CAPITOLO

7

Il calore e l'equilibrio termico

Un corpo non possiede calore: lo riceve e lo cede. Ciò che possiede è energia, e il calore è uno dei modi in cui la scambia.

OBIETTIVI

1. Definire il calore come energia in transito e distinguerlo dalla temperatura e dall'energia interna.
2. Ripercorrere il passaggio dalla teoria del calorico all'equivalente meccanico della caloria, con Rumford e Joule.
3. Usare la capacità termica e il calore specifico per calcolare il calore scambiato: $Q = m\,c\,\Delta T$.
4. Calcolare la temperatura di equilibrio di due corpi e misurare un calore specifico con il calorimetro delle mescolanze.
5. Riconoscere conduzione, convezione e irraggiamento e calcolare con la legge di Fourier il calore che attraversa una parete.

INDICE DEL CAPITOLO

7.1 Il calore, energia in transito 2
7.2 Dal calorico all'equivalente meccanico 3
7.3 Capacità termica e calore specifico 6
7.4 L'equilibrio termico e la calorimetria 9
7.5 La propagazione del calore 14

Fisica 4 · Parte III · Temperatura e calore · versione 1.0
Capitolo 7: Il calore e l'equilibrio termico · pagine 185–208 del volume completo · estratto per lo studio

Appoggia le mani a una tazza di tè appena versato: in pochi secondi le senti scaldarsi, mentre il tè, lentamente, si raffredda. Lascia la tazza sul tavolo e dopo mezz'ora il tè ha la temperatura della stanza: non scende più. Qualcosa è passato dal tè alle tue mani, alla tazza e all'aria, e ha smesso di passare quando le temperature sono diventate uguali. Per secoli quel «qualcosa» è stato immaginato come una sostanza sottile, che i corpi caldi possiedono in abbondanza e cedono ai corpi freddi.

In questo capitolo scoprirai che non è una sostanza, ma energia. Imparerai a calcolare quanta ne serve per scaldare un corpo, a prevedere la temperatura finale di due corpi a contatto e a riconoscere le tre vie per cui il calore si propaga, perfino attraverso il vuoto.

7.1 Il calore, energia in transito

7.1.1 Che cosa passa da un corpo all'altro

Nel capitolo 6 hai visto che due corpi a temperature diverse, messi a contatto, raggiungono dopo un certo tempo la stessa temperatura: l'equilibrio termico. Il corpo più caldo si raffredda, quello più freddo si scalda. Che cosa è passato dall'uno all'altro? Non materia: una sbarra di ferro rovente immersa in un secchio d'acqua non perde massa, e l'acqua non ne guadagna. È passata energia.

Chiamiamo **calore** l'energia che passa da un corpo a un altro *a causa di una differenza di temperatura*. Il passaggio avviene spontaneamente sempre nello stesso verso, dal corpo a temperatura più alta a quello a temperatura più bassa, e si arresta quando le temperature diventano uguali. Poiché il calore è energia, nel Sistema Internazionale si misura in joule (J), come il lavoro e l'energia cinetica. Lo indichiamo con Q.

La parola decisiva è *passa*: il calore esiste solo mentre fluisce, come un bonifico, che è denaro in viaggio fra due conti e non qualcosa che un conto «contiene». Che cosa possiede, allora, un corpo caldo più di uno freddo?

7.1.2 L'energia interna

Ogni corpo è fatto di un numero enorme di particelle, atomi e molecole, mai ferme: in un gas volano e si urtano, in un liquido scorrono le une sulle altre, in un solido vibrano attorno a posizioni fisse. Le particelle hanno quindi energia cinetica; e poiché si attraggono e si respingono, hanno anche un'energia potenziale legata alle loro distanze reciproche. La somma di tutte queste energie, per tutte le particelle del corpo, è la sua energia interna, che indicheremo con U: è l'«energia interna» che nel volume del terzo anno (Fisica 3, capitolo 16) avevi visto comparire quando l'attrito dissipa energia meccanica.

La temperatura è legata all'agitazione delle particelle: più un corpo è caldo, più velocemente in media si muovono le sue particelle. Lo renderemo preciso nel capitolo 9 con la teoria cinetica dei gas. Quando un corpo caldo tocca un corpo freddo, le particelle più agitate del primo, urtando quelle meno agitate del secondo, cedono loro in media parte della propria energia: l'energia interna del corpo caldo diminuisce, quella del corpo freddo aumenta. Il calore è proprio questa energia che passa.

Ma l'energia interna di un corpo può aumentare anche senza ricevere calore. Strofina con forza le mani, o comprimi rapidamente l'aria in una pompa da bicicletta: mani e tubo si scaldano senza che nessun corpo più caldo li tocchi. È il *lavoro* a far crescere l'energia interna. Calore e lavoro sono i due modi in cui l'energia entra in un corpo o ne esce, e dalla sola temperatura finale non si può dire quale dei due abbia agito. Questa idea, sviluppata nel capitolo 10, diventerà il primo principio della termodinamica.

ERRORE FREQUENTE

Temperatura, calore, energia interna

La **temperatura** (in °C o in K) dice quanto è caldo un corpo e non dipende da quanto è grande: una goccia e una pentola d'acqua bollente sono entrambe a 100 °C. L'**energia interna** (in J) è l'energia di tutte le particelle e dipende anche dalla quantità di materia: la pentola ne ha molta più della goccia. Il **calore** (in J) è l'energia che passa da un corpo a un altro perché le temperature sono diverse.

Ne seguono due conseguenze che sorprendono. Primo: non si dice che un corpo «contiene calore», ma che ha una certa energia interna. Secondo: il calore va dal corpo più *caldo* a quello più *freddo*, non da quello con più energia interna a quello con meno. Una vasca d'acqua tiepida ha un'energia interna molto maggiore di un chiodo rovente, eppure, se vi gettiamo il chiodo, è il chiodo a cedere calore all'acqua.

7.2 Dal calorico all'equivalente meccanico

7.2.1 Una sostanza che non c'era

Che il calore sia energia oggi sembra ovvio, ma è una scoperta dell'Ottocento. Per gran parte del Settecento i fisici e i chimici spiegavano i fenomeni termici con la **teoria del calorico**: il calore sarebbe un fluido invisibile e senza peso, il *calorico*, capace di penetrare in tutti i corpi. Un corpo caldo ne contiene molto, uno freddo poco; messi a contatto, il calorico scorre dal primo al secondo finché non si distribuisce in equilibrio, come l'acqua fra due vasi comunicanti. Alla fine del secolo il chimico Antoine-Laurent Lavoisier lo inserì fra le sostanze semplici del suo trattato di chimica, accanto alla luce.

La teoria non era ingenua. Spiegava perché il calore fluisce dal caldo verso il freddo e soprattutto perché, in un recipiente isolato, il calore ceduto da un corpo è uguale a quello acquistato

dall'altro: un fluido che non si crea né si distrugge deve uscire da un corpo quanto ne entra nell'altro. La calorimetria, che userai più avanti, nacque proprio nell'ambito di questa teoria. Ciò che il calorico non spiegava era il calore prodotto dall'attrito: da dove veniva quel fluido, se nessun corpo caldo lo forniva?

APPROFONDIMENTO

Rumford e i cannoni di Monaco

Benjamin Thompson, nato nel Massachusetts quando era ancora una colonia inglese, fece carriera al servizio dell'elettore di Baviera, che lo nominò conte di Rumford. A Monaco dirigeva l'arsenale, dove le canne dei cannoni venivano forate con un utensile rotante. Rumford notò che il bronzo e i trucioli si scaldavano moltissimo. Per i sostenitori del calorico la spiegazione era semplice: l'utensile, sminuzzando il metallo, ne «spremeva» il calorico.

Rumford volle metterla alla prova. Immerse in un recipiente d'acqua il pezzo da forare e usò di proposito una punta smussata, che asportava pochissimo metallo. L'acqua si scaldò lo stesso e, dopo circa due ore e mezza, cominciò a bollire, senza fuoco, davanti agli osservatori stupiti. Il calore, inoltre, continuava a prodursi finché la macchina girava: sembrava inesauribile. Nella memoria presentata alla Royal Society di Londra nel 1798 Rumford concluse che una cosa che un corpo isolato può continuare a fornire senza limite non può essere una sostanza materiale, e che gli era «estremamente difficile, se non del tutto impossibile, formarsi un'idea distinta di qualcosa che potesse essere eccitato e comunicato nel modo in cui lo era il calore in questi esperimenti, se non il MOTO» (B. Thompson, conte di Rumford, *An Inquiry concerning the Source of the Heat which is excited by Friction*, 1798; traduzione della redazione).

L'argomento era forte, ma non bastò: Rumford non misurò quanto calore corrispondesse a quanto lavoro, e la teoria del calorico sopravvisse ancora per decenni. Il conto preciso lo fece, mezzo secolo dopo, James Prescott Joule.

7.2.2 L'esperimento di Joule

Joule, figlio di un birraio inglese, dedicò gli anni Quaranta dell'Ottocento a una domanda precisa: quanto lavoro occorre per produrre lo stesso effetto di una data quantità di calore? Il più celebre dei suoi apparati è il *mulinello* della Figura 7.1. In un recipiente pieno d'acqua e isolato termicamente gira un asse munito di palette; altre palette, fisse alle pareti, impediscono all'acqua di ruotare tutta insieme e la costringono a rimescolarsi. L'asse è messo in rotazione da due pesi che scendono, appesi a corde avvolte attorno a un cilindro.

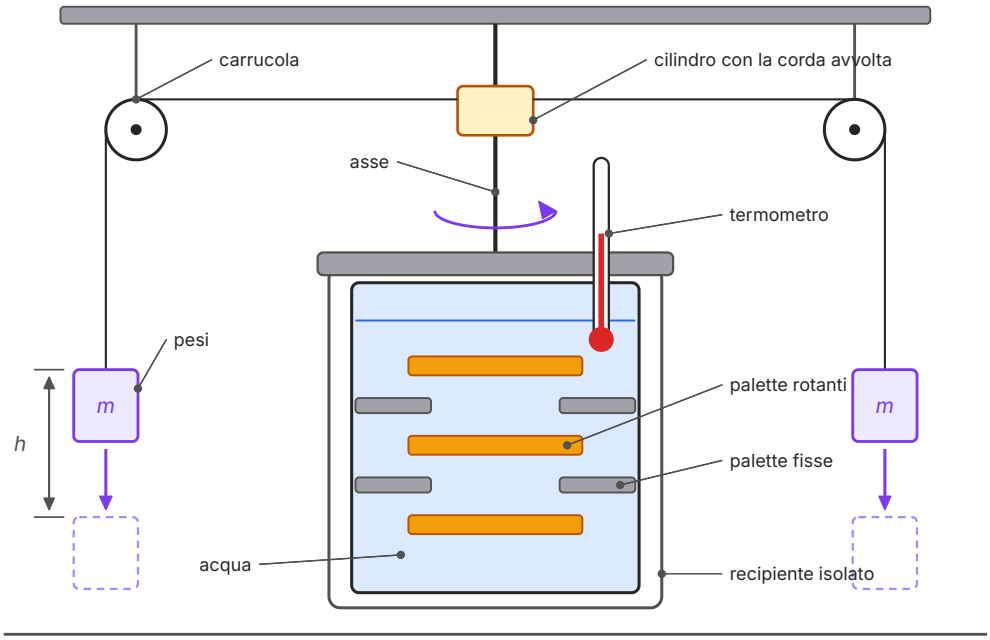


Figura 7.1 Schema del mulinello di Joule. I due pesi, scendendo di un'altezza h, fanno girare il cilindro e l'asse; le palette rotanti, frenate dall'acqua e dalle palette fisse, rimescolano l'acqua, la cui temperatura sale. Il lavoro compiuto dai due pesi, $2mgh$ a ogni discesa, si trova alla fine come aumento dell'energia interna dell'acqua. Le proporzioni non sono quelle dell'apparato originale.

Quando i pesi scendono di un'altezza h, la forza peso compie un lavoro che conosci dal volume del terzo anno: mgh per ciascuno. I pesi arrivano in basso lentamente, quasi senza energia cinetica, perché l'attrito delle palette nell'acqua li frena: il lavoro non resta energia meccanica, ma diventa energia interna dell'acqua, che si scalda. Joule ripeteva la discesa molte volte e misurava l'aumento di temperatura, di frazioni di grado, con termometri sensibilissimi, tenendo conto con cura delle dispersioni.

Per fissare le idee, con valori indicativi: due pesi di 10 kg ciascuno che scendono di 1,5 m per 20 volte compiono un lavoro $W = 20 \cdot 2 \cdot 10\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 1{,}5\ \text{m} = 5880\ \text{J}$. Se tutto finisce in 0,500 kg d'acqua, la temperatura sale di circa 2,8 °C: lo stesso aumento che si otterrebbe scaldando l'acqua su una fiamma. Ecco il risultato di Joule: *lo stesso effetto si ottiene con il calore o con il lavoro, e fra le due quantità c'è un rapporto fisso*, qualunque sia il modo in cui il lavoro viene compiuto (palette, attrito di dischi di ferro, compressione di un gas).

7.2.3 La caloria e il joule

Prima di sapere che il calore è energia, lo si misurava con un'unità propria, definita con l'acqua. La **caloria** (cal) è la quantità di calore che innalza di 1 °C la temperatura di 1 g d'acqua (più precisamente da 14,5 °C a 15,5 °C). Il rapporto misurato da Joule fra lavoro e calore si chiama **equivalente meccanico della caloria**; il suo valore moderno è

$$1\ \text{cal} \approx 4{,}186\ \text{J}$$

Negli stessi anni Julius Robert Mayer (1842) e Hermann von Helmholtz (1847) giunsero per altre vie alla conclusione generale: calore e lavoro sono due modi di scambiare la stessa grandezza, l'energia, che si conserva. Da allora il calore si misura in joule. La caloria resta nell'uso comune attraverso il suo multiplo, la **chilocaloria** (1 kcal = 1000 cal ≈ 4186 J), che le etichette degli alimenti chiamano anche «Calorie» con l'iniziale maiuscola. Un'etichetta tipica di pasta secca indica, per 100 g, circa 1500 kJ, cioè circa 360 kcal. (Nel volume del terzo anno hai usato il valore convenzionale 1 kcal = 4,184 kJ, adottato in nutrizione: la differenza è trascurabile.)

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Calore viene dal latino *calor*, da *calere*, «essere caldo». Dalla stessa radice vengono *calorico*, il nome del fluido immaginario del Settecento, *caloria* e *calorifero*.

Calorimetro è una parola ibrida: unisce il latino *calor* al greco μέτρον, «misura», lo stesso che hai incontrato in *termometro* (capitolo 6). Il calorimetro non misura una temperatura, che la legge il termometro, ma una quantità di calore.

Convezione viene dal latino *convectio*, da *convehere*, «trasportare insieme» (*cum* e *vehere*, «trasportare», da cui anche *veicolo*): nella convezione è il fluido stesso a trasportare con sé l'energia. Nella **conduzione**, dal latino *conducere*, «condurre», l'energia passa invece attraverso il materiale, che resta fermo. **Irraggiamento** e *radiazione* vengono da *radius*, che in latino è la bacchetta, il raggio della ruota e il raggio di luce.

7.3 Capacità termica e calore specifico

7.3.1 Quanto calore per un grado

Per far bollire un litro d'acqua sul fornello servono pochi minuti, per dieci litri molti di più; una padella di ferro vuota scotta dopo pochi secondi. La quantità di calore necessaria per riscaldare un corpo dipende dunque dal corpo. La **capacità termica** C di un corpo è il rapporto fra il calore Q che riceve e l'aumento di temperatura ΔT che ne risulta:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Si misura in joule al kelvin (J/K): è il calore che serve per alzare di 1 K la temperatura di quel corpo. Ricorda che una differenza di 1 K è uguale a una differenza di 1 °C (capitolo 6): per ΔT si può usare indifferentemente l'una o l'altra scala. Una pentola d'alluminio di 0,80 kg ha una capacità termica di circa 720 J/K; dieci litri d'acqua, di circa 42 000 J/K.

7.3.2 Il calore specifico

La capacità termica è proporzionale alla massa: due pentole uguali hanno insieme capacità termica doppia. Dividendo per la massa si ottiene una grandezza che dipende soltanto dalla sostanza, il **calore specifico** c: il calore necessario per innalzare di 1 K la temperatura di 1 kg della sostanza. Si misura in J/(kg·K). Da $C = mc$ segue la relazione fondamentale di questo capitolo:

$$Q = mc\,\Delta T$$

Il calore assorbito da un corpo è proporzionale alla sua massa, al calore specifico della sostanza e alla variazione di temperatura. La relazione vale finché il corpo non cambia stato (non fonde, non bolle): i passaggi di stato sono l'argomento del capitolo 8. Qui adottiamo una convenzione sui segni che manterremo in tutto il volume: Q è *positivo* quando il corpo riceve calore e si scalda ($\Delta T > 0$), *negativo* quando lo cede e si raffredda ($\Delta T < 0$).

La Tabella A.4 in Appendice riporta i calori specifici di alcune sostanze. Il valore dell'acqua, 4186 J/(kg·K), è quasi dieci volte quello del ferro (450 J/(kg·K)) e più di trenta volte quello del piombo (128 J/(kg·K)): con lo stesso calore 1 kg di piombo si scalda trentatré volte più di 1 kg d'acqua. Il calore specifico dell'acqua è il più alto fra le sostanze comuni, ed è il motivo per cui l'acqua si scalda e si raffredda lentamente.

La relazione $Q = mc\Delta T$ dice anche quanta energia interna guadagna un solido o un liquido che si scalda, qualunque sia la via per cui l'energia gli è arrivata: per l'acqua del mulinello di Joule, che non ha ricevuto calore ma lavoro, l'aumento di energia interna si calcola nello stesso modo, ed è quello che abbiamo fatto per il mulinello.

ESEMPIO SVOLTO

Il bollitore elettrico

Problema. Un bollitore elettrico da 2000 W contiene 1,5 L d'acqua a 15 °C. a) Quanto calore deve ricevere l'acqua per arrivare a 100 °C? Esprimilo in joule e in chilocalorie. b) Se tutta l'energia elettrica diventasse calore ceduto all'acqua, quanto tempo servirebbe? c) Di quanto dovrebbe salire una persona di 60 kg perché il peso compia un lavoro uguale, cambiato di segno?

Dati. 1,5 L d'acqua hanno massa $m = 1{,}5$ kg; $c = 4186$ J/(kg·K); $\Delta T = 100\ °\text{C} - 15\ °\text{C} = 85\ °\text{C} = 85$ K.

a) $Q = mc\Delta T = 1{,}5\ \text{kg} \cdot 4186\ \text{J/(kg·K)} \cdot 85\ \text{K} \approx 5{,}34 \times 10^5$ J. In chilocalorie: $5{,}34 \times 10^5$ J / (4186 J/kcal) ≈ 128 kcal. Il segno è positivo: l'acqua riceve calore.

b) La potenza è l'energia trasferita nell'unità di tempo, $P = E/\Delta t$ (Fisica 3, capitolo 15), quindi

$$\Delta t = \frac{Q}{P} = \frac{5{,}34 \times 10^5\ \text{J}}{2000\ \text{W}} \approx 267\ \text{s} \approx 4{,}5\ \text{min}$$

Nella realtà ne serve un po' di più: una parte dell'energia scalda il bollitore stesso e una parte si disperde nell'aria.

c) Da $m\,g\,h = 5{,}34 \times 10^5$ J: $h = 5{,}34 \times 10^5\ \text{J} / (60\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2) \approx 9{,}1 \times 10^2$ m. Scaldare una teiera costa quanto una salita di novecento metri: ecco perché Joule doveva far scendere i pesi tante volte per pochi gradi.

COLLEGAMENTI

Scienze: l'acqua, il clima e il nostro corpo

Le rocce e la sabbia asciutta hanno calori specifici minori di 1000 J/(kg·K), l'acqua più di quattro volte tanto. Sotto lo stesso sole, d'estate, la sabbia di una spiaggia scotta a mezzogiorno mentre l'acqua del mare resta fresca; di notte la sabbia si raffredda in fretta, il mare no. Su scala più grande, mari e laghi si scaldano lentamente in estate e restituiscono lentamente energia in inverno: per questo le città costiere hanno, a parità di latitudine, estati meno torride e inverni meno rigidi delle città dell'entroterra, e le loro escursioni termiche fra il giorno e la notte sono minori.

Per la stessa ragione i termosifoni e la borsa dell'acqua calda usano acqua: raffreddandosi, a parità di massa, cede più calore di quasi ogni altra sostanza. E il corpo umano, fatto d'acqua per circa il 60% della sua massa, deve a questa proprietà parte della sua stabilità termica.

7.4 L'equilibrio termico e la calorimetria

7.4.1 Il bilancio degli scambi

Mettiamo a contatto due corpi a temperature diverse, t_1 e t_2, all'interno di un recipiente che non scambia calore con l'esterno. Il calore ceduto dal corpo più caldo è assorbito interamente dal più freddo: l'energia totale si conserva, e non ne entra né ne esce dal sistema. Con la nostra convenzione sui segni, il calore ricevuto dal corpo freddo ($Q_2 > 0$) e quello ceduto dal corpo caldo ($Q_1 < 0$) sono opposti:

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

Lo scambio continua finché i due corpi raggiungono una stessa temperatura, la **temperatura di equilibrio** t_e. Lo studio delle quantità di calore scambiate fra i corpi si chiama **calorimetria**.

DA RICORDARE

Come impostare un bilancio termico

1) Scrivi per ogni corpo $Q = mc(t_e - t_{iniziale})$, sempre «finale meno iniziale»: i segni vengono da soli, positivo per chi si scalda e negativo per chi si raffredda. 2) Imponi che la somma di tutti i Q sia zero. 3) Risolvi per l'incognita. 4) Controlla che t_e sia compresa fra la temperatura più bassa e quella più alta: se non lo è, c'è un errore. Il metodo vale solo se nessun corpo cambia stato; altrimenti va aggiunto il calore del passaggio di stato (capitolo 8).

7.4.2 La temperatura di equilibrio

Scriviamo il bilancio per due corpi di masse m_1, m_2 e calori specifici c_1, c_2:

$$m_1c_1(t_e - t_1) + m_2c_2(t_e - t_2) = 0$$

È un'equazione di primo grado nell'incognita t_e. Portando a destra i termini noti si ottiene

$$t_e = \frac{m_1c_1t_1 + m_2c_2t_2}{m_1c_1 + m_2c_2}$$

La temperatura di equilibrio è una *media pesata* delle temperature iniziali, in cui ciascuna conta in proporzione alla capacità termica mc del suo corpo. Se i due corpi sono della stessa sostanza i calori specifici si semplificano: mescolando 2 L d'acqua a 70 °C e 1 L a 10 °C si ottiene $(2 \cdot 70 + 1 \cdot 10)/3$ °C = 50 °C, più vicino all'acqua che è in quantità maggiore. Se le sostanze sono diverse, pesa di più quella con la capacità termica maggiore: un blocco di ferro di 0,50 kg a 80 °C immerso in 1,0 kg d'acqua a 20 °C porta l'acqua soltanto a circa 23 °C, perché la capacità termica dell'acqua (4186 J/K) è quasi venti volte quella del ferro (225 J/K).

La Figura 7.2 mostra come le temperature di due corpi a contatto si avvicinano nel tempo. Lo scambio è rapido finché la differenza di temperatura è grande, poi rallenta; e il corpo con la capacità termica minore cambia di più la sua temperatura.

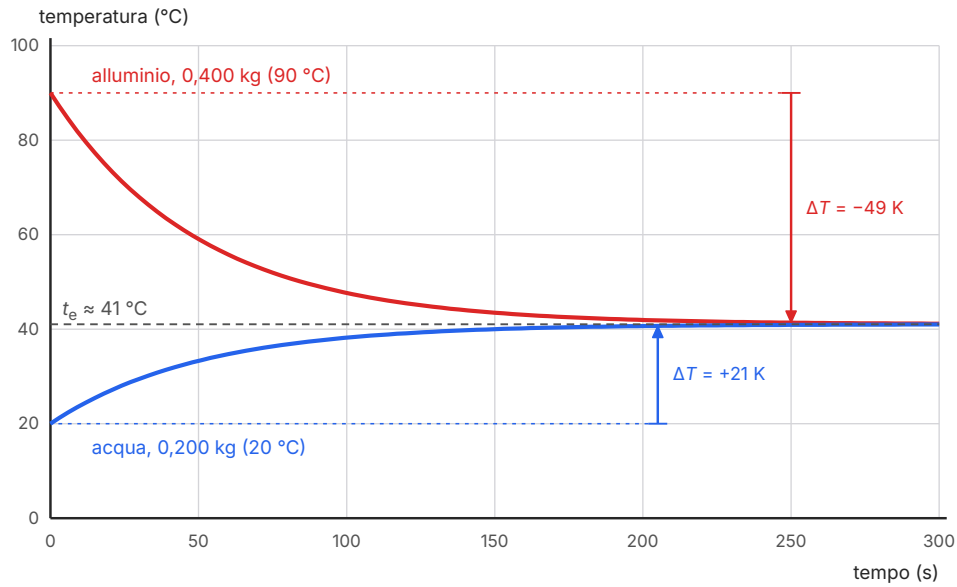


Figura 7.2 Temperatura in funzione del tempo per un blocco di alluminio di 0,400 kg, inizialmente a 90 °C, immerso in 0,200 kg d'acqua a 20 °C in un recipiente isolato (andamento calcolato con un modello semplice di scambio). Le due temperature tendono allo stesso valore, $t_e \approx 41$ °C. L'alluminio, che ha la capacità termica minore (360 J/K contro 837 J/K), varia la sua temperatura di più.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere un grafico di equilibrio

Problema. Nella Figura 7.2 la massa dell'acqua è nota (0,200 kg), quella del blocco metallico pure (0,400 kg), ma fingiamo di non sapere di che metallo si tratti. Ricava dal grafico il suo calore specifico e riconosci il metallo con la Tabella A.4 in Appendice.

Lettura del grafico. Il metallo passa da 90 °C a circa 41 °C: $\Delta T_{\text{met}} \approx -49$ K. L'acqua passa da 20 °C a circa 41 °C: $\Delta T_{\text{acqua}} \approx +21$ K.

Bilancio. $m_{\text{met}} c_{\text{met}} \Delta T_{\text{met}} + m_{\text{acqua}} c_{\text{acqua}} \Delta T_{\text{acqua}} = 0$, quindi

$$c_{\text{met}} = \frac{m_{\text{acqua}} c_{\text{acqua}} \, \Delta T_{\text{acqua}}}{-m_{\text{met}} \, \Delta T_{\text{met}}} = \frac{0{,}200\ \text{kg} \cdot 4186\ \text{J/(kg·K)} \cdot 21\ \text{K}}{0{,}400\ \text{kg} \cdot 49\ \text{K}} \approx 9{,}0 \times 10^{2}\ \text{J/(kg·K)}$$

Conclusione. Il valore coincide con quello dell'alluminio (900 J/(kg·K)). Due cifre significative bastano: le letture sul grafico sono incerte di circa mezzo grado. Il rapporto fra le variazioni di temperatura, 49/21 ≈ 2,3, è l'inverso del rapporto fra le capacità termiche: 837/360 ≈ 2,3.

7.4.3 Il calorimetro delle mescolanze

Per misurare un calore specifico bisogna realizzare in pratica il recipiente isolato del bilancio. Il **calorimetro** delle mescolanze (Figura 7.3) è un recipiente interno, che contiene una massa nota d'acqua, separato da un recipiente esterno da uno strato d'aria o di materiale isolante e chiuso da un coperchio; attraverso il coperchio passano un termometro e un agitatore, che rimescola l'acqua perché abbia ovunque la stessa temperatura. Un buon thermos da cucina, con un termometro digitale, è già un calorimetro accettabile.

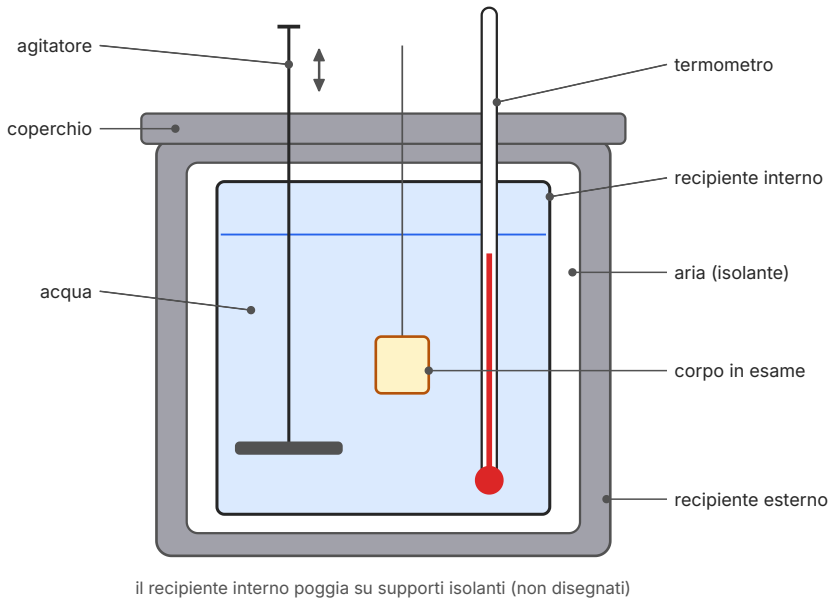


Figura 7.3 Sezione schematica di un calorimetro delle mescolanze. Il corpo in esame, scaldato in precedenza a temperatura nota, viene immerso nell'acqua del recipiente interno; l'agitatore uniforma la temperatura, che si legge sul termometro quando smette di cambiare.

Anche il recipiente interno, l'agitatore e il termometro si scaldano e assorbono una parte del calore. Se ne tiene conto con un artificio: si misura una volta per tutte la massa d'acqua che avrebbe la stessa capacità termica di queste parti. È l'**equivalente in acqua** del calorimetro, m_e: nei bilanci basta aggiungere m_e alla massa dell'acqua contenuta. Per un piccolo calorimetro scolastico vale tipicamente qualche decina di grammi.

ESEMPIO SVOLTO

Un metallo misterioso

Problema. Un cilindretto metallico di 0,250 kg viene tenuto a lungo in acqua bollente, a 100,0 °C, e poi trasferito rapidamente in un calorimetro con equivalente in acqua di 20 g, che contiene 0,300 kg d'acqua a 20,0 °C. Dopo aver agitato, la temperatura si stabilizza a 25,3 °C. Qual è il calore specifico del metallo? Di quale metallo si tratta?

Il sistema è formato dal cilindretto, dall'acqua e dal calorimetro, che consideriamo isolati dall'esterno. Per l'acqua contiamo anche l'equivalente in acqua: 0,300 kg + 0,020 kg = 0,320 kg.

Calore ricevuto da acqua e calorimetro: $Q_{\text{acqua}} = 0{,}320\ \text{kg} \cdot 4186\ \text{J/(kg·K)} \cdot (25{,}3 - 20{,}0)\ \text{K} \approx +7{,}10 \times 10^3\ \text{J}$.

Calore ceduto dal metallo: $Q_{\text{met}} = 0{,}250\ \text{kg} \cdot c_{\text{met}} \cdot (25{,}3 - 100{,}0)\ \text{K} = -18{,}7\ \text{kg·K} \cdot c_{\text{met}}$.

Bilancio. $Q_{\text{acqua}} + Q_{\text{met}} = 0$:

$$c_{\text{met}} = \frac{7{,}10 \times 10^3\ \text{J}}{0{,}250\ \text{kg} \cdot 74{,}7\ \text{K}} \approx 380\ \text{J/(kg·K)}$$

Conclusione. Il valore più vicino nella Tabella A.4 è quello del rame (385 J/(kg·K)): la differenza, poco più dell'1%, è dell'ordine delle incertezze di misura. Senza l'equivalente in acqua avremmo ottenuto 356 J/(kg·K), circa il 6% in meno.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: il calore specifico dell'alluminio

Materiali. Un calorimetro con agitatore (o un thermos con coperchio forato); un termometro digitale (risoluzione 0,1 °C); una bilancia (0,1 g); un cilindro di alluminio di circa 100 g appeso a un filo; un becher d'acqua su una piastra elettrica; una pinza.

Procedimento. 1) *Equivalente in acqua.* Versa nel calorimetro 150,0 g d'acqua a 20,0 °C, aggiungi 150,0 g d'acqua a 60,0 °C, agita e leggi la temperatura di equilibrio: 39,2 °C (senza calorimetro sarebbe 40,0 °C). Dal bilancio $150{,}0\ \text{g} \cdot (39{,}2 - 20{,}0) + m_e \cdot (39{,}2 - 20{,}0) = 150{,}0\ \text{g} \cdot (60{,}0 - 39{,}2)$ si ricava $m_e \approx 13$ g, con un'incertezza di circa 3 g dovuta a quella delle temperature. 2) *Calore specifico.* Tieni il cilindro per almeno dieci minuti nell'acqua che bolle (misurane la temperatura: qui 100,0 °C ± 0,5 °C), poi trasferiscilo in pochi secondi nel calorimetro con una massa nota d'acqua fredda, chiudi, agita e annota la temperatura massima raggiunta. Ripeti con tre masse d'acqua diverse (Tabella 7.1).

Tabella 7.1 Calore specifico di un cilindro di alluminio di 100,0 g, scaldato a 100,0 °C, con il metodo delle mescolanze (equivalente in acqua 13 g ± 3 g; dati tipici). L'incertezza su c è la somma delle incertezze relative delle due differenze di temperatura e delle masse.

prova	acqua (g) ± 0,1	t_{acqua} (°C) ± 0,1	t_e (°C) ± 0,1	c (J/(kg·K))
1	200,0	20,0	27,4	909 ± 46
2	150,0	19,5	28,8	891 ± 44
3	250,0	20,5	26,6	915 ± 49

Che cosa concludere. Per la prova 1: $c = (0{,}2000 + 0{,}013)\ \text{kg} \cdot 4186\ \text{J/(kg·K)} \cdot 7{,}4\ \text{K} / (0{,}1000\ \text{kg} \cdot 72{,}6\ \text{K}) \approx 909\ \text{J/(kg·K)}$. Le tre misure sono compatibili fra loro e la loro media, circa 905 J/(kg·K), è compatibile con il valore di tabella dell'alluminio (900 J/(kg·K)). L'incertezza maggiore viene dalla piccola variazione di temperatura dell'acqua, pochi gradi letti al decimo. Due errori sistematici agiscono in versi opposti: il cilindro si raffredda un poco durante il trasferimento (il calore ceduto è minore del previsto, e c risulta più basso), mentre una goccia d'acqua bollente trasportata con il cilindro porta calore in più (e c risulta più alto).

Sicurezza. L'acqua bollente e la piastra ustionano: maneggia il cilindro solo con la pinza e il filo, tieni il becher lontano dal bordo del banco e non lasciare la piastra accesa incustodita.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4: lo scopo, i materiali, il bilancio termico scritto in lettere, la tabella con le incertezze, il calcolo dell'equivalente in acqua e del calore specifico per ciascuna prova, il confronto fra le prove e con il valore di tabella, la discussione degli errori sistematici e di come ridurli.

7.5 La propagazione del calore

Finora abbiamo messo i corpi a contatto e calcolato quanto calore si scambiano, senza chiederci *come* passa. Le vie della propagazione del calore sono tre: la conduzione, la convezione e l'irraggiamento. Nella maggior parte delle situazioni reali agiscono insieme, ma con pesi diversi.

7.5.1 La conduzione

Tieni per un'estremità un cucchiaino di metallo immerso in una tazza di tè bollente: dopo poco l'estremità che tieni in mano si scalda, anche se il metallo non si è mosso. Le particelle dell'estremità calda, più agitate, urtano le vicine e cedono loro energia, e queste alle successive: l'energia avanza attraverso il materiale senza che vi sia trasporto di materia. È la **conduzione**, il modo in cui il calore attraversa i solidi.

Consideriamo una parete di spessore d e superficie S, con le due facce mantenute a temperature costanti diverse, che differiscono di ΔT (Figura 7.4). Dopo un tempo sufficiente il calore attraversa la parete a ritmo costante, e la quantità Q che passa in un tempo Δt obbedisce a una legge sperimentale formulata da Joseph Fourier all'inizio dell'Ottocento:

$$\frac{Q}{\Delta t} = kS\frac{\Delta T}{d}$$

Il calore che passa ogni secondo, una potenza misurata in watt, è proporzionale alla superficie e alla differenza di temperatura, e inversamente proporzionale allo spessore: raddoppiando lo spessore il flusso si dimezza. La costante k dipende dal materiale ed è la sua **conducibilità termica**, in W/(m·K). I valori della Tabella A.5 in Appendice coprono un intervallo enorme: dal rame (401 W/(m·K)) all'aria ferma (0,026 W/(m·K)) c'è un fattore di oltre quindicimila. I metalli sono buoni **conduttori termici**; il legno, la lana, le materie plastiche espanse e soprattutto l'aria immobile sono **isolanti termici**.

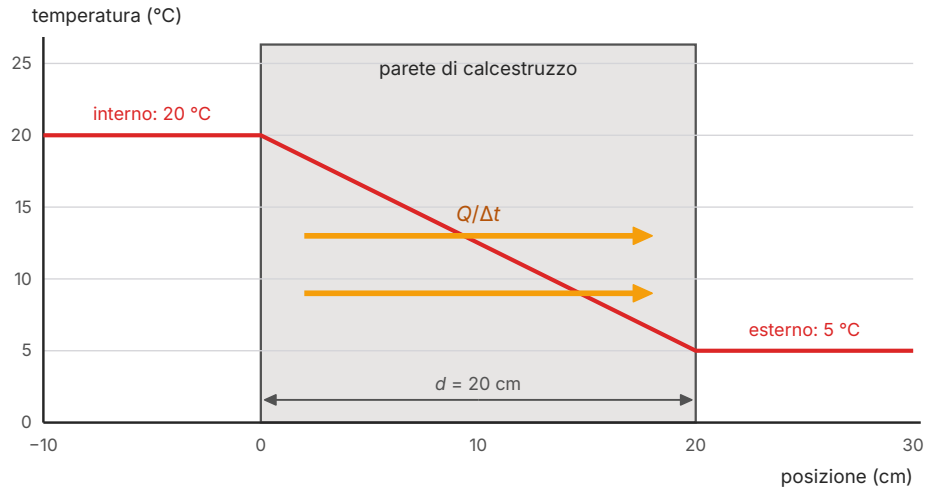


Figura 7.4 Conduzione attraverso una parete di calcestruzzo spessa 20 cm, con l'aria interna a 20 °C e quella esterna a 5 °C. Quando le temperature delle facce restano costanti, la temperatura cala in modo lineare dentro la parete e il calore la attraversa a ritmo costante, dal lato caldo verso il lato freddo. Per semplicità il grafico trascura i sottili strati d'aria ferma a contatto con le due facce.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto calore perde una parete

Problema. Una parete di calcestruzzo ($k \approx 1{,}0$ W/(m·K)) spessa 20 cm ha una superficie di 12 m^2; dentro ci sono 20 °C, fuori 5 °C. a) Quanto calore la attraversa ogni secondo? b) Quanta energia si perde in un giorno, in kWh? c) Quanto calore attraverserebbe ogni secondo un pannello di polistirene espanso ($k \approx 0{,}030$ W/(m·K)) spesso 6,0 cm, con la stessa superficie e la stessa differenza di temperatura?

a) $\Delta T = 15$ K, $d = 0{,}20$ m:

$$\frac{Q}{\Delta t} = 1{,}0\ \text{W/(m·K)} \cdot 12\ \text{m}^2 \cdot \frac{15\ \text{K}}{0{,}20\ \text{m}} = 9{,}0 \times 10^2\ \text{W}$$

b) In un giorno, 86 400 s: $Q = 900\ \text{W} \cdot 86\,400\ \text{s} \approx 7{,}8 \times 10^7$ J. Poiché 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J, sono circa 22 kWh: è l'energia che l'impianto di riscaldamento deve fornire solo per compensare quella parete.

c) 0,030 W/(m·K) · 12 m^2 · 15 K / 0,060 m = 90 W: dieci volte meno, con uno spessore poco più di un quarto. Per questo le pareti delle case si «cappottano» con pannelli isolanti. **Osservazione.** I valori sono stime per eccesso: in realtà gli strati d'aria ferma che aderiscono alle due facce, e che il calcolo trascura, rallentano ancora il passaggio del calore.

La conduzione spiega un'esperienza che sembra contraddire il termometro. In una stanza a 20 °C una ringhiera di metallo e un corrimano di legno sono alla stessa temperatura, eppure il metallo, toccato, sembra molto più freddo. La pelle è più calda, intorno ai 30 °C: il metallo, buon conduttore, porta via rapidamente calore dalla zona toccata, che si raffredda; il legno, isolante, ne porta via pochissimo. Il tatto non misura la temperatura degli oggetti, ma la rapidità con cui la pelle perde o riceve calore: è la stessa illusione delle tre bacinelle del capitolo 6. Per questo il marmo è «freddo» per i piedi nudi, un tappeto no.

L'aria ferma è uno dei migliori isolanti: per questo isolano i materiali che la imprigionano in piccole celle, come la lana, le piume, il polistirene espanso o la neve fresca. Nei vetri doppi delle finestre, il *vetrocamera*, l'isolamento non è dato dal vetro, che conduce discretamente, ma dallo strato d'aria o di gas chiuso fra le due lastre.

7.5.2 La convezione

Nei liquidi e nei gas il calore si propaga soprattutto in un altro modo. L'aria scaldata da un termosifone si dilata, diventa meno densa e, per la spinta di Archimede (Fisica 3, capitolo 9), sale; il suo posto è preso da aria più fredda, che a sua volta si scalda. Si forma una corrente circolare, un *moto convettivo*, che distribuisce l'energia in tutta la stanza: per questo in una stanza riscaldata l'aria vicino al soffitto è più calda di quella vicino al pavimento. Nella **convezione** il calore è trasportato da un fluido in movimento: a spostarsi non è solo l'energia, ma la materia stessa. Lo stesso accade nell'acqua di una pentola sul fuoco.

Quando il moto del fluido è dovuto soltanto alle differenze di densità la convezione è *naturale*; quando lo produce una ventola o una pompa è *forzata*: il forno ventilato, la pompa del riscaldamento, il cuore che spinge il sangue verso la pelle.

Su grande scala la convezione muove l'atmosfera; un esempio è il regime delle brezze (Figura 7.5). Di giorno la terra, che ha un calore specifico minore, si scalda più in fretta del mare; l'aria sopra la terra si scalda, sale, e al suolo viene sostituita da aria più fresca che arriva dal mare: è la **brezza di mare**. Di notte la terra si raffredda più in fretta e il verso si inverte: l'aria relativamente più calda sale sopra il mare, e al suolo soffia la **brezza di terra**, dalla costa verso il largo.

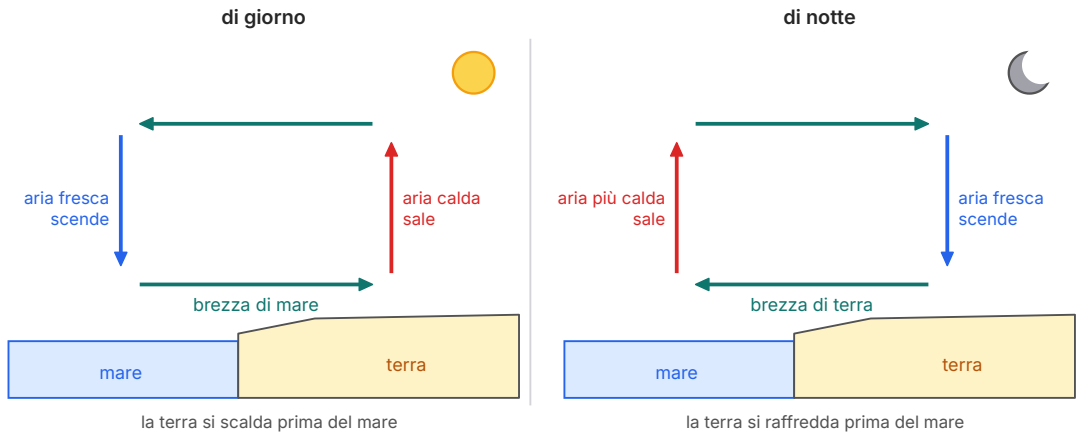


Figura 7.5 Le brezze, un moto convettivo su grande scala (schema, non in scala). Di giorno l'aria scaldata dalla terra sale e al suolo arriva aria dal mare, che chiude il circuito scendendo; di notte la circolazione si inverte, perché la terra si raffredda più in fretta del mare.

7.5.3 L'irraggiamento

L'energia del Sole arriva sulla Terra attraverso 150 milioni di kilometri di spazio quasi vuoto, dove conduzione e convezione sono impossibili: viaggia come radiazione, la famiglia di fenomeni a cui appartiene la luce. È l'**irraggiamento**: ogni corpo, a qualunque temperatura, emette radiazione, e tanta più quanto più è caldo. I corpi a temperatura ambiente, il nostro compreso, emettono soprattutto **radiazione infrarossa**: invisibile, ma la senti sulla pelle davanti a una stufa, e la rivelano i termometri a infrarossi (capitolo 6). Un ferro scaldato oltre i 500 °C circa emette anche luce visibile, prima rossa. La natura di questa radiazione la scoprirai il prossimo anno, con le onde elettromagnetiche.

La radiazione che colpisce un corpo viene in parte riflessa e in parte assorbita, e la parte assorbita ne aumenta l'energia interna. Le superfici scure e opache assorbono molto, quelle chiare e lucide riflettono molto: d'estate una maglietta nera al sole scotta, una bianca molto meno, e per questo le case di molti paesi mediterranei sono imbiancate a calce. Chi assorbe bene emette anche bene: a parità di temperatura, un corpo nero e opaco irraggia più di uno lucido.

Il thermos della Figura 7.6 è progettato per ostacolare tutte e tre le vie insieme. Fra le due pareti di vetro c'è il vuoto, che impedisce la conduzione e la convezione; le facce delle pareti sono argentate e riflettono la radiazione, rimandandola verso l'interno; il tappo isolante blocca i moti convettivi e l'evaporazione verso l'alto. Il caffè resta caldo per ore, e una bevanda fredda resta fresca.

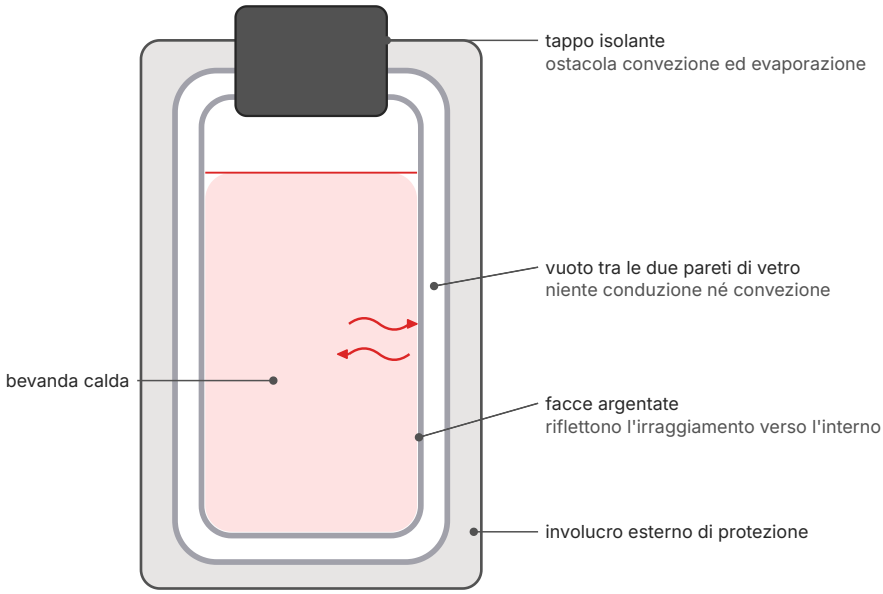


Figura 7.6 Sezione schematica di un thermos. Ogni parte ostacola una o più delle tre vie di propagazione del calore; le frecce ondulate indicano la radiazione riflessa dalla faccia argentata.

L'irraggiamento determina anche il bilancio energetico del nostro pianeta. La luce del Sole attraversa in gran parte l'atmosfera e scalda il suolo e gli oceani, che a loro volta emettono radiazione infrarossa. Alcuni gas presenti nell'atmosfera in piccole quantità, come il vapore acqueo, l'anidride carbonica e il metano, assorbono una parte di questa radiazione infrarossa e la riemettono in tutte le direzioni, anche verso il suolo: in questo modo trattengono energia vicino alla superficie. È l'**effetto serra**. In sé è un effetto naturale e indispensabile: senza di esso la temperatura media della superficie terrestre sarebbe di circa −18 °C invece dei circa 15 °C attuali. L'anidride carbonica liberata bruciando carbone, petrolio e metano lo intensifica: è la causa principale del riscaldamento globale che studi in scienze.

APPROFONDIMENTO

Stefan, Boltzmann e la quarta potenza

Quanto più irraggia un corpo più caldo? Nel 1879 Josef Stefan, fisico dell'Università di Vienna, analizzando misure sperimentali, propose che la potenza irraggiata cresca con la *quarta potenza* della temperatura assoluta; pochi anni dopo, nel 1884, il suo allievo Ludwig Boltzmann ricavò la stessa legge dalla teoria. Oggi la chiamiamo **legge di Stefan-Boltzmann**: a parità di superficie e di tipo di superficie, $P \propto T^4$, con T in kelvin.

La quarta potenza cresce in fretta: raddoppiando la temperatura assoluta la potenza irraggiata diventa $2^4 = 16$ volte maggiore. Il filamento di una lampadina a incandescenza, a circa 2800 K, irraggia per ogni centimetro quadrato circa settemila volte più della nostra pelle, a circa 305 K. Attenzione però: anche il corpo più freddo irraggia, e ciò che conta nello scambio è la differenza fra la radiazione emessa e quella assorbita. La forma completa della legge, con la sua costante, la incontrerai negli studi successivi.

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Calore: Q, in joule: energia che passa da un corpo a un altro a causa di una differenza di temperatura, sempre dal più caldo al più freddo. $Q > 0$ se il corpo lo riceve, $Q < 0$ se lo cede.

Equivalente meccanico della caloria: 1 cal ≈ 4,186 J; 1 kcal ≈ 4186 J. Lavoro e calore producono lo stesso effetto in proporzione fissa.

Capacità termica: $C = Q/\Delta T$, in J/K: il calore che serve per alzare di 1 K la temperatura di un corpo.

Calore specifico: $Q = mc\Delta T$, con c in J/(kg·K): il calore che serve per alzare di 1 K la temperatura di 1 kg di una sostanza; $C = mc$. Vale senza passaggi di stato; ΔT è lo stesso in K e in °C.

Equilibrio termico in un sistema isolato: $Q_1 + Q_2 = 0$; $t_e = (m_1c_1t_1 + m_2c_2t_2)/(m_1c_1 + m_2c_2)$: la media delle temperature pesata con le capacità termiche. Nel calorimetro si aggiunge alla massa d'acqua l'equivalente in acqua m_e.

Conduzione (legge di Fourier): $Q/\Delta t = kS\Delta T/d$, in watt, con k conducibilità termica in W/(m·K): il flusso cresce con la superficie e la differenza di temperatura, diminuisce con lo spessore.

Convezione e irraggiamento: il calore è trasportato da un fluido in movimento; oppure da radiazione, che si propaga anche nel vuoto ed è emessa da ogni corpo, tanto più quanto più è caldo.

Abbiamo supposto finora che i corpi, scaldandosi o raffreddandosi, restassero nello stesso stato. Ma il ghiaccio messo in una bibita, prima di scaldarsi, fonde; e l'acqua del bollitore, arrivata a 100 °C, smette di scaldarsi e comincia a evaporare. Nel prossimo capitolo vedrai che in questi casi un corpo può ricevere calore senza che la sua temperatura cambi.

SINTESI

- Il calore è l'energia che passa da un corpo a un altro a causa di una differenza di temperatura, spontaneamente dal più caldo al più freddo; si misura in joule. Un corpo non «contiene calore»: possiede energia interna.
- L'energia interna di un corpo è la somma delle energie cinetiche e potenziali delle sue particelle; può aumentare ricevendo calore oppure lavoro.
- La teoria del calorico immaginava il calore come un fluido che si conserva. Rumford (1798) mostrò che l'attrito produce calore senza limite; Joule, negli anni Quaranta dell'Ottocento, misurò il rapporto fisso fra lavoro e calore.
- La caloria è il calore che innalza di 1 °C la temperatura di 1 g d'acqua; l'equivalente meccanico della caloria è 1 cal ≈ 4,186 J. Le chilocalorie degli alimenti sono migliaia di calorie.
- La capacità termica di un corpo è $C = Q/\Delta T$ (J/K); il calore specifico c è la capacità termica per unità di massa (J/(kg·K)). Il calore scambiato senza passaggi di stato è $Q = mc\Delta T$.
- L'acqua ha un calore specifico molto alto: si scalda e si raffredda lentamente, e per questo modera il clima delle coste ed è usata per trasportare e accumulare energia termica.
- In un sistema isolato la somma dei calori scambiati è zero; la temperatura di equilibrio è la media delle temperature iniziali pesata con le capacità termiche dei corpi.
- Il calorimetro delle mescolanze permette di misurare un calore specifico; il calore assorbito dalle sue parti si mette in conto con l'equivalente in acqua.
- Nella conduzione l'energia attraversa un materiale senza trasporto di materia; per una parete $Q/\Delta t = kS\Delta T/d$. I metalli sono buoni conduttori, l'aria ferma e i materiali che la imprigionano sono isolanti.
- Nella convezione il calore è trasportato da un fluido in movimento, naturale (per differenze di densità) o forzato; le brezze di mare e di terra sono un esempio su grande scala.
- Nell'irraggiamento il calore è trasportato da radiazione, anche nel vuoto; ogni corpo irraggia, tanto più quanto più è caldo. Le superfici scure assorbono ed emettono più di quelle chiare e lucide.
- L'effetto serra è dovuto ai gas dell'atmosfera che assorbono e riemettono la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre; è naturale, ma le emissioni umane di anidride carbonica lo intensificano.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Il calore è:
   A. la temperatura di un corpo, espressa in joule
   B. l'energia che passa da un corpo a un altro a causa di una differenza di temperatura
   C. l'energia interna di un corpo caldo
   D. un fluido invisibile che passa dai corpi caldi a quelli freddi

2. ● Nel Sistema Internazionale il calore si misura in:
   A. calorie
   B. kelvin
   C. watt
   D. joule

3. ● Il calore specifico di una sostanza è il calore necessario per:
   A. innalzare di 1 K la temperatura di 1 kg della sostanza
   B. fondere 1 kg della sostanza
   C. innalzare di 1 K la temperatura di un corpo qualsiasi fatto di quella sostanza
   D. portare 1 kg della sostanza alla temperatura di ebollizione

4. ● Due corpi a temperature diverse sono messi a contatto in un recipiente isolato. Il calore passa:
   A. dal corpo con più energia interna a quello con meno
   B. dal corpo di massa maggiore a quello di massa minore
   C. dal corpo a temperatura più alta a quello a temperatura più bassa
   D. dal corpo con il calore specifico maggiore a quello con il calore specifico minore

5. ● L'esperimento del mulinello di Joule mostrò che:
   A. un lavoro meccanico produce lo stesso effetto del calore, in un rapporto fisso
   B. il calore è un fluido che si conserva
   C. l'acqua ha un calore specifico maggiore dei metalli
   D. la temperatura di un corpo può aumentare soltanto se riceve calore

6. ●● L'energia del Sole arriva sulla Terra per:
   A. conduzione
   B. convezione
   C. conduzione e convezione insieme
   D. irraggiamento

7. ●● In un thermos il vuoto fra le due pareti di vetro serve soprattutto a ridurre:
   A. l'irraggiamento
   B. la conduzione e la convezione
   C. l'evaporazione della bevanda
   D. la capacità termica della bevanda

8. ●● Si raddoppia lo spessore di una parete, lasciando uguali il materiale, la superficie e le temperature delle due facce. Il calore che la attraversa ogni secondo:
   A. raddoppia
   B. diventa un quarto
   C. si dimezza
   D. non cambia

Vero o falso

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

10. ● Fornendo lo stesso calore a 1 kg d'acqua e a 1 kg di ferro, entrambi inizialmente a 20 °C, il ferro raggiunge una temperatura più alta. V / F

11. ●● Una vasca d'acqua tiepida può avere più energia interna di un chiodo rovente. V / F

12. ● In una sbarra di ferro scaldata a un'estremità il calore si propaga soprattutto per convezione. V / F

13. ●● Un oggetto di metallo e uno di legno, lasciati a lungo nella stessa stanza, hanno la stessa temperatura, anche se al tatto il metallo sembra più freddo. V / F

Applicare

14. ● Esprimi in joule 250 kcal; esprimi in chilocalorie 1,0 MJ.

15. ● Quanto calore serve per scaldare 3,0 kg d'acqua da 18 °C a 45 °C?

16. ● Un blocco di rame di 0,50 kg riceve 3,85 kJ di calore senza cambiare stato. Di quanto aumenta la sua temperatura?

17. ●● Una pentola di alluminio ha una massa di 0,80 kg. Calcola la sua capacità termica e il calore che serve per scaldarla, vuota, da 20 °C a 100 °C.

18. ●● Completa. Mescolando, senza dispersioni, 3,0 L d'acqua a 80 °C con 1,0 L d'acqua a 20 °C, la temperatura di equilibrio è _____ °C; l'acqua calda cede _____ kJ di calore, e l'acqua fredda ne riceve _____ kJ.

19. ●● Leggi la Figura 7.2. Quanto vale la differenza di temperatura fra i due corpi all'istante iniziale? Dopo quanti secondi, circa, si è ridotta alla metà? Quali temperature hanno in quell'istante l'alluminio e l'acqua?

20. ●● La parete di una cella frigorifera ha una superficie di 2,0 m^2 ed è un pannello di polistirene espanso (k = 0,030 W/(m·K)) spesso 4,0 cm. Fuori ci sono 22 °C, dentro −3 °C. Quanto calore entra ogni secondo nella cella attraverso il pannello?

Problemi

21. ●● Un bollitore da 1800 W porta 1,2 L d'acqua da 20 °C a 100 °C in 4 min 10 s. a) Quanto calore ha ricevuto l'acqua? b) Quanta energia elettrica ha usato il bollitore? c) Quale frazione dell'energia elettrica è finita nell'acqua? Dove è andato il resto?

22. ●●● Un cilindro metallico di 0,200 kg viene scaldato a 95,0 °C e immerso in un calorimetro, con equivalente in acqua di 25 g, che contiene 0,400 kg d'acqua a 18,0 °C. La temperatura di equilibrio è 21,7 °C. a) Scrivi il bilancio termico, indicando il sistema e i segni dei calori. b) Calcola il calore specifico del metallo e riconoscilo con la Tabella A.4 in Appendice. c) Quale valore avresti trovato trascurando l'equivalente in acqua?

23. ●●● Un'auto di 1200 kg viaggia a 90 km/h e frena fino a fermarsi. I quattro dischi dei freni sono di ghisa (calore specifico come quello del ferro) e hanno in tutto una massa di 32 kg. a) Calcola l'energia cinetica iniziale dell'auto (Fisica 3, capitolo 16). b) Se il 90% di questa energia diventa energia interna dei dischi, di quanto aumenta la loro temperatura? c) Esprimi l'aumento anche in kelvin e spiega perché il valore è lo stesso.

24. ● Una cascata è alta 80 m. Se tutta l'energia potenziale dell'acqua che cade diventasse energia interna dell'acqua stessa, di quanto si scalderebbe l'acqua ai piedi della cascata? Perché il risultato non dipende dalla massa d'acqua?

25. ●● Il vetrocamera di una finestra di 1,5 m^2 ha fra le due lastre uno strato d'aria ferma spesso 12 mm (k = 0,026 W/(m·K)). La differenza di temperatura fra le due lastre è di 15 K. a) Considerando soltanto lo strato d'aria, quanto calore attraversa la finestra ogni secondo? b) Quanta energia si perde in 10 ore, in joule e in kWh?

26. ●●● Si versano 200 g di caffè a 80 °C in una tazza di vetro di 300 g che si trova a 20 °C (calore specifico del vetro nella Tabella A.4 in Appendice); poi si aggiungono 50 g di latte preso dal frigorifero, a 5 °C. Considera caffè e latte come acqua, trascura le dispersioni verso l'ambiente e supponi che la tazza raggiunga sempre la temperatura della bevanda. a) Qual è la temperatura del caffè dopo che si è stabilito l'equilibrio con la tazza? b) E dopo l'aggiunta del latte? c) Quale dei due passaggi raffredda di più il caffè?

Ragionare e argomentare

27. ●● Stima. Quanta energia serve per scaldare l'acqua di una doccia di cinque minuti? Stima la portata della doccia (in litri al minuto) e le temperature dell'acqua fredda e di quella della doccia; esprimi il risultato in joule e in kWh.

28. ●●● Commenta la fonte. Nel *Novum Organum* (1620, libro II, aforisma 20) Francesco Bacone, dopo aver raccolto e confrontato molti casi di corpi caldi e freddi, arriva a questa definizione: *calor est motus expansivus, cohibitus, et nitens per partes minores*, «il calore è un moto espansivo, trattenuto, e che si esercita attraverso le parti più piccole dei corpi» (traduzione della redazione). Che cosa sostiene Bacone? Che cosa c'è di giusto alla luce di questo capitolo, e in che cosa la fisica di oggi usa le parole in modo diverso? Quale esperimento dell'Ottocento ha dato a un'idea simile una base quantitativa?

29. ●● Trova l'errore. Uno studente scrive: «Mescolo 1 kg d'acqua a 80 °C con 1 kg di pallini di ferro a 20 °C. Le masse sono uguali, quindi la temperatura finale è la media: 50 °C». Individua l'errore e calcola la temperatura di equilibrio corretta.

30. ●●● Progetta un esperimento. Vuoi stabilire quale di due tazze, una di ceramica e una termica a doppia parete, mantiene calda più a lungo una bevanda. Descrivi materiali, procedimento e misure; spiega come rappresenteresti i dati con un grafico e che forma ti aspetti per le curve. Quali grandezze devi mantenere uguali nelle due prove perché il confronto sia corretto?

PER APPROFONDIRE

- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: le pagine sul calore come sostanza e sull'equivalente meccanico mostrano perché il calorico fu abbandonato.
- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: il capitolo sul moto degli atomi spiega con semplicità che cosa sono la temperatura e l'energia interna.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo su temperatura, calore e primo principio, con molti esercizi di calorimetria e di conduzione.
- [CAR] Sadi Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu*: un grande testo del 1824 ancora scritto nel linguaggio del calorico, che ritroverai nel capitolo 11.

Glossario del capitolo

Brezza di mare e di terra
Venti costieri dovuti alla convezione: di giorno dal mare verso la terra, di notte dalla terra verso il mare.

Calore
Energia che passa da un corpo a un altro a causa di una differenza di temperatura, spontaneamente dal più caldo al più freddo; si misura in joule.

Calore specifico
Calore necessario per innalzare di 1 K la temperatura di 1 kg di una sostanza: $Q = m\,c\,\Delta T$; si misura in J/(kg·K).

Caloria
Unità di calore non appartenente al SI: il calore che innalza di 1 °C la temperatura di 1 g d'acqua; 1 cal ≈ 4,186 J. La chilocaloria vale 1000 cal.

Calorimetria
Studio e misura delle quantità di calore scambiate fra i corpi.

Calorimetro
Recipiente isolato, con termometro e agitatore, in cui si fanno avvenire scambi di calore per misurare calori specifici o quantità di calore.

Capacità termica
Rapporto fra il calore ricevuto da un corpo e il suo aumento di temperatura: $C = Q/\Delta T$, in J/K.

Conducibilità termica
Costante k di un materiale nella legge di Fourier $Q/\Delta t = k\,S\,\Delta T/d$; si misura in W/(m·K).

Conduzione
Propagazione del calore attraverso un materiale, per urti fra le particelle, senza trasporto di materia.

Convezione
Propagazione del calore in un fluido per mezzo del movimento del fluido stesso; è naturale se dovuta a differenze di densità, forzata se prodotta da ventole o pompe.

Effetto serra
Riscaldamento della superficie terrestre dovuto ai gas dell'atmosfera che assorbono e riemettono la radiazione infrarossa emessa dal suolo.

Equivalente in acqua
Massa d'acqua che ha la stessa capacità termica delle parti di un calorimetro (recipiente, agitatore, termometro).

Equivalente meccanico della caloria
Il lavoro che produce lo stesso effetto di 1 cal di calore: 1 cal ≈ 4,186 J. Fu misurato da Joule.

Irraggiamento
Propagazione del calore per mezzo di radiazione, che può attraversare anche il vuoto; ogni corpo irraggia, tanto più quanto più è caldo.

Isolante termico
Materiale con bassa conducibilità termica, come il legno, la lana, i materiali espansi e l'aria ferma.

Radiazione infrarossa
Radiazione invisibile emessa soprattutto dai corpi a temperatura ambiente; è quella rivelata dai termometri a infrarossi e dalle termocamere.

Temperatura di equilibrio
Temperatura comune raggiunta da corpi a contatto in un sistema isolato; è la media delle temperature iniziali pesata con le capacità termiche.

Teoria del calorico
Teoria del Settecento secondo cui il calore era un fluido invisibile e senza peso, il calorico, che si conserva; fu abbandonata nell'Ottocento.

Soluzioni

1. B. Il calore è energia in transito dovuta a una differenza di temperatura; non è la temperatura né l'energia posseduta dal corpo, e non è un fluido (teoria del calorico, abbandonata).

2. D. Il calore è energia e si misura in joule; la caloria non appartiene al SI, il watt è l'unità di potenza.

3. A. Per definizione $c = Q/(m\Delta T)$, riferito a 1 kg e a 1 K. La C descrive la capacità termica, che dipende dalla massa del corpo.

4. C. Il calore va spontaneamente dal corpo a temperatura più alta a quello a temperatura più bassa, qualunque siano le masse e le energie interne.

5. A. Joule trovò che lo stesso aumento di temperatura dell'acqua corrisponde sempre allo stesso lavoro, in rapporto fisso (1 cal ≈ 4,186 J).

6. D. Fra il Sole e la Terra c'è uno spazio quasi vuoto, dove conduzione e convezione non sono possibili: l'energia arriva come radiazione.

7. B. Senza materia fra le pareti non c'è conduzione né convezione; l'irraggiamento è ridotto dalle facce argentate.

8. C. Per la legge di Fourier $Q/\Delta t = kS\Delta T/d$: il flusso è inversamente proporzionale allo spessore.

9. F. Il calore è energia in transito: un corpo caldo ha più energia interna (a parità di massa e sostanza), non «più calore».

10. V. Il ferro ha un calore specifico quasi dieci volte minore (450 contro 4186 J/(kg·K)): con lo stesso calore la sua temperatura sale circa nove volte di più.

11. V. L'energia interna dipende anche dalla quantità di materia: centinaia di litri d'acqua tiepida hanno molta più energia interna di un chiodo di pochi grammi, anche se il chiodo è molto più caldo.

12. F. La convezione richiede un fluido che si muova; nella sbarra, che resta ferma, il calore si propaga per conduzione.

13. V. All'equilibrio termico hanno la temperatura della stanza; il metallo, buon conduttore, sottrae calore alla pelle più rapidamente del legno e per questo sembra più freddo.

14. 250 kcal · 4186 J/kcal ≈ $1{,}05 \times 10^6$ J; $1{,}0 \times 10^6$ J / 4186 J/kcal ≈ $2{,}4 \times 10^2$ kcal.

15. $Q = m\,c\,\Delta T = 3{,}0$ kg · 4186 J/(kg·K) · 27 K ≈ $3{,}4 \times 10^5$ J.

16. $\Delta T = Q/(m\,c) = 3850$ J / (0,50 kg · 385 J/(kg·K)) = 20 K, cioè 20 °C.

17. $C = m\,c = 0{,}80$ kg · 900 J/(kg·K) = 720 J/K; $Q = C\,\Delta T =$ 720 J/K · 80 K ≈ $5{,}8 \times 10^4$ J.

18. Stessa sostanza, quindi $t_e = (3{,}0 \cdot 80 + 1{,}0 \cdot 20)/4{,}0$ °C = 65 °C. L'acqua calda cede $|Q| = 3{,}0$ kg · 4186 J/(kg·K) · 15 K ≈ $1{,}9 \times 10^2$ kJ (188 kJ); l'acqua fredda riceve 1,0 kg · 4186 J/(kg·K) · 45 K ≈ 188 kJ, lo stesso calore.

19. All'inizio la differenza è 90 °C − 20 °C = 70 °C. Si riduce a 35 °C dopo circa 35 s (sono accettabili letture fra 30 e 40 s): in quell'istante l'alluminio è a circa 65 °C e l'acqua a circa 31 °C.

20. $\Delta T = 22$ °C − (−3 °C) = 25 K; $Q/\Delta t = 0{,}030$ W/(m·K) · 2,0 m^2 · 25 K / 0,040 m ≈ 38 W.

21. a) $Q = 1{,}2$ kg · 4186 J/(kg·K) · 80 K ≈ $4{,}0 \times 10^5$ J. b) $E = P\,\Delta t = 1800$ W · 250 s = $4{,}5 \times 10^5$ J. c) $4{,}02 \times 10^5$ / $4{,}5 \times 10^5 \approx 0{,}89$, circa l'89%. Il resto ha scaldato il bollitore (resistenza, pareti, coperchio) e si è disperso nell'aria per conduzione, convezione e irraggiamento.

22. a) Sistema: cilindro, acqua e calorimetro, isolato. $Q_{acqua} = (0{,}400 + 0{,}025)$ kg · 4186 J/(kg·K) · (21,7 − 18,0) K > 0; $Q_{met} = 0{,}200$ kg · c · (21,7 − 95,0) K < 0; $Q_{acqua} + Q_{met} = 0$. b) $Q_{acqua} \approx 6{,}58 \times 10^3$ J; $c = 6{,}58 \times 10^3$ J / (0,200 kg · 73,3 K) ≈ 449 J/(kg·K) ≈ $4{,}5 \times 10^2$ J/(kg·K): è ferro. c) Con 0,400 kg: $c = 0{,}400 \cdot 4186 \cdot 3{,}7$ / (0,200 · 73,3) J/(kg·K) ≈ 423 J/(kg·K), circa il 6% in meno.

23. a) $v = 90/3{,}6$ m/s = 25 m/s; $K = \frac{1}{2} \cdot 1200$ kg $\cdot$ $(25 \text{ m/s})^2 = 3{,}75 \times 10^5$ J. b) $\Delta T = 0{,}90 \cdot 3{,}75 \times 10^5$ J / (32 kg $\cdot$ 450 J/(kg·K)) ≈ 23 K. c) $\Delta T \approx 23$ °C = 23 K: le due scale hanno gradi della stessa ampiezza e differiscono solo per lo zero ($T = t + 273{,}15$), che in una differenza si elide.

24. $m\,g\,h = m\,c\,\Delta T$, quindi $\Delta T = g\,h/c = 9{,}8 \text{ m/s}^2 \cdot 80$ m / 4186 J/(kg·K) ≈ 0,19 K. La massa compare in entrambi i membri e si semplifica: ogni kilogrammo d'acqua riceve la stessa energia per kilogrammo, $g\,h$. Il valore reale è ancora minore, perché parte dell'energia si disperde.

25. a) $Q/\Delta t = 0{,}026$ W/(m·K) $\cdot$ 1,5 $\text{m}^2 \cdot 15$ K / 0,012 m ≈ 49 W. b) $Q = 48{,}75$ W $\cdot$ 36 000 s ≈ $1{,}8 \times 10^6$ J ≈ 0,49 kWh.

26. a) Capacità termiche: tazza 0,300 kg $\cdot$ 840 J/(kg·K) = 252 J/K; caffè 0,200 kg $\cdot$ 4186 J/(kg·K) ≈ 837 J/K. $t_e = (252 \cdot 20 + 837 \cdot 80)/(252 + 837)$ °C ≈ 66 °C. b) Si aggiunge il latte (0,050 kg $\cdot$ 4186 J/(kg·K) ≈ 209 J/K, a 5 °C) al sistema tazza + caffè (1089 J/K, a 66,1 °C): $t_e = (1089 \cdot 66{,}1 + 209 \cdot 5)/(1089 + 209)$ °C ≈ 56 °C. c) La tazza fredda abbassa la temperatura di circa 14 °C, il latte di circa 10 °C: raffredda di più la tazza, perché la sua capacità termica è maggiore di quella del latte, anche se il latte è più freddo.

27. Traccia. Con una portata di circa 8 L/min, in 5 min servono circa 40 L, cioè 40 kg d'acqua; da 15 °C a 40 °C: $Q = 40$ kg $\cdot$ 4186 J/(kg·K) $\cdot$ 25 K ≈ 4×10^6 J, poco più di 1 kWh. Con portate fra 6 e 12 L/min il risultato varia fra circa 3 e 6 MJ: conta l'ordine di grandezza, alcuni milioni di joule.

28. Traccia. Bacone sostiene che il calore non è una sostanza ma un moto, un'agitazione delle parti più piccole dei corpi, che tende a dilatarli («espansivo») ed è trattenuta all'interno del corpo. Di giusto c'è l'idea centrale: l'energia interna di un corpo è legata al moto disordinato delle sue particelle, e la temperatura alla loro agitazione; i corpi si dilatano scaldandosi (capitolo 6). Oggi però chiamiamo «calore» non il moto delle particelle, ma l'energia che passa da un corpo all'altro per una differenza di temperatura; e il moto delle particelle non è soltanto «espansivo». L'idea è qualitativa, ottenuta confrontando casi (il metodo induttivo che studi in filosofia); la base quantitativa la diedero gli esperimenti di Rumford e soprattutto il mulinello di Joule, che misurò il rapporto fra lavoro meccanico e calore.

29. L'errore è usare la media semplice: la temperatura di equilibrio è la media pesata con le capacità termiche $m\,c$, e il calore specifico dell'acqua è quasi dieci volte quello del ferro. $t_e = (1 \cdot 4186 \cdot 80 + 1 \cdot 450 \cdot 20)/(4186 + 450)$ °C ≈ 74 °C: l'acqua si raffredda di soli 6 °C circa, il ferro si scalda di circa 54 °C.

30. Traccia. Materiali: le due tazze, acqua calda da un bollitore, un termometro digitale, un cronometro, una bilancia o un cilindro graduato. Procedimento: versare in ciascuna la stessa massa d'acqua (per esempio 200 g) alla stessa temperatura iniziale (per esempio 80 °C), nella stessa stanza, con o senza coperchio in entrambe; misurare la temperatura ogni minuto per 30–40 minuti, agitando prima di ogni lettura. Grafico: temperatura in funzione del tempo per le due tazze sugli stessi assi; ci si aspetta due curve decrescenti, più ripide all'inizio, quando la differenza con l'ambiente è grande, che tendono alla temperatura della stanza; la tazza termica dà la curva meno ripida. Vanno mantenuti uguali massa e temperatura iniziale dell'acqua, ambiente, presenza del coperchio, posizione del termometro; conviene anche scaldare prima le tazze o partire con tazze alla stessa temperatura, perché la capacità termica della tazza assorbe parte del calore iniziale.