CAPITOLO

12

Il calore e la sua propagazione

Il calore non è qualcosa che un corpo possiede: è energia in viaggio, e viaggia sempre dal caldo verso il freddo.

OBIETTIVI

1. Definire il calore come energia trasferita a causa di una differenza di temperatura e distinguerlo dalla temperatura e dall'energia interna.
2. Descrivere l'esperimento di Joule e usare l'equivalente meccanico del calore, 1 cal = 4,186 J.
3. Calcolare il calore scambiato con $Q = mc\Delta T$, distinguendo capacità termica e calore specifico.
4. Calcolare la temperatura di equilibrio di due corpi in un sistema isolato e usare il calorimetro delle mescolanze.
5. Riconoscere conduzione, convezione e irraggiamento e calcolare il calore trasmesso per conduzione attraverso una parete.
6. Misurare in laboratorio il calore specifico di un metallo, con la sua incertezza.

INDICE DEL CAPITOLO

12.1 Il calore, energia in transito 2
12.2 L'esperimento di Joule e l'equivalente meccanico del calore 3
12.3 Capacità termica e calore specifico 5
12.4 L'equilibrio termico fra due corpi 7
12.5 La propagazione del calore 12

Fisica 2 · Parte IV · I fenomeni termici · versione 1.0
Capitolo 12: Il calore e la sua propagazione · pagine 295–316 del volume completo · estratto per lo studio

Metti una pentola d'acqua sul fornello: dopo qualche minuto l'acqua è calda. Strofina con forza le mani: si scaldano anche loro, senza nessuna fiamma. Appoggia una lattina fredda sul tavolo: dopo un'ora ha la temperatura della stanza. In tutti e tre i casi la temperatura di un corpo cambia, ma per ragioni diverse: nel primo e nel terzo c'è uno scambio di **calore** con un corpo a temperatura diversa, nel secondo c'è un **lavoro** compiuto dalle forze di attrito.

Nel capitolo 10 hai visto che l'attrito trasforma energia meccanica in energia interna, e nel capitolo 11 hai imparato a misurare la temperatura e a riconoscere l'equilibrio termico. Ora mettiamo insieme le due idee: il calore è energia, e impareremo a calcolare quanta ne scambiano i corpi e come si propaga. Il calore specifico e la formula $Q = mc\Delta T$, già incontrati in *Scienze 1*, diventano qui strumenti per misure e problemi.

12.1 Il calore, energia in transito

12.1.1 Che cos'è il calore

Quando due corpi a temperature diverse vengono messi a contatto, il più caldo si raffredda e il più freddo si scalda, finché raggiungono l'equilibrio termico (capitolo 11). Qualcosa passa dal primo al secondo: è energia. Chiamiamo **calore** l'energia che si trasferisce da un corpo a un altro **a causa di una differenza di temperatura**. Spontaneamente il calore passa sempre dal corpo a temperatura più alta a quello a temperatura più bassa, mai il contrario.

Il calore si indica con Q e, come ogni energia, nel SI si misura in **joule**. Per i segni seguiamo una convenzione che useremo in tutto il libro: **$Q > 0$ se il corpo assorbe calore, $Q < 0$ se lo cede**.

Attenzione a una distinzione che il linguaggio comune confonde. Un corpo non «contiene calore», come non «contiene lavoro». Un corpo possiede energia interna, l'energia dei moti disordinati e delle interazioni delle sue particelle (capitolo 10); il calore è energia **in transito**, che esiste solo mentre passa da un corpo all'altro. Quando il passaggio è finito, nel corpo che l'ha ricevuto c'è più energia interna, non «più calore».

ERRORE FREQUENTE

«Il tè bollente contiene molto calore.» È un modo di dire, ma in fisica è sbagliato. Il tè ha una temperatura alta e una certa **energia interna**; diventa calore solo la parte di energia che il tè **cede** alla tazza, all'aria, alla tua bocca. Anche la frase «il calore sale» va corretta: a salire è l'aria calda, che si muove perché è meno densa (paragrafo sulla convezione); il calore non ha una direzione preferita, ma va sempre dal caldo verso il freddo.

12.1.2 Due modi per scaldare un corpo

L'esperienza delle mani strofinate mostra che la temperatura di un corpo può aumentare anche senza che riceva calore: basta compiere su di esso un lavoro, per esempio contro l'attrito. Per l'acqua di una pentola il risultato è identico se la scaldiamo con una fiamma o se la agitiamo a lungo e con forza: guardando solo l'acqua alla fine, è impossibile dire quale dei due metodi abbiamo usato. Calore e lavoro sono due **modi diversi di trasferire energia** a un corpo, e producono lo stesso effetto: un aumento della sua energia interna.

Per secoli, però, il calore è stato misurato con un'unità propria, legata all'acqua. La **caloria** (cal) è la quantità di calore che serve per innalzare da 14,5 °C a 15,5 °C la temperatura di 1 g di acqua. Se il calore è energia, deve esistere un numero fisso di joule che corrisponde a una caloria: trovarlo fu uno dei grandi risultati della fisica dell'Ottocento.

APPROFONDIMENTO

Il calorico e i cannoni di Rumford

Fra il Settecento e l'inizio dell'Ottocento molti scienziati pensavano che il calore fosse una sostanza: un fluido invisibile e senza peso, chiamato **calorico**, che scorreva dai corpi caldi a quelli freddi e non si creava né si distruggeva. Antoine Lavoisier lo inserì fra le sostanze semplici. L'idea spiegava bene l'equilibrio termico e le mescolanze: le regole della calorimetria nacquero proprio in quel quadro.

Le prime obiezioni forti vennero dall'arsenale di Monaco di Baviera, dove si fabbricavano cannoni scavando con una punta d'acciaio un blocco di metallo. Benjamin Thompson, conte di Rumford, che dirigeva l'arsenale, notò che il metallo e i trucioli diventavano caldissimi. Preparò allora un esperimento: fece girare, con la forza di cavalli, una punta smussata contro un cilindro di bronzo immerso nell'acqua, e dopo alcune ore di lavoro l'acqua arrivò a bollire, senza nessun fuoco. Nel 1798 Rumford presentò alla Royal Society di Londra la sua conclusione: finché i cavalli continuavano a lavorare il calore continuava a prodursi, apparentemente senza limite, e una sostanza contenuta in una quantità finita di metallo non poteva uscirne all'infinito. Il calore, secondo Rumford, era un movimento, non una sostanza.

Rumford non riuscì a convincere tutti, perché non aveva una misura che collegasse il lavoro dei cavalli al calore prodotto. Quella misura arrivò mezzo secolo dopo, con Joule.

12.2 L'esperimento di Joule e l'equivalente meccanico del calore

12.2.1 Il mulinello di Joule

James Prescott Joule, figlio di un birraio di Salford, vicino a Manchester, dedicò gli anni Quaranta dell'Ottocento a una serie di esperimenti per misurare quanto lavoro serve a produrre un

certo riscaldamento. Il più famoso è quello del **mulinello di Joule**, schematizzato nella Figura 12.1.

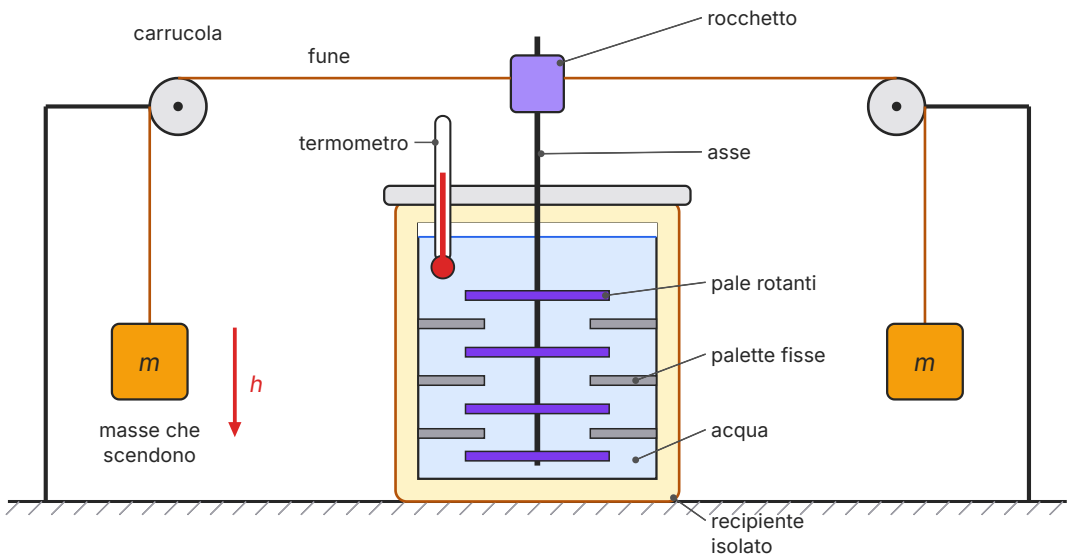


Figura 12.1 Schema dell'apparato di Joule. Le due masse, scendendo lentamente di un'altezza *h*, svolgono le funi dal rocchetto e fanno girare l'asse; le pale rotanti agitano l'acqua, frenate dalle palette fisse, e il termometro misura l'aumento di temperatura. Proporzioni non in scala.

Un recipiente ben isolato contiene una massa nota di acqua. Al centro gira un asse con alcune pale; fra una pala e l'altra, fissate alle pareti, ci sono delle palette che impediscono all'acqua di girare tutta insieme e la costringono a rimescolarsi in modo disordinato. L'asse è messo in rotazione da due masse che scendono, appese a funi avvolte su un rocchetto. Le masse scendono **lentamente e a velocità quasi costante**, perché l'acqua frena le pale: quindi la loro energia cinetica resta piccola, e quasi tutto il lavoro compiuto dal peso, mgh per ogni massa, viene trasmesso attraverso le pale all'acqua. Arrivate in basso, le masse vengono riavvolte e la discesa si ripete, anche decine di volte.

È lo stesso fenomeno della frenata del capitolo 10: le forze di attrito interno dell'acqua, la sua viscosità, trasformano energia meccanica in energia interna. Joule misurava da una parte il lavoro, dalle masse e dalle altezze, dall'altra l'aumento di temperatura dell'acqua, e quindi il numero di calorie che avrebbe prodotto lo stesso riscaldamento. Con apparati diversi, anche con mercurio al posto dell'acqua, trovò sempre lo stesso rapporto fra lavoro e calorie. È l'**equivalente meccanico del calore**; il valore che ottenne differisce di meno dell'1% da quello moderno:

$$1\ \text{cal} = 4{,}186\ \text{J} \qquad 1\ \text{kcal} = 4186\ \text{J}$$

Il risultato di Joule dice che **il calore è una forma di trasferimento di energia**: se un lavoro di 4,186 J produce sempre lo stesso effetto di una caloria di calore, calore e lavoro sono due facce

della stessa grandezza. Per questo oggi il calore si misura in joule, e l'unità SI dell'energia porta il nome di Joule. La kilocaloria, la «Caloria» degli alimenti che hai incontrato nel capitolo 9, è l'unità di mille calorie.

ESEMPIO SVOLTO

Un mulinello in laboratorio

Problema. In una versione didattica dell'esperimento di Joule una massa di 20,0 kg scende lentamente di 2,00 m e la discesa viene ripetuta 25 volte. Il recipiente contiene 0,800 kg di acqua. a) Calcola il lavoro compiuto dal peso. b) Trascurando il riscaldamento del recipiente e delle pale e ogni perdita, di quanto aumenta la temperatura dell'acqua? c) Quante calorie corrispondono a quel lavoro?

Ragionamento. Sulla massa che scende a velocità costante agiscono il peso, verso il basso, e la tensione della fune, verso l'alto, che si equilibrano. Il lavoro del peso in una discesa è mgh; poiché l'energia cinetica della massa non cambia, questo lavoro finisce, attraverso la fune e le pale, all'acqua. L'acqua si scalda come se ricevesse una quantità di calore uguale al lavoro.

Calcolo. a) $W = 25 \cdot mgh = 25 \times 20{,}0\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{m/s}^2 \times 2{,}00\ \text{m} = 9{,}8 \times 10^3\ \text{J}$. b) Con la relazione $Q = mc\Delta T$ del paragrafo seguente, $\Delta T = W/(mc) = 9800\ \text{J} / (0{,}800\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)}) \approx 2{,}9\ \text{K}$, cioè 2,9 °C. c) $9800\ \text{J} / (4{,}186\ \text{J/cal}) \approx 2{,}3 \times 10^3\ \text{cal}$.

Controllo. Cinquanta metri complessivi di discesa di una massa di 20 kg scaldano meno di un litro d'acqua di appena 3 gradi. Per questo Joule dovette misurare le temperature con grande precisione.

12.3 Capacità termica e calore specifico

12.3.1 Da che cosa dipende il calore assorbito

Sullo stesso fornello, scaldare l'acqua di 40 °C invece che di 20 °C, o scaldarne il doppio, richiede un tempo doppio. Le misure confermano che, finché un corpo non cambia stato, il calore che assorbe è **direttamente proporzionale** alla variazione della sua temperatura $\Delta T = T_{\text{finale}} - T_{\text{iniziale}}$ e alla sua massa. Dipende però anche dalla sostanza: con la stessa energia un kilogrammo di ferro si scalda circa nove volte più di un kilogrammo di acqua.

Per un corpo dato si chiama **capacità termica** C il rapporto fra il calore assorbito e la variazione di temperatura che ne risulta:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \qquad (\text{J/K})$$

La capacità termica è il calore che fa aumentare di 1 K, o di 1 °C, la temperatura di **quel corpo**. Un corpo con grande capacità termica cambia temperatura con difficoltà: assorbe o cede molto

calore per pochi gradi. Ricorda che una variazione di temperatura ha lo stesso valore in kelvin e in gradi Celsius (capitolo 11), quindi J/K e J/°C sono la stessa unità.

La capacità termica di un corpo omogeneo è proporzionale alla sua massa: una vasca da bagno piena ha una capacità termica molto maggiore di un bicchiere d'acqua. Il rapporto fra capacità termica e massa non dipende più dal corpo, ma solo dalla sostanza di cui è fatto; si chiama **calore specifico** c:

$$c = \frac{C}{m} \qquad Q = mc\Delta T = C\Delta T \qquad (c \text{ in J/(kg·K)})$$

Il calore specifico è il calore che serve per innalzare di 1 K la temperatura di 1 kg della sostanza. In *Scienze 1* lo hai espresso in J/(g · °C): poiché 1 kg = 1000 g, i valori in J/(kg·K) sono mille volte più grandi; per l'acqua 4,186 J/(g · °C) = 4186 J/(kg·K). La Tabella 12.1 riporta alcuni valori.

Tabella 12.1 Calori specifici di alcune sostanze a pressione atmosferica, a temperatura ambiente salvo diversa indicazione (valori arrotondati; per l'acqua il valore a 15 °C).

Sostanza	c (J/(kg·K))	Sostanza	c (J/(kg·K))
acqua	4186	alluminio	900
alcol etilico	circa 2440	vetro comune	circa 840
ghiaccio (vicino a 0 °C)	circa 2100	ferro	450
aria (a pressione costante)	circa 1005	rame	385
argento	235	piombo	129

La formula $Q = mc\Delta T$ vale con i segni: se la temperatura sale, $\Delta T > 0$ e $Q > 0$ (il corpo assorbe calore); se scende, $\Delta T < 0$ e $Q < 0$ (il corpo cede calore). Vale invece **solo finché il corpo non cambia stato**: mentre il ghiaccio fonde o l'acqua bolle, il corpo assorbe calore senza che la sua temperatura cambi, e serve un'altra relazione, che vedrai nel capitolo 13. Il calore specifico varia un poco con la temperatura: nei problemi lo consideriamo costante.

12.3.2 L'acqua, un serbatoio di energia

Nella Tabella 12.1 l'acqua ha il calore specifico più alto, circa cinque volte quello del vetro e più di dieci volte quello del rame. Per scaldarla serve molta energia e, quando si raffredda, ne restituisce altrettanta. Questa proprietà ha conseguenze importanti nella natura e nella tecnologia.

COLLEGAMENTI

Il mare, i motori e la borsa dell'acqua calda

Clima. I mari e i grandi laghi si scaldano lentamente d'estate e si raffreddano lentamente d'inverno: per questo le località costiere hanno estati meno torride e inverni più miti di quelle dell'interno alla stessa latitudine. In numeri: per scaldare di un grado un metro cubo d'acqua, cioè circa 1000 kg, servono circa $4{,}2 \times 10^6$ J, mentre un metro cubo di aria, circa 1,2 kg, si scalda di un grado con poco più di 1×10^3 J, migliaia di volte meno.

Tecnologia. Nei motori delle auto il liquido di raffreddamento, formato in gran parte da acqua, circola attorno ai cilindri, ne assorbe energia e la porta al radiatore, dove la cede all'aria. Negli impianti di riscaldamento l'acqua porta energia dalla caldaia ai termosifoni: a parità di massa, trasporta molta energia per ogni grado.

Vita quotidiana. Una borsa dell'acqua calda resta tiepida per ore: un litro d'acqua che si raffredda da 60 °C a 30 °C cede circa $1{,}3 \times 10^5$ J.

12.4 L'equilibrio termico fra due corpi

12.4.1 Calore ceduto e calore assorbito

Mettiamo a contatto due corpi a temperature diverse, T_1 e T_2, e isoliamoli dall'ambiente: un **sistema isolato** è un insieme di corpi che non scambiano energia con l'esterno. Il calore passa dal più caldo al più freddo finché i due corpi raggiungono la stessa temperatura, la **temperatura di equilibrio** T_e; a quel punto lo scambio si ferma (equilibrio termico, capitolo 11). Poiché l'energia si conserva e nessuna energia esce dal sistema, **il calore ceduto dal corpo caldo è uguale al calore assorbito dal corpo freddo**. Con la nostra convenzione dei segni il primo è negativo e il secondo positivo, e la loro somma è zero:

$$Q_1 + Q_2 = 0 \qquad m_1 c_1 (T_e - T_1) + m_2 c_2 (T_e - T_2) = 0$$

Risolvendo l'equazione rispetto a T_e, che compare al primo grado, si ottiene:

$$T_e = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$$

La temperatura di equilibrio è una **media pesata** delle due temperature iniziali, in cui ciascuna conta in proporzione alla capacità termica mc del corpo che la possiede. Ne seguono tre proprietà utili per controllare i risultati. T_e è sempre compresa fra T_1 e T_2. È più vicina alla temperatura del corpo con capacità termica maggiore: un cucchiaino caldo immerso in una vasca d'acqua non ne cambia quasi la temperatura. Se le due capacità termiche sono uguali, per esempio due masse uguali della stessa sostanza, T_e è la media aritmetica. Poiché è una media, la formula dà lo stesso risultato con le temperature in gradi Celsius o in kelvin.

DA RICORDARE

Bilancio dell'equilibrio termico. In un sistema isolato, senza passaggi di stato, la somma dei calori scambiati è zero: $\Sigma Q = 0$, con $Q = mc(T_e - T_{\text{iniziale}})$ per ogni corpo. Il segno di ogni termine viene da solo: negativo per i corpi che si raffreddano, positivo per quelli che si scaldano. Controllo finale: T_e deve cadere fra la temperatura più bassa e quella più alta.

ESEMPIO SVOLTO

Un blocco di alluminio nell'acqua

Problema. Un blocco di alluminio di 0,500 kg a 95,0 °C viene immerso in 1,00 kg di acqua a 18,0 °C, in un recipiente isolato di capacità termica trascurabile. Calcola la temperatura di equilibrio e il calore scambiato.

Calcolo. Capacità termiche: alluminio 0,500 kg × 900 J/(kg·K) = 450 J/K; acqua 1,00 kg × 4186 J/(kg·K) = 4186 J/K. T_e = (450 × 95,0 + 4186 × 18,0) / (450 + 4186) °C = 118 098 / 4636 °C ≈ 25,5 °C. Calore scambiato: $Q_{\text{alluminio}}$ = 450 J/K × (25,5 − 95,0) K ≈ $-3{,}13 \times 10^4$ J; Q_{acqua} = 4186 J/K × (25,5 − 18,0) K ≈ $+3{,}13 \times 10^4$ J.

Controllo. La somma è zero, come deve. La temperatura finale è molto più vicina a quella iniziale dell'acqua, che ha una capacità termica più di nove volte maggiore: l'alluminio scende di circa 70 gradi, l'acqua sale di 7,5.

12.4.2 Come si arriva all'equilibrio

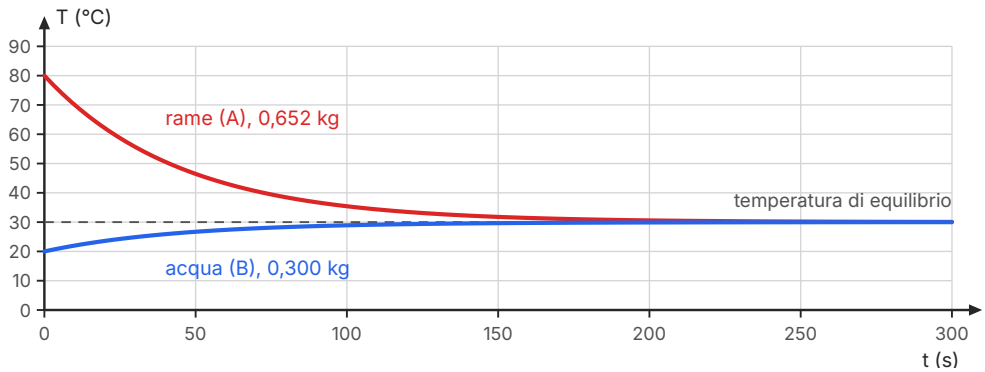


Figura 12.2 Temperature di un blocco di rame di 0,652 kg, inizialmente a 80 °C, e di 0,300 kg di acqua, inizialmente a 20 °C, in un recipiente isolato. La temperatura di equilibrio, 30 °C, è data dal bilancio dei calori; l'andamento nel tempo è calcolato con un modello semplice di scambio, e la scala dei tempi è indicativa.

La formula dice dove si arriva, non quanto tempo serve. La Figura 12.2 mostra le temperature di un blocco di rame e dell'acqua in cui è immerso, in funzione del tempo: le due curve si avvi-

cinano rapidamente all'inizio, quando la differenza di temperatura è grande e il calore passa in fretta, poi sempre più lentamente, e tendono allo stesso valore. Il tempo dipende da come avviene lo scambio; la temperatura finale no.

ESEMPIO SVOLTO

Riconoscere un metallo da un grafico

Problema. Usa la Figura 12.2. a) Leggi le temperature iniziali dei due corpi e la temperatura di equilibrio. b) Calcola il calore assorbito dall'acqua. c) Ricava la capacità termica e il calore specifico del metallo, e confrontalo con la Tabella 12.1.

Lettura. a) Il metallo parte da 80 °C, l'acqua da 20 °C; entrambe le curve tendono a 30 °C.

Calcolo. b) $Q_{\text{acqua}} = 0{,}300\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times (30 - 20)\ \text{K} \approx 1{,}26 \times 10^4\ \text{J}$. c) Il metallo cede la stessa quantità di calore: $-1{,}26 \times 10^4\ \text{J} = C_{\text{metallo}} \times (30 - 80)\ \text{K}$, quindi $C_{\text{metallo}} \approx 1{,}26 \times 10^4\ \text{J} / 50\ \text{K} \approx 251\ \text{J/K}$ e $c = 251\ \text{J/K} / 0{,}652\ \text{kg} \approx 385\ \text{J/(kg·K)}$: è il valore del rame.

Osservazione. Il grafico mostra la regola della media pesata: il metallo scende di 50 gradi, l'acqua sale di 10. Il rapporto fra le variazioni di temperatura, 5, è il rapporto inverso fra le capacità termiche: l'acqua ha una capacità termica cinque volte maggiore di quella del blocco.

12.4.3 Il calorimetro delle mescolanze

Per misurare il calore specifico di una sostanza si usa il metodo appena visto: si immerge un campione caldo della sostanza in una massa nota di acqua fredda e si misura la temperatura di equilibrio. Lo strumento è il **calorimetro delle mescolanze** (Figura 12.3): un recipiente interno di metallo sottile, contenuto in un vaso esterno e separato da esso da uno strato isolante, chiuso da un coperchio attraverso il quale passano un termometro e un agitatore. L'isolamento riduce gli scambi con l'ambiente; l'agitatore rende uniforme la temperatura dell'acqua.

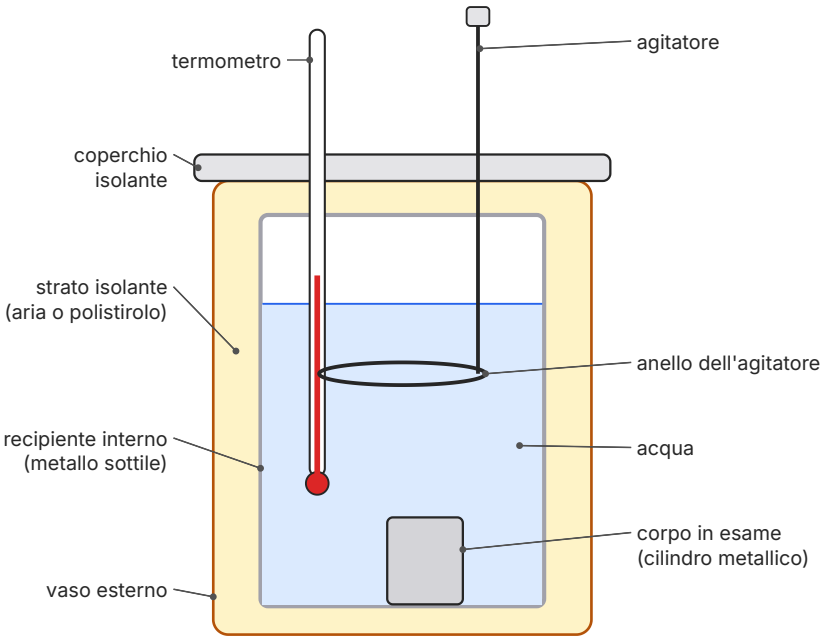


Figura 12.3 Sezione schematica di un calorimetro delle mescolanze. Lo strato isolante e il coperchio riducono gli scambi di calore con l'ambiente; l'agitatore, mosso su e giù, rende uniforme la temperatura dell'acqua.

Un calorimetro reale, però, non è un recipiente ideale di capacità termica nulla: il recipiente interno, il termometro e l'agitatore si scaldano insieme all'acqua e assorbono anch'essi calore. Il loro effetto si riassume in un solo numero, l'**equivalente in acqua** m_e del calorimetro: la massa di acqua che avrebbe la stessa capacità termica delle parti del calorimetro, $m_e = C_{cal}/c_a$. Nei calcoli basta sommarlo alla massa m_a dell'acqua contenuta. Se un campione di massa m_x e temperatura T_x viene immerso nell'acqua del calorimetro, inizialmente a T_a, il bilancio diventa:

$$(m_a + m_e)c_a(T_e - T_a) + m_x c_x(T_e - T_x) = 0 \quad \Rightarrow \quad c_x = \frac{(m_a + m_e)c_a(T_e - T_a)}{m_x(T_x - T_e)}$$

L'equivalente in acqua si misura una volta per tutte con lo stesso metodo, mescolando nel calorimetro due masse di acqua a temperature diverse: tutte le grandezze sono note tranne m_e, che si ricava dal bilancio. È il primo passo dell'esperienza di laboratorio che segue.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: il calore specifico di un metallo

Materiali. Un calorimetro delle mescolanze con agitatore; un termometro digitale (risoluzione 0,1 °C); una bilancia (sensibilità 0,1 g); cilindri di alluminio, ferro e rame con un gancio e un filo; un becher di acqua su una piastra elettrica; pinze; acqua a temperatura ambiente.

Procedimento. 1) *Equivalente in acqua.* Si versano nel calorimetro 200,0 g di acqua; dopo qualche minuto la temperatura è stabile a 20,4 °C. Si aggiungono 100,0 g di acqua a 58,6 °C, si agita e si legge la temperatura di equilibrio, 32,2 °C. Dal bilancio $m_e = 100{,}0\ \text{g} \times (58{,}6 - 32{,}2)/(32{,}2 - 20{,}4) - 200{,}0\ \text{g} \approx 24\ \text{g}$. 2) *Calore specifico.* Si svuota il calorimetro e si versano 200,0 g di acqua a temperatura ambiente, letta come T_a. Il cilindro, pesato, viene tenuto per qualche minuto nell'acqua che bolle, la cui temperatura si misura: $T_x = (99{,}6 \pm 0{,}2)$ °C. Lo si trasferisce in fretta nel calorimetro, si chiude, si agita e si annota la temperatura massima raggiunta, T_e. 3) Si ripete con gli altri due metalli.

Tabella 12.2 Misure con il calorimetro: $m_a = (200{,}0 \pm 0{,}1)$ g, $m_e = (24 \pm 6)$ g, $T_x = (99{,}6 \pm 0{,}2)$ °C (dati tipici).

metallo	m_x (g)	T_a (°C)	T_e (°C)	c_x (J/(kg·K))
alluminio	150,0	20,2	30,3	910 ± 50
ferro	250,0	19,8	28,3	450 ± 20
rame	250,0	20,0	27,5	390 ± 20

Che cosa concludere. L'incertezza su m_e è grande perché m_e nasce da una differenza: le incertezze relative di (58,6 − 32,2) °C e di (32,2 − 20,4) °C danno circa il 2,5% di 224 g, cioè circa 6 g. Per il calore specifico si sommano le incertezze relative: quella di $(m_a + m_e)$, 6 g su 224 g, circa il 2,7%; quella di $(T_e - T_a)$, 0,2 °C su circa 10 °C, circa il 2%; quella di $(T_x - T_e)$, 0,3 °C su circa 70 °C, meno dello 0,5%; quella della massa, trascurabile. In totale circa il 5%. Per l'alluminio, per esempio, $c_x = (224\ \text{g} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 10{,}1\ \text{K})/(150{,}0\ \text{g} \times 69{,}3\ \text{K}) \approx 911\ \text{J/(kg·K)}$, con un'incertezza di circa 46 J/(kg·K): $(9{,}1 \pm 0{,}5) \times 10^2$ J/(kg·K). I tre valori sono compatibili con quelli della Tabella 12.1 (900, 450 e 385 J/(kg·K)): le differenze sono minori delle incertezze.

Sicurezza. L'acqua bollente e la piastra possono causare ustioni: la piastra la accende e la spegne l'insegnante, i cilindri si spostano solo con le pinze o tenendoli per il filo, e si lavora con occhiali di protezione. Il becher va appoggiato su una superficie stabile, lontano dal bordo del banco.

Per la relazione. Segui lo schema di *Fisica 1*, capitolo 5. Descrivi le due fasi della misura e scrivi il bilancio dei calori da cui ricavi prima l'equivalente in acqua e poi il calore specifico. Riporta la tabella con le incertezze, i tre valori di c con le loro incertezze e il confronto con i valori

della tabella: sono compatibili? Discuti gli errori sistematici: il cilindro si raffredda nell'aria durante il trasferimento e porta con sé qualche goccia d'acqua bollente; il calorimetro non è perfettamente isolato; il termometro reagisce con qualche secondo di ritardo. Per ciascuno, prevedi se porta a un valore di c troppo alto o troppo basso, e indica quale grandezza conviene misurare con più precisione per migliorare il risultato.

12.5 La propagazione del calore

Resta da capire **come** il calore passa da un corpo all'altro. Lo fa in tre modi, conduzione, convezione e irraggiamento, che spesso agiscono insieme.

12.5.1 La conduzione

Tieni in mano l'estremità di un cucchiaino di metallo immerso in un tè bollente: dopo poco anche la parte che stringi è calda, sebbene il metallo non si sia spostato. Il calore si è propagato lungo il cucchiaino per **conduzione**, cioè passando da una particella all'altra del materiale, senza trasporto di materia. Le particelle della parte calda si agitano di più e, interagendo con quelle vicine, trasmettono loro parte della propria energia; nei metalli contribuiscono molto anche gli elettroni liberi di muoversi, ed è per questo che i metalli conducono così bene.

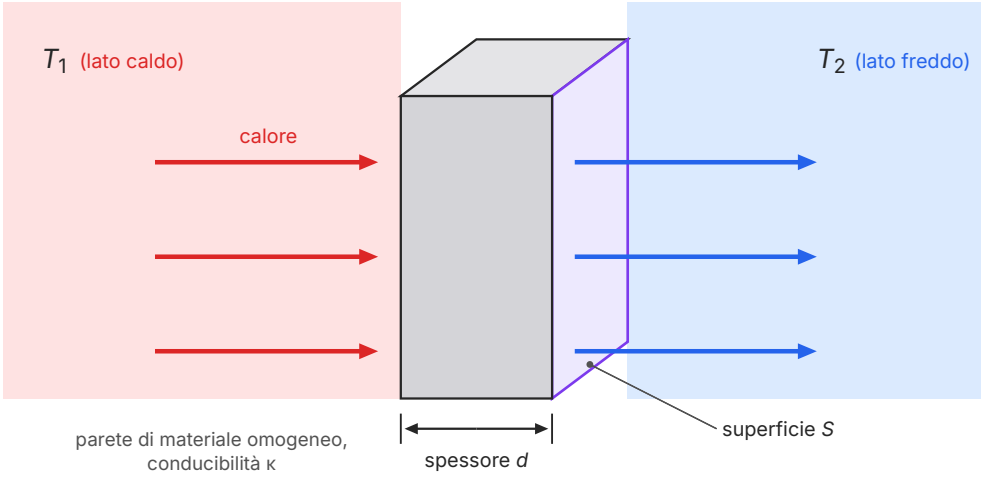


Figura 12.4 Conduzione attraverso una parete omogenea di spessore d e area S, con le facce alle temperature $T_1 > T_2$. Il calore attraversa la parete dalla faccia calda alla faccia fredda.

Consideriamo una parete piana di spessore d e area S, con le due facce mantenute alle temperature T_1 e T_2, con $T_1 > T_2$ (Figura 12.4). Quando le temperature delle facce restano costanti, l'esperienza mostra che la quantità di calore Q che attraversa la parete in un intervallo di tempo Δt è

direttamente proporzionale all'area, alla differenza di temperatura e al tempo, e inversamente proporzionale allo spessore:

$$\frac{Q}{\Delta t} = \kappa \, \frac{S(T_1 - T_2)}{d} \qquad \text{(W)}$$

Il rapporto $Q/\Delta t$ è l'energia che attraversa la parete ogni secondo, cioè una potenza, e si misura in watt. La costante κ (kappa) dipende dal materiale e si chiama **conducibilità termica**; si misura in W/(m·K). Alcuni testi la indicano con λ, che in questo libro è il coefficiente di dilatazione lineare. I materiali con κ grande sono buoni **conduttori termici**: i metalli, come il rame (circa 400 W/(m·K)) e l'alluminio (circa 240 W/(m·K)). Quelli con κ piccola sono **isolanti termici**: il legno (0,1–0,2 W/(m·K)) e soprattutto l'aria ferma (0,026 W/(m·K)), più di diecimila volte meno conduttrice del rame; vetro e calcestruzzo stanno in mezzo (circa 1 W/(m·K)).

La conduzione spiega un fatto del capitolo 11: la ringhiera di metallo e la panchina di legno sono alla stessa temperatura, ma il metallo sembra più freddo. Il metallo, buon conduttore, porta via in fretta il calore dalla mano; il legno lo lascia accumulare nello strato che tocchi. La pelle non misura la temperatura, ma la rapidità con cui perde calore.

L'aria ferma è il segreto di quasi tutti gli isolanti. Un **doppio vetro** contiene fra le due lastre un sottile strato d'aria, o di un altro gas, chiuso e così stretto che quasi non si muove: è questo strato, non il vetro, a ridurre la dispersione. La lana, il piumino, il polistirolo espanso e perfino la neve fresca isolano bene perché imprigionano tanta aria in piccole cavità.

ESEMPIO SVOLTO

Il calore che esce da una parete

Problema. La parete di una baita di montagna, di legno (κ = 0,15 W/(m·K)), ha un'area di 12 m^2 ed è spessa 8,0 cm. All'interno la faccia della parete è a 20 °C, all'esterno a −5 °C. a) Quanto calore attraversa la parete ogni secondo? b) Quanta energia, in kilowattora, si disperde in un giorno se le temperature restano costanti? c) Quanto varrebbe la potenza dispersa con una parete di calcestruzzo dello stesso spessore (κ = 1,0 W/(m·K))?

Calcolo. a) $T_1 - T_2$ = 20 °C − (−5 °C) = 25 K. $Q/\Delta t$ = 0,15 W/(m·K) × 12 m^2 × 25 K / 0,080 m ≈ 5,6 × 10^2 W. b) In un giorno, 86 400 s: Q ≈ 562,5 W × 86 400 s ≈ 4,9 × 10^7 J; poiché 1 kWh = 3,6 × 10^6 J, sono circa 14 kWh. c) A parità di tutto il resto la potenza è proporzionale a κ: 562,5 W × 1,0/0,15 ≈ 3,8 × 10^3 W, quasi sette volte di più.

Controllo. Le unità: W/(m·K) · m^2 · K / m = W. Il risultato è una stima: abbiamo supposto note le temperature delle due facce della parete, che in realtà sono un po' più vicine fra loro di quelle dell'aria interna ed esterna, perché anche i sottili strati d'aria a contatto con la parete la isolano.

ERRORE FREQUENTE

«Il maglione di lana scalda.» No: un maglione non produce energia, e messo su un manichino non diventa caldo. È il corpo a produrre energia interna con il suo metabolismo; il maglione, che imprigiona aria ferma fra le fibre, è un **isolante** e rallenta la dispersione del calore del corpo verso l'aria più fredda.

12.5.2 La convezione

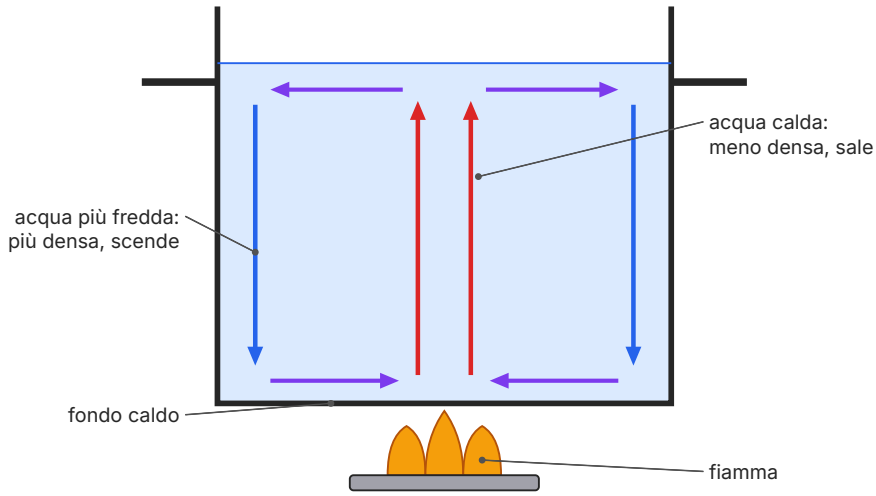


Figura 12.5 Moti convettivi in una pentola d'acqua scaldata dal basso (schema). L'acqua calda, meno densa, sale al centro; l'acqua più fredda, più densa, scende lungo le pareti.

Nei liquidi e nei gas il calore si propaga soprattutto in un altro modo. Scaldiamo dal basso una pentola d'acqua (Figura 12.5). L'acqua sul fondo si scalda per conduzione, si dilata e diventa meno densa dell'acqua circostante: per la spinta di Archimede (*Fisica 1*, capitolo 14) sale verso la superficie, mentre l'acqua più fredda e più densa scende lungo le pareti a prendere il suo posto. Si formano correnti circolari, i **moti convettivi**. Questo modo di propagarsi del calore, in cui è la materia stessa a muoversi trasportando energia, si chiama **convezione**. Può avvenire solo nei **fluidi**, liquidi e gas, perché richiede che la materia possa scorrere.

Un termosifone scalda una stanza soprattutto per convezione: l'aria a contatto con il termosifone si scalda, sale verso il soffitto e scende lungo le pareti più fredde, rimescolando l'aria della stanza. Sulle coste, nelle giornate di sole, la terra si scalda più del mare, che ha un calore specifico maggiore; l'aria sopra la terra sale, e al suolo si forma una corrente d'aria dal mare verso la terra, la **brezza di mare**. Di notte la terra si raffredda più in fretta del mare e la circola-

zione si inverte, con la brezza di terra: è la convezione su grande scala che hai studiato in *Scienze*.

12.5.3 L'irraggiamento

Fra il Sole e la Terra c'è lo spazio quasi vuoto: non c'è materia che possa condurre il calore né correnti che possano trasportarlo, eppure l'energia del Sole ci arriva. Si propaga per **irraggiamento**, cioè sotto forma di radiazione, la stessa famiglia a cui appartiene la luce. L'irraggiamento è l'unico modo di propagazione del calore che **non richiede un mezzo**: avviene anche nel vuoto.

Tutti i corpi emettono radiazione, e ne emettono di più quanto più sono caldi. A temperatura ambiente la radiazione emessa è quasi tutta **radiazione infrarossa**, invisibile ai nostri occhi ma percepibile sulla pelle come calore: è quella che senti avvicinando la mano a un ferro da stiro, ed è quella che misura un termometro a infrarossi (capitolo 11). Un corpo molto caldo, come il ferro rovente di un fabbro, emette anche luce visibile.

La radiazione che colpisce un corpo viene in parte assorbita, e scalda il corpo, e in parte riflessa. Le superfici scure e opache assorbono molto; quelle chiare e lucide riflettono di più. Per questo d'estate un'auto nera al sole diventa più calda di un'auto bianca. Una superficie che assorbe bene è anche una buona emettitrice: un corpo scuro e caldo si raffredda per irraggiamento più in fretta di un corpo lucido alla stessa temperatura. Le coperte isotermiche metallizzate dei soccorritori sfruttano il contrario: la faccia lucida riflette verso il corpo la radiazione infrarossa che il corpo emette.

12.5.4 Tre modi insieme: il thermos

Il thermos, o **vaso di Dewar** (Figura 12.6), combatte tutti e tre i modi di propagazione. La bevanda è contenuta in una bottiglia di vetro a doppia parete; fra le due pareti l'aria è stata tolta, e nel vuoto non possono esserci né conduzione né convezione. Le superfici delle pareti che si affacciano sul vuoto sono argentate, cioè rivestite da uno strato riflettente che rimanda indietro la radiazione infrarossa e riduce l'irraggiamento. Il tappo, di materiale isolante, impedisce i moti convettivi e l'evaporazione verso l'esterno. Resta qualche via di fuga, soprattutto per conduzione attraverso il tappo e il collo: dopo molte ore anche il caffè nel thermos si raffredda. Lo stesso oggetto tiene fresca una bibita fredda: il thermos non «produce» né «conserva» il calore, ma rallenta gli scambi in entrambe le direzioni.

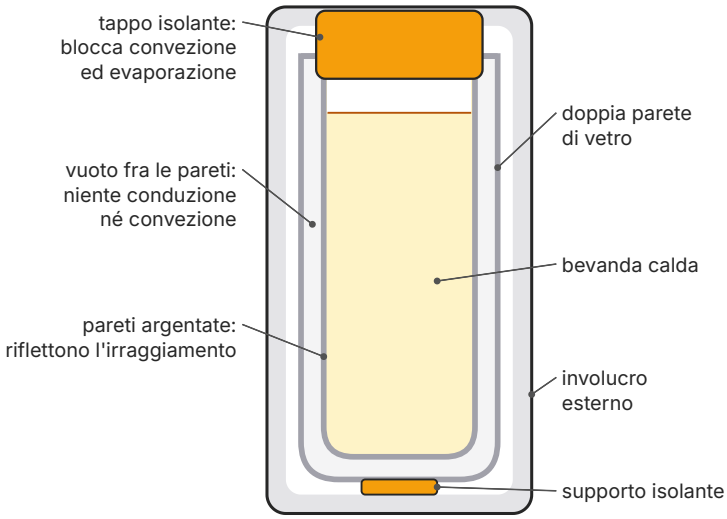


Figura 12.6 Sezione schematica di un thermos (vaso di Dewar). Ogni elemento ostacola uno o più dei tre modi di propagazione del calore.

IN SINTESI

Le formule del calore

1 cal = 4,186 J; 1 kcal = 4186 J — equivalente meccanico del calore: il calore è energia e si misura in joule.

$Q = mc\Delta T = C\Delta T$ — calore (J) assorbito ($Q > 0$) o ceduto ($Q < 0$) da un corpo di massa m (kg) e calore specifico c (J/(kg·K)) quando la sua temperatura varia di ΔT (K o °C). Vale solo se il corpo non cambia stato.

$C = mc$ — capacità termica (J/K): il calore che fa variare di 1 K la temperatura di quel corpo.

$Q_1 + Q_2 = 0 \Rightarrow T_e = (m_1c_1T_1 + m_2c_2T_2)/(m_1c_1 + m_2c_2)$ — temperatura di equilibrio di due corpi in un sistema isolato: una media delle temperature iniziali pesata con le capacità termiche.

$m_e = C_{cal}/c_a$ — equivalente in acqua del calorimetro (kg): si somma alla massa dell'acqua nel bilancio.

$Q/\Delta t = \kappa S(T_1 - T_2)/d$ — potenza (W) trasmessa per conduzione attraverso una parete di area S (m^2) e spessore d (m); κ conducibilità termica (W/(m·K)).

Convezione: trasporto di energia da parte di un fluido in movimento. Irraggiamento: trasporto per radiazione, anche nel vuoto.

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. Un corpo non contiene calore, ma possiede energia interna.
- Convenzione dei segni: $Q > 0$ se il corpo assorbe calore, $Q < 0$ se lo cede.
- Calore e lavoro sono due modi di trasferire energia a un corpo e possono produrre lo stesso aumento della sua energia interna.
- La teoria del calorico considerava il calore una sostanza; gli esperimenti di Rumford (1798) e le misure di Joule (anni Quaranta dell'Ottocento) mostrarono che è una forma di trasferimento di energia.
- L'equivalente meccanico del calore è 1 cal = 4,186 J; la caloria è il calore che scalda 1 g di acqua da 14,5 °C a 15,5 °C.
- Senza passaggi di stato il calore assorbito da un corpo è $Q = mc\Delta T = C\Delta T$; la capacità termica C (J/K) riguarda un corpo, il calore specifico c (J/(kg·K)) una sostanza.
- L'acqua ha un calore specifico molto alto, 4186 J/(kg·K): per questo mitiga il clima delle coste ed è usata per trasportare energia negli impianti.
- In un sistema isolato la somma dei calori scambiati è zero; la temperatura di equilibrio è una media delle temperature iniziali pesata con le capacità termiche e cade sempre fra di esse.
- Il calorimetro delle mescolanze misura i calori specifici; il suo equivalente in acqua tiene conto del calore assorbito dalle sue parti.
- Nella conduzione l'energia passa fra le particelle di un materiale senza trasporto di materia: $Q/\Delta t = \kappa S \Delta T/d$. I metalli sono buoni conduttori; l'aria ferma è un ottimo isolante.
- Nella convezione l'energia è trasportata da un fluido che si muove, perché le sue parti calde, meno dense, salgono.
- L'irraggiamento trasporta energia per radiazione anche nel vuoto; le superfici scure assorbono ed emettono più di quelle chiare e lucide. Il thermos ostacola tutti e tre i modi di propagazione.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Il calore è:
   - **A.** l'energia che un corpo possiede perché è caldo
   - **B.** l'energia trasferita da un corpo a un altro a causa di una differenza di temperatura
   - **C.** il prodotto della temperatura per la massa
   - **D.** un fluido senza peso che passa dai corpi caldi a quelli freddi

2. ● Nel SI il calore specifico si misura in:
   - **A.** J/K
   - **B.** J/kg
   - **C.** J/(kg·K)
   - **D.** W/(m·K)

3. ● Nell'esperimento di Joule l'acqua si scalda perché:
   - **A.** riceve calore da una fiamma
   - **B.** le masse che scendono le cedono calore
   - **C.** il recipiente le cede calore
   - **D.** le pale, mosse dalle masse che scendono, compiono lavoro su di essa

4. ● Due corpi a contatto, isolati dall'ambiente, smettono di scambiarsi calore quando:
   - **A.** hanno la stessa temperatura
   - **B.** hanno la stessa energia interna
   - **C.** hanno la stessa capacità termica
   - **D.** il più caldo ha ceduto tutto il suo calore

5. ●● A 1,0 kg di acqua e a 1,0 kg di ferro si fornisce la stessa quantità di calore. Allora:
   - **A.** l'acqua si scalda di più
   - **B.** il ferro si scalda circa 9 volte più dell'acqua
   - **C.** i due corpi si scaldano allo stesso modo
   - **D.** il ferro si scalda circa 2 volte più dell'acqua

6. ●● Mescoli 1 kg di acqua a 20 °C con 3 kg di acqua a 60 °C, senza scambi con l'ambiente. La temperatura di equilibrio è:
   - **A.** 50 °C
   - **B.** 40 °C
   - **C.** 30 °C
   - **D.** 45 °C

7. ● Il calore si propaga anche nel vuoto per:
   - **A.** conduzione
   - **B.** convezione
   - **C.** irraggiamento
   - **D.** nessuno dei tre modi

8. ●● La convezione:
   - **A.** avviene soprattutto nei solidi
   - **B.** richiede un fluido e un trasporto di materia
   - **C.** non richiede un mezzo materiale
   - **D.** avviene solo nell'aria

9. ●●● Attraverso una parete di spessore d passano 200 W. Se lo spessore raddoppia e raddoppia anche la differenza di temperatura fra le facce, la potenza trasmessa diventa:
   A. 100 W
   B. 400 W
   C. 800 W
   D. 200 W

Vero o falso

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

11. ● Una variazione di temperatura di 10 °C equivale a una variazione di 10 K. V / F

12. ●● Due corpi con lo stesso calore specifico hanno sempre la stessa capacità termica. V / F

13. ●● Se hai le mani fredde, i guanti di lana le scaldano perché producono calore. V / F

14. ●● Nella formula della temperatura di equilibrio le temperature si possono esprimere indifferentemente in °C o in K. V / F

Applicare

15. ● Calcola il calore necessario per scaldare 2,5 kg di acqua da 15 °C a 65 °C.

16. ● Un blocco di rame di 0,80 kg assorbe 6,2 kJ senza cambiare stato. Di quanto aumenta la sua temperatura?

17. ● Converti: a) 250 cal in joule; b) $1{,}0 \times 10^4$ J in calorie.

18. ● Calcola la capacità termica di: a) 0,25 kg di acqua; b) una pentola di alluminio di 1,2 kg. c) Se ricevono la stessa quantità di calore, quale dei due corpi si scalda di più?

19. ●● Un corpo di 0,500 kg, ricevendo 9,0 kJ, si scalda da 20,0 °C a 60,0 °C senza cambiare stato. Calcola il suo calore specifico e, con la Tabella 12.1, individua la sostanza.

20. ● Completa. Il calore passa spontaneamente dal corpo a temperatura _____ a quello a temperatura _____ . Il calore che fa aumentare di 1 K la temperatura di un corpo è la sua _____ . Nel vuoto il calore si propaga solo per _____ .

21. ● Usa la Tabella 12.1. Quattro blocchi di 1,0 kg, di alluminio, ferro, rame e piombo, ricevono ciascuno 1,0 kJ di calore. Calcola l'aumento di temperatura di ciascuno: quale si scalda di più?

22. ● Una parete di calcestruzzo ($\kappa = 1{,}0$ W/(m·K)) di 15 m^2, spessa 25 cm, ha le facce a temperature che differiscono di 18 °C. Quanto calore la attraversa ogni secondo?

Problemi

23. ●● Una vasca da bagno deve contenere 150 kg di acqua a 38 °C, ottenuta mescolando acqua calda a 60 °C e acqua fredda a 14 °C. Trascurando gli scambi con la vasca e con l'aria, quanta acqua calda e quanta fredda servono?

24. ●● Si versano 0,250 kg di tè a 85,0 °C in una tazza di ceramica di 0,300 kg a 20,0 °C (calore specifico della ceramica 850 J/(kg·K)). Considera il tè come acqua e trascura gli scambi con l'aria. a) Calcola la temperatura di equilibrio. b) Di quanti gradi si raffredda il tè?

25. ●● Un blocco di ferro di 0,500 kg, a 150 °C, viene immerso in 1,00 kg di acqua a 20,0 °C in un recipiente isolato di capacità termica trascurabile. a) Calcola la temperatura di equilibrio. b) Quanto calore cede il ferro?

26. ●●● In un calorimetro che contiene 0,300 kg di acqua a 18,0 °C si versano 0,200 kg di acqua a 70,0 °C; la temperatura di equilibrio è 38,0 °C. a) Calcola l'equivalente in acqua del calorimetro. b) Nello stesso calorimetro, di nuovo con 0,300 kg di acqua a 18,0 °C, si immerge un cilindro metallico di 0,150 kg a 100,0 °C: la temperatura di equilibrio è 22,0 °C. Calcola il calore specifico del metallo e, con la Tabella 12.1, riconoscilo.

27. ●●● Un'auto di 1200 kg viaggia a 90 km/h su una strada orizzontale e frena fino a fermarsi. I quattro dischi dei freni, di ferro, hanno una massa complessiva di 20 kg. a) Calcola l'energia cinetica iniziale dell'auto (capitolo 9). b) Supponi che l'80% di questa energia diventi energia interna dei dischi: di quanto aumenta la loro temperatura? c) Da quale altezza dovrebbe cadere l'auto per avere, a terra, la stessa energia cinetica?

28. ●● Una cascata ha un salto di 80 m. a) Se tutta l'energia potenziale gravitazionale persa dall'acqua diventasse energia interna dell'acqua stessa, di quanto si scalderebbe l'acqua alla base? b) Perché questo aumento è difficile da misurare?

29. ●●● Il fondo di una pentola di alluminio ($\kappa = 240$ W/(m·K)) è spesso 4,0 mm e ha un'area di 0,030 m^2. Sul fornello la faccia inferiore del fondo è 2,0 °C più calda di quella superiore. a) Quanto calore attraversa il fondo ogni secondo? b) Supponi che tutto questo calore vada a 2,0 kg di acqua contenuti nella pentola: in quanto tempo l'acqua passa da 20 °C a 80 °C? (Trascura il riscaldamento della pentola e le perdite.)

Ragionare e argomentare

30. ●● In una giornata d'estate la sabbia della spiaggia scotta, mentre l'acqua del mare è fresca, anche se ricevono dal Sole la stessa energia per ogni metro quadrato. Spiega perché, indicando almeno due motivi.

31. ●●● Trova l'errore. Un compagno scrive: «Mescolo 200 g di acqua a 80 °C con 200 g di pallini di rame a 20 °C: le masse sono uguali, quindi la temperatura finale è la media, 50 °C». Dov'è l'errore? Qual è il risultato corretto?

32. ●●● Stima di Fermi. Stima l'energia necessaria per scaldare l'acqua di una doccia e confrontala con il tempo che impiegherebbe un forno elettrico da 2 kW a consumarla. Dichiara le tue ipotesi.

33. ●● Progetta un esperimento per confrontare la conducibilità termica di due sbarrette di uguali dimensioni, una di rame e una di acciaio, con materiali semplici. Indica che cosa misuri, quali grandezze tieni uguali e che cosa ti aspetti.

PER APPROFONDIRE

- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: le pagine sulla conservazione dell'energia e sul calore come energia del moto disordinato delle particelle.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo su temperatura e calore, con molti problemi di calorimetria e di conduzione.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: i capitoli sul calore e sulla propagazione del calore, ricchi di esempi quotidiani su conduzione, convezione e irraggiamento.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: il racconto di come il calore, da sostanza, diventò una forma di energia.

Glossario del capitolo

Calore
Energia che si trasferisce 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 che fa aumentare di 1 K la temperatura di 1 kg di una sostanza: $c = Q/(m\Delta T)$, in J/(kg·K).

Caloria
Unità di energia non SI: il calore che innalza da 14,5 °C a 15,5 °C la temperatura di 1 g di acqua; 1 cal = 4,186 J.

Calorico
Ipotetico fluido senza peso che, secondo una teoria del Settecento, costituiva il calore; abbandonato dopo gli esperimenti di Rumford e di Joule.

Calorimetro delle mescolanze
Recipiente isolato, con termometro e agitatore, in cui si mescolano corpi a temperature diverse per misurare calori specifici.

Capacità termica
Calore che fa aumentare di 1 K la temperatura di un corpo: $C = Q/\Delta T$, in J/K.

Conducibilità termica
Costante κ di un materiale, in W/(m·K), che indica quanto facilmente vi si propaga il calore per conduzione.

Conduttore termico
Materiale con conducibilità termica elevata, come i metalli.

Conduzione
Propagazione del calore da una particella all'altra di un materiale, senza trasporto di materia.

Convezione
Propagazione del calore nei fluidi per mezzo di moti della materia: le parti calde, meno dense, salgono e quelle fredde scendono.

Equivalente in acqua
Massa di acqua che ha la stessa capacità termica delle parti di un calorimetro.

Equivalente meccanico del calore
Rapporto fra il lavoro e il calore che producono lo stesso riscaldamento: 1 cal = 4,186 J.

Irraggiamento
Propagazione del calore per mezzo di radiazione; non richiede un mezzo e avviene anche nel vuoto.

Isolante termico
Materiale con conducibilità termica bassa, come il legno, il polistirolo e l'aria ferma.

Mulinello di Joule
Apparato in cui masse che scendono fanno girare delle pale immerse nell'acqua; serve a misurare quanto lavoro produce un dato riscaldamento.

Radiazione infrarossa
Radiazione invisibile emessa da tutti i corpi, soprattutto a temperatura ambiente; percepita sulla pelle come calore.

Sistema isolato
Insieme di corpi che non scambiano energia con l'esterno.

Temperatura di equilibrio
Temperatura comune raggiunta da corpi a contatto che si scambiano calore; per due corpi è una media delle temperature iniziali pesata con le capacità termiche.

Vaso di Dewar
Recipiente a doppia parete con il vuoto nell'intercapedine e pareti argentate, che riduce conduzione, convezione e irraggiamento: il thermos.

Soluzioni

1. B. Il calore è energia in transito; un corpo possiede energia interna, non calore. L'ultima risposta descrive il calorico, un'ipotesi abbandonata.

2. C. $c = Q/(m\Delta T)$: joule diviso kilogrammo e kelvin. J/K è l'unità della capacità termica, W/(m·K) quella della conducibilità termica.

3. D. Il lavoro del peso delle masse passa all'acqua attraverso le pale e aumenta la sua energia interna, senza scambio di calore.

4. A. Lo scambio di calore è causato da una differenza di temperatura: si ferma all'equilibrio termico, quando le temperature sono uguali.

5. B. A parità di Q e di m, ΔT è inversamente proporzionale a c: 4186/450 ≈ 9,3.

6. A. $T_e = (1 \times 20 + 3 \times 60)/(1 + 3)$ °C = 50 °C: la media pesata è più vicina alla temperatura della massa maggiore.

7. C. Conduzione e convezione richiedono materia; la radiazione si propaga anche nel vuoto, come quella del Sole.

8. B. Nella convezione è il fluido, liquido o gas, a muoversi e a trasportare energia.

9. D. $Q/\Delta t$ è proporzionale a $\Delta T/d$: i due fattori 2 si compensano.

10. F. Un corpo contiene energia interna; il calore è energia in transito fra corpi a temperature diverse.

11. V. Le due scale hanno gradi della stessa ampiezza: differiscono solo per lo zero.

12. F. $C = mc$: a parità di c, la capacità termica è proporzionale alla massa.

13. F. I guanti non producono energia: sono isolanti e rallentano la dispersione del calore prodotto dal corpo.

14. V. La temperatura di equilibrio è una media pesata: aggiungendo 273,15 a ogni temperatura iniziale anche il risultato aumenta di 273,15.

15. $Q = mc\Delta T$ = 2,5 kg × 4186 J/(kg·K) × 50 K ≈ $5{,}2 \times 10^5$ J.

16. $\Delta T = Q/(mc)$ = 6200 J / (0,80 kg × 385 J/(kg·K)) ≈ 20 K (20 °C).

17. a) 250 × 4,186 J ≈ $1{,}05 \times 10^3$ J. b) $1{,}0 \times 10^4$ J / 4,186 J/cal ≈ $2{,}4 \times 10^3$ cal.

18. a) C = 0,25 kg × 4186 J/(kg·K) ≈ $1{,}0 \times 10^3$ J/K (1046 J/K). b) C = 1,2 kg × 900 J/(kg·K) ≈ $1{,}1 \times 10^3$ J/K (1080 J/K). c) $\Delta T = Q/C$: si scalda un po' di più l'acqua, che ha la capacità termica leggermente minore, anche se ha un calore specifico molto maggiore.

19. $c = Q/(m\Delta T)$ = 9000 J / (0,500 kg × 40,0 K) = 450 J/(kg·K): è ferro.

20. più alta; più bassa; capacità termica; irraggiamento.

21. $\Delta T = Q/(mc)$: alluminio 1000/900 ≈ 1,1 K; ferro 1000/450 ≈ 2,2 K; rame 1000/385 ≈ 2,6 K; piombo 1000/129 ≈ 7,8 K. Si scalda di più il piombo, che ha il calore specifico minore.

22. $Q/\Delta t = \kappa S\Delta T/d$ = 1,0 W/(m·K) × 15 m^2 × 18 K / 0,25 m ≈ $1{,}1 \times 10^3$ W.

23. Con m_c acqua calda e m_f fredda: $m_c + m_f$ = 150 kg e, dal bilancio (il calore specifico si semplifica), $m_c(38 - 60) + m_f(38 - 14) = 0$, cioè 22 m_c = 24 m_f. Sostituendo m_f = 150 kg − m_c: 46 m_c = 3600 kg, m_c ≈ 78 kg di acqua calda e m_f ≈ 72 kg di acqua fredda.

24. a) Capacità termiche: tè 0,250 × 4186 J/K ≈ 1046,5 J/K; tazza 0,300 × 850 J/K = 255 J/K. $T_e = (1046{,}5 \times 85{,}0 + 255 \times 20{,}0)/(1046{,}5 + 255)$ °C ≈ 72,3 °C. b) 85,0 − 72,3 ≈ 12,7 °C. Per questo si consiglia di scaldare la tazza prima di versare il tè.

25. a) Capacità termiche: ferro 0,500 × 450 J/K = 225 J/K; acqua 4186 J/K. $T_e = (225 \times 150 + 4186 \times 20{,}0)/(225 + 4186)$ °C = 117 470/4411 °C ≈ 26,6 °C. b) Q_{ferro} = 225 J/K × (26,6 − 150) K ≈ $-2{,}78 \times 10^4$ J: il ferro cede circa $2{,}78 \times 10^4$ J, che l'acqua assorbe (4186 × 6,63 J ≈ $2{,}78 \times 10^4$ J).

26. a) Il calorimetro è inizialmente alla temperatura dell'acqua fredda: (0,300 kg + m_e) c_a (38,0 − 18,0) + 0,200 kg × c_a × (38,0 − 70,0) = 0. Il calore specifico si semplifica: (0,300 kg + m_e) × 20,0 = 0,200 kg × 32,0 ⇒ 0,300 kg + m_e = 0,320 kg ⇒ m_e = 0,020 kg = 20 g. b) c_x = $(m_a + m_e)c_a(T_e - T_a)/(m_x(T_x - T_e))$ = 0,320 kg × 4186 J/(kg·K) × 4,0 K / (0,150 kg × 78,0 K) ≈ $4,6 \times 10^2$ J/(kg·K). Con due cifre significative (la variazione di temperatura dell'acqua è 4,0 K) il valore è compatibile con il ferro, 450 J/(kg·K).

27. Durante la frenata sull'auto agiscono il peso e la reazione normale della strada, che si equilibrano e non compiono lavoro, e le forze frenanti all'indietro, il cui lavoro negativo annulla l'energia cinetica. a) v_0 = 90/3,6 m/s = 25 m/s; K = ½ × 1200 kg × (25 m/s)^2 = $3,75 \times 10^5$ J. b) Q = 0,80 × $3,75 \times 10^5$ J = $3,0 \times 10^5$ J; $\Delta T = Q/(mc)$ = $3,0 \times 10^5$ J / (20 kg × 450 J/(kg·K)) ≈ 33 K. c) $mgh = ½mv^2 \Rightarrow h = v^2/(2g)$ = 625/19,6 m ≈ 32 m, l'altezza di un palazzo di una decina di piani.

28. a) Per ogni kilogrammo: $mgh = mc\Delta T \Rightarrow \Delta T = gh/c$ = 9,8 m/s^2 × 80 m / 4186 J/(kg·K) ≈ 0,19 K. Il risultato non dipende dalla massa. b) È un aumento piccolo, e altri effetti lo mascherano: l'evaporazione delle goccioline, che raffredda l'acqua, gli scambi con l'aria e con le rocce, il mescolamento con acqua a temperature diverse.

29. a) $Q/\Delta t = \kappa S\Delta T/d$ = 240 W/(m·K) × 0,030 m^2 × 2,0 K / 0,0040 m = $3,6 \times 10^3$ W. b) Q = 2,0 kg × 4186 J/(kg·K) × 60 K ≈ $5,02 \times 10^5$ J; $\Delta t = Q/(3,6 \times 10^3\ \text{W})$ ≈ $1,4 \times 10^2$ s, cioè circa due minuti e venti secondi. Basta una differenza di temperatura di due gradi attraverso il fondo metallico per trasmettere una potenza così grande: per questo le pentole si fanno di metallo.

30. Traccia di risposta. Il motivo principale è il calore specifico: quello dell'acqua è circa cinque volte quello della sabbia, quindi a parità di energia assorbita da una stessa massa la sabbia si scalda molto di più. Inoltre la sabbia è un cattivo conduttore e trattiene l'energia nello strato superficiale, mentre nell'acqua la radiazione penetra in profondità e le onde e le correnti rimescolano l'acqua calda con quella più fredda; infine l'evaporazione sottrae energia alla superficie del mare.

31. La media aritmetica vale solo se le **capacità termiche** sono uguali, non le masse. Qui l'acqua ha capacità termica 0,200 × 4186 J/K ≈ 837 J/K, il rame 0,200 × 385 J/K = 77 J/K. T_e = (837 × 80 + 77 × 20)/(837 + 77) °C ≈ 74,9 °C, cioè circa 75 °C: l'acqua si raffredda di soli 5 gradi.

32. Traccia di risposta. Ipotesi: doccia di 8 minuti con un getto di circa 8 L al minuto, cioè circa 60 L = 60 kg di acqua, scaldata da circa 15 °C a circa 40 °C. Q = 60 kg × 4186 J/(kg·K) × 25 K ≈ 6×10^6 J, circa 1,7 kWh. Un forno da 2 kW la consuma in 6×10^6 J / 2000 W ≈ 3×10^3 s, quasi un'ora. Il risultato vale come ordine di grandezza: con ipotesi ragionevoli diverse si trovano valori fra 3 e 10 MJ.

33. Traccia di risposta. Si fissano allo stesso modo alcune goccioline di cera a distanze uguali lungo le due sbarrette, oppure due termometri digitali alla stessa distanza dall'estremità. Si immergono le estremità delle sbarrette, nello stesso momento e alla stessa profondità, nella stessa acqua molto calda (maneggiata dall'insegnante), tenendo uguali lunghezze, sezioni e condizioni dell'aria. Si misura il tempo che impiegano le gocce a fondere, o la temperatura dopo tempi uguali. Ci si aspetta che sulla sbarretta di rame, che ha conducibilità circa otto volte maggiore (400 contro circa 50 W/(m·K)), le gocce fondano prima e più lontano dall'estremità. Si ripete più volte, scambiando le posizioni delle sbarrette, per controllare gli errori sistematici.