilibrio termico quando:
   A. hanno la stessa massa
   B. hanno la stessa temperatura
   C. contengono la stessa quantità di calore
   D. sono fatti dello stesso materiale

2. ● Il principio zero della termodinamica afferma che:
   A. se A e B sono ciascuno in equilibrio termico con C, allora A e B sono in equilibrio termico fra loro
   B. la temperatura non può scendere sotto lo zero
   C. il ghiaccio fonde a 0 °C
   D. due corpi a contatto hanno sempre la stessa temperatura, fin dal primo istante

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

4. ● Una variazione di temperatura di 15 °C corrisponde a una variazione di:
   A. 288,15 K
   B. 258,15 K
   C. 27 K
   D. 15 K

5. ● Il coefficiente di dilatazione lineare si misura in:
   A. m/K
   B. K^{-1}
   C. m·K
   D. K

6. ●● Una sbarra di ferro e una di alluminio hanno la stessa lunghezza e vengono scaldate dalla stessa temperatura iniziale alla stessa temperatura finale. La sbarra di alluminio si allunga (Tabella 6.1):
   A. circa la metà di quella di ferro
   B. quanto quella di ferro
   C. circa il doppio di quella di ferro
   D. circa dieci volte più di quella di ferro

7. ●● Una lastra di metallo ha un foro circolare. Se la lastra viene scaldata, il diametro del foro:
   A. diminuisce, perché il metallo si dilata verso l'interno
   B. resta uguale
   C. aumenta solo se il foro è al centro della lastra
   D. aumenta, come se la lastra fosse ingrandita in fotografia

8. ●● Secondo la Figura 6.6, se si raffredda un litro d'acqua da 8 °C a 0 °C il suo volume:
   A. prima diminuisce, poi aumenta, e alla fine è circa uguale a quello iniziale
   B. diminuisce sempre
   C. aumenta sempre
   D. resta costante, perché l'acqua è incomprimibile

Vero o falso

9. ● Il termoscopio di Galileo aveva una scala con due punti fissi, come i termometri moderni. V / F

10. ● Un termometro misura la propria temperatura, che è uguale a quella del corpo soltanto quando i due hanno raggiunto l'equilibrio termico. V / F

11. ● Esiste in natura una temperatura di −300 °C. V / F

12. ●● Per un solido isotropo il coefficiente di dilatazione volumica è circa il triplo di quello lineare. V / F

13. ●● Fra 0 °C e 4 °C l'acqua liquida, scaldandosi, diminuisce di volume. V / F

Applicare

14. ● Esprimi in kelvin le temperature: a) 25 °C; b) −196 °C (l'azoto liquido); c) 1064 °C (la fusione dell'oro).

15. ● Una ricetta americana dice di cuocere una torta a 350 °F. A quanti gradi Celsius va regolato il forno? E a quanti gradi Fahrenheit corrisponde una temperatura ambiente di 20 °C?

16. ● Una rotaia d'acciaio è lunga 25,0 m a 10 °C. Di quanto si allunga quando la sua temperatura sale a 40 °C?

17. ●● Completa. Un'asta d'alluminio lunga 2,00 m si allunga di 1,38 mm quando la sua temperatura aumenta di _____ K. Un'asta dello stesso materiale lunga 4,00 m, nelle stesse condizioni, si allungherebbe di _____ mm.

18. ●● Nella Figura 6.5 leggi sulla retta continua l'allungamento del tubo di rame per $\Delta T = 40$ K, e ricava da questa lettura il coefficiente λ del rame ($L_0 = 600$ mm).

19. ●● Una piastra quadrata d'alluminio ha il lato di 20,0 cm. Di quanto aumenta la sua area se viene scaldata di 100 K?

20. ●● Una bottiglia contiene 1,00 L di alcol etilico a 10 °C. Di quanto aumenta il volume dell'alcol se la sua temperatura sale a 30 °C? Trascura la dilatazione della bottiglia.

Problemi

21. ●● Un ponte d'acciaio è lungo 80,0 m a 15 °C; nel corso dell'anno la temperatura dell'acciaio varia fra −10 °C e 40 °C. a) Di quanto varia la lunghezza del ponte fra la temperatura minima e la massima? b) Quanto deve essere largo, a 15 °C, il giunto di dilatazione all'estremità del ponte perché a 40 °C si chiuda appena? c) Quanto sarà largo a −10 °C?

22. ●●● Un termometro a mercurio ha un bulbo di vetro comune con un volume interno di 200 mm^3, e un capillare con una sezione di 0,0100 mm^2. a) Di quanto aumenta il volume del mercurio per ogni kelvin di aumento della temperatura? b) Di quanto aumenta la capacità del bulbo? (Per il vetro comune $\alpha \approx 3\lambda$.) c) Di quanti millimetri sale la colonna per ogni grado? Trascura la dilatazione del capillare.

23. ●●● (Con Fisica 3, capitolo 2.) Un cubo d'alluminio ha lo spigolo di 10,0 cm a 20 °C, dove la sua densità è $2{,}70 \times 10^3$ kg/m^3. Viene scaldato fino a 220 °C. a) Calcola la sua massa. b) Calcola l'aumento del suo volume con la legge della dilatazione volumica. c) Calcola la sua densità a 220 °C. d) Di quanto per cento è diminuita la densità?

24. ●●● Una tanica d'acciaio da 20,0 L è riempita fino all'orlo di benzina a 15 °C e lasciata al sole, dove si scalda fino a 35 °C. Quanta benzina trabocca? Per la benzina usa $\alpha \approx 9{,}5 \times 10^{-4}$ K^{-1} (valore indicativo).

25. ●● (Con Fisica 3, capitolo 9.) a) Quale volume occupa 1,00 kg di ghiaccio? Quale volume occupava come acqua liquida (densità 1000 kg/m^3)? b) Che frazione del suo volume resta immersa quando un cubetto di ghiaccio galleggia in acqua dolce? c) Spiega perché una bottiglia di vetro piena d'acqua, chiusa e lasciata nel congelatore, si rompe.

26. ●●● Un anello d'acciaio ha un foro di diametro 4,990 cm a 20 °C e deve essere montato su un albero d'acciaio di diametro 5,000 cm. a) Fino a quale temperatura bisogna scaldare l'anello perché il foro arrivi a 5,000 cm? b) Perché, una volta raffreddato, l'anello resta fissato saldamente sull'albero?

Ragionare e argomentare

27. ●● Spiega perché un bicchiere di vetro comune, spesso, può incrinarsi se vi si versa acqua bollente, mentre una caraffa di vetro Pyrex resiste.

28. ●● Trova l'errore. Uno studente scrive: «Ieri c'erano 10 °C, oggi 20 °C: la temperatura è raddoppiata, quindi oggi l'aria è due volte più calda». Individua l'errore e spiega che cosa significa davvero il passaggio da 10 °C a 20 °C.

29. ●● Progetta un esperimento. Hai una boccetta di vetro, una cannuccia trasparente sottile, plastilina, acqua colorata, un righello, un bicchiere di ghiaccio tritato con acqua e un bollitore. Descrivi come costruire e tarare un termometro, quali punti fissi useresti, come segneresti i gradi intermedi e quali limiti avrebbe il tuo strumento.

30. ●●● Commenta la fonte. Nel *Saggiatore* (1623, §48) Galileo scrive, a proposito del calore che sentiamo vicino al fuoco: «stimo che questo sia talmente nostro, che, rimosso il corpo animato e sensitivo, il calore non resti altro che un semplice vocabolo». a) Che cosa afferma Galileo? b) Quale esperimento di questo capitolo mostra che la sensazione termica dipende da chi la prova? c) Galileo ha ragione se per «calore» si intende la sensazione; come risponderebbe un fisico di oggi che parla di temperatura? d) Quale strumento costruito da Galileo stesso andava nella direzione di una misura indipendente dai sensi?

PER APPROFONDIRE

- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: le pagine sul calore distinguono con esempi quotidiani la temperatura dalla quantità di calore, la distinzione su cui si costruisce il prossimo capitolo.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulla temperatura presenta il principio zero, le scale termometriche e la dilatazione termica, con molti esempi tecnici.

Glossario del capitolo

Coefficiente di dilatazione lineare
$\lambda = \Delta L/(L_0 \Delta T)$: allungamento relativo per kelvin; si misura in K^{-1}.

Coefficiente di dilatazione volumica
$\alpha = \Delta V/(V_0 \Delta T)$, in K^{-1}; per un solido isotropo $\alpha \approx 3\lambda$.

Comportamento anomalo dell'acqua
L'acqua liquida ha densità massima a 3,98 °C e aumenta di volume gelando.

Dilatazione apparente
Aumento di volume di un liquido osservato in un recipiente, che si dilata anch'esso.

Dilatazione superficiale
Aumento dell'area di una lastra: $\Delta A = 2\lambda A_0 \Delta T$.

Dilatazione termica
Aumento delle dimensioni di un corpo al crescere della temperatura.

Equilibrio termico
Stato di due corpi a contatto le cui proprietà macroscopiche non cambiano più; i corpi hanno la stessa temperatura.

Giunto di dilatazione
Interruzione in una struttura (ponte, binario, pavimento) che le permette di dilatarsi senza danni.

Lamina bimetallica
Lamina di due metalli saldati con coefficienti di dilatazione diversi, che si incurva al variare della temperatura.

Principio zero della termodinamica
Se due corpi sono ciascuno in equilibrio termico con un terzo, sono in equilibrio termico fra loro: rende possibile il termometro.

Proprietà termometrica
Grandezza misurabile che varia in modo regolare con la temperatura (lunghezza di una colonna di liquido, resistenza elettrica...).

Punti fissi
Temperature di riferimento riproducibili usate per tarare un termometro: fusione del ghiaccio ed ebollizione dell'acqua a 1 atm.

Scala Celsius
Scala con 0 °C alla fusione del ghiaccio e 100 °C all'ebollizione dell'acqua a 1 atm.

Scala Fahrenheit
Scala con 32 °F alla fusione del ghiaccio e 212 °F all'ebollizione dell'acqua: $t_F = (9/5)t + 32$.

Scala Kelvin
Scala assoluta con lo zero allo zero assoluto e gradi ampi come quelli Celsius: $T = t + 273{,}15$.

Temperatura
Grandezza fisica che ha lo stesso valore per due corpi in equilibrio termico; si misura con il termometro, in °C o in K.

Termometro
Strumento che misura la temperatura sfruttando una proprietà termometrica, tarato con due punti fissi.

Termoscopio
Strumento attribuito a Galileo (intorno al 1600) che mostra le variazioni di temperatura con la dilatazione dell'aria, senza scala.

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

Soluzioni

1. B. All'equilibrio termico i due corpi hanno la stessa temperatura, qualunque siano massa e materiale. Un corpo non «contiene calore» (lo vedrai nel capitolo 7).

2. A. È la proprietà transitiva dell'equilibrio termico. La D è falsa: per arrivare all'equilibrio serve tempo.

3. C. $t = T - 273{,}15 = 300 - 273{,}15 = 26{,}85$ °C.

4. D. Kelvin e gradi Celsius hanno la stessa ampiezza: $\Delta T = \Delta t = 15$ K.

5. B. $\lambda = \Delta L/(L_0 \Delta T)$: metri diviso metri per kelvin, cioè K^{-1}.

6. C. ΔL è proporzionale a λ: 23/12 ≈ 1,9, circa il doppio.

7. D. La dilatazione è un ingrandimento uniforme: tutte le distanze crescono nella stessa proporzione, compreso il diametro del foro.

8. A. Da 8 °C a 3,98 °C la densità aumenta (il volume diminuisce), da 3,98 °C a 0 °C diminuisce (il volume aumenta); a 0 °C la densità, 0,99984 g/cm^3, è circa quella a 8 °C (0,99985 g/cm^3).

9. F. Il termoscopio non aveva scala né punti fissi, e risentiva della pressione atmosferica: mostrava le variazioni di temperatura senza misurarle.

10. V. Il termometro, per il principio zero, segna la temperatura del corpo solo quando è in equilibrio termico con esso.

11. F. −300 °C sarebbe circa −27 K, sotto lo zero assoluto (−273,15 °C), che è la temperatura più bassa possibile.

12. V. Per un cubo il volume diventa $V_0(1 + \lambda \Delta T)^3 \approx V_0(1 + 3\lambda \Delta T)$: $\alpha \approx 3\lambda$.

13. V. È il comportamento anomalo dell'acqua: fra 0 °C e 3,98 °C la densità aumenta con la temperatura, quindi il volume diminuisce.

14. $T = t + 273{,}15$. a) 298,15 K ≈ 298 K; b) 77,15 K ≈ 77 K; c) 1337,15 K ≈ 1337 K.

15. $t = (5/9)(350 - 32)$ °C $= (5/9) \cdot 318$ °C ≈ 177 °C (il forno si regola su circa 180 °C). $t_F = (9/5) \cdot 20 + 32 = 68$ °F.

16. $\Delta L = \lambda L_0 \Delta T = 12 \times 10^{-6}\ K^{-1} \cdot 25{,}0\ m \cdot 30\ K = 9{,}0 \times 10^{-3}\ m = 9{,}0$ mm.

17. $\Delta T = \Delta L/(\lambda L_0) = 1{,}38 \times 10^{-3}\ m/(23 \times 10^{-6}\ K^{-1} \cdot 2{,}00\ m) = 30$ K; con lunghezza doppia l'allungamento raddoppia: 2,76 mm.

18. Sulla retta, per $\Delta T = 40$ K, $\Delta L \approx 0{,}41$ mm (lettura accettabile 0,40–0,42 mm). $\lambda = \Delta L/(L_0 \Delta T) = 0{,}41\ mm/(600\ mm \cdot 40\ K) \approx 1{,}7 \times 10^{-5}\ K^{-1}$.

19. $A_0 = (20{,}0\ cm)^2 = 400\ cm^2$; $\Delta A = 2\lambda A_0 \Delta T = 2 \cdot 23 \times 10^{-6}\ K^{-1} \cdot 400\ cm^2 \cdot 100\ K \approx 1{,}84\ cm^2$.

20. $\Delta V = \alpha V_0 \Delta T = 1{,}1 \times 10^{-3}\ K^{-1} \cdot 1{,}00\ L \cdot 20\ K = 0{,}022\ L = 22$ mL.

21. $\lambda = 12 \times 10^{-6}\ K^{-1}$. a) $\Delta T = 50$ K: $\Delta L = 12 \times 10^{-6}\ K^{-1} \cdot 80{,}0\ m \cdot 50\ K = 0{,}048\ m = 4{,}8$ cm. b) Da 15 °C a 40 °C, $\Delta T = 25$ K: $\Delta L = 0{,}024$ m; il giunto a 15 °C deve essere largo 2,4 cm. c) Da 15 °C a −10 °C il ponte si accorcia di altri 2,4 cm: il giunto è largo 4,8 cm.

22. a) $\Delta V_{Hg} = \alpha V_0 \Delta T = 1{,}8 \times 10^{-4}\ K^{-1} \cdot 200\ mm^3 \cdot 1\ K = 0{,}036\ mm^3$. b) $\alpha_{vetro} \approx 3 \cdot 9 \times 10^{-6}\ K^{-1} = 2{,}7 \times 10^{-5}\ K^{-1}$; $\Delta V_{bulbo} = 2{,}7 \times 10^{-5}\ K^{-1} \cdot 200\ mm^3 \cdot 1\ K \approx 0{,}0054\ mm^3$. c) Nel capillare entra la differenza, 0,036 − 0,0054 ≈ 0,0306 mm^3: $h = 0{,}0306\ mm^3/0{,}0100\ mm^2 \approx 3{,}1$ mm per grado.

23. a) $V_0 = (0{,}100\ m)^3 = 1{,}00 \times 10^{-3}\ m^3$; $m = d\ V_0 = 2{,}70 \times 10^3\ kg/m^3 \cdot 1{,}00 \times 10^{-3}\ m^3 = 2{,}70$ kg. b) $\alpha \approx 3\lambda = 69 \times 10^{-6}\ K^{-1}$; $\Delta V = 69 \times 10^{-6}\ K^{-1} \cdot 1000\ cm^3 \cdot 200\ K \approx 13{,}8\ cm^3$. c) $V = 1013{,}8\ cm^3$; la massa non cambia: $d = 2700\ g/1013{,}8\ cm^3 \approx 2{,}663\ g/cm^3 \approx 2{,}66 \times 10^3\ kg/m^3$. d) (2700 − 2663)/2700 ≈ 1,4%: la densità diminuisce dell'1,4% circa.

24. Benzina: $\Delta V = 9{,}5 \times 10^{-4}\ K^{-1} \cdot 20{,}0\ L \cdot 20\ K = 0{,}380$ L. Tanica: $\alpha \approx 3 \cdot 12 \times 10^{-6}\ K^{-1} = 3{,}6 \times 10^{-5}\ K^{-1}$; $\Delta V = 3{,}6$

$\times 10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1}$; $\Delta V = 3{,}6 \times 10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1} \cdot 20{,}0\ \mathrm{L} \cdot 20\ \mathrm{K} \approx 0{,}0144\ \mathrm{L}$. Trabocca la differenza: 0,380 L − 0,014 L ≈ 0,37 L.

25. a) $V_{\text{ghiaccio}} = m/d = 1{,}00\ \mathrm{kg}/(917\ \mathrm{kg/m^3}) \approx 1{,}09 \times 10^{-3}\ \mathrm{m^3} = 1{,}09\ \mathrm{L}$; come acqua: 1,00 L. b) Frazione immersa = $d_{\text{ghiaccio}}/d_{\text{acqua}} = 917/1000 \approx 0{,}917$, cioè circa il 92%. c) Gelando l'acqua aumenta di volume di circa il 9%; la bottiglia chiusa, di vetro rigido, non può aumentare la sua capacità altrettanto e il ghiaccio la spacca.

26. a) Il foro si dilata come un disco d'acciaio: $\Delta D = \lambda D_0 \Delta T$, quindi $\Delta T = 0{,}010\ \mathrm{cm}/(12 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1} \cdot 4{,}990\ \mathrm{cm}) \approx 167\ \mathrm{K}$, e $t \approx 20\ ^\circ\mathrm{C} + 167\ ^\circ\mathrm{C} \approx 187\ ^\circ\mathrm{C}$ (in pratica lo si scalda un po' di più, circa 200 °C, per infilarlo comodamente). b) Raffreddandosi l'anello tenderebbe a tornare a 4,990 cm, ma l'albero glielo impedisce: anello e albero si premono con forze molto grandi.

27. Traccia di risposta. Il vetro conduce male il calore: la superficie interna si scalda e si dilata subito, quella esterna resta fredda; le due parti si deformano in modo diverso e il vetro, fragile, si rompe. Il Pyrex ha un coefficiente di dilatazione circa tre volte minore ($\lambda \approx 3 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$ contro $9 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$): a parità di differenza di temperatura le deformazioni, e quindi le forze interne, sono circa tre volte minori.

28. L'errore è usare come se fosse assoluta una scala con lo zero scelto per comodità. In kelvin le due temperature sono 283 K e 293 K: la temperatura assoluta è aumentata di circa il 3,5%, non raddoppiata. Ha senso dire che la temperatura è aumentata di 10 °C (cioè di 10 K); non ha senso dire «due volte più caldo» in gradi Celsius (a −5 °C e 5 °C si otterrebbe un assurdo «meno una volta»).

29. Traccia di risposta. Riempi completamente la boccetta di acqua colorata, infila la cannuccia attraverso un tappo di plastilina e sigilla bene, in modo che il liquido salga un poco nella cannuccia. Immergi la boccetta nel ghiaccio tritato con acqua, aspetta l'equilibrio termico (il livello smette di muoversi) e segna il livello: 0 °C. Poi immergila nell'acqua del bollitore che bolle, aspetta di nuovo e segna il secondo livello: 100 °C, se la pressione è vicina a 1 atm (attenzione alle ustioni: usa una pinza). Dividi la distanza fra i due segni in 10 parti uguali con il righello: ogni parte vale 10 °C. Limiti: l'acqua si dilata poco, quindi la cannuccia deve essere sottile; fra 0 °C e 4 °C l'acqua si contrae invece di dilatarsi (comportamento anomalo, Figura 6.6): il livello segnato nel ghiaccio fondente si ripresenta intorno a 8 °C, quindi fra 0 °C e circa 8 °C una stessa lettura corrisponde a due temperature diverse e lo strumento è inutilizzabile; la dilatazione dell'acqua non è proporzionale alla temperatura, e la scala a parti uguali è solo approssimata; anche la boccetta si dilata; lo strumento è grande e lento, e altera la temperatura dei corpi piccoli.

30. Traccia di risposta. a) Galileo afferma che la sensazione di calore non è una qualità che sta nel fuoco, ma un effetto prodotto in noi: tolto il corpo che sente, il «calore» resterebbe solo un nome. Nello stesso passo collega il calore al moto delle particelle del fuoco. b) L'esperimento delle tre bacinelle: la stessa acqua sembra calda a una mano e fredda all'altra. c) Galileo ha ragione sulla sensazione, che è soggettiva; ma la temperatura è una grandezza oggettiva, che si misura con un termometro tarato e ha lo stesso valore per tutti: lo garantisce il principio zero. Oggi si distingue poi la temperatura dal calore, energia in transito (capitolo 7), e il legame fra calore e moto delle particelle si è rivelato giusto (capitolo 9). d) Il termoscopio, che mostrava le variazioni di temperatura senza ricorrere al tatto.