CAPITOLO

13

I passaggi di stato

Mentre il ghiaccio fonde, il termometro resta fermo: l'energia che arriva non scalda, ma separa.

OBIETTIVI

1. Riconoscere e nominare correttamente i sei passaggi di stato, distinguendo quelli che assorbono calore da quelli che lo cedono.
2. Spiegare perché un passaggio di stato avviene a temperatura costante e calcolare il calore scambiato con $Q = mL$.
3. Distinguere evaporazione ed ebollizione e spiegare come la temperatura di ebollizione dipende dalla pressione.
4. Costruire e leggere la curva di riscaldamento e la curva di raffreddamento dell'acqua.
5. Risolvere problemi di calorimetria con passaggi di stato, controllando prima se tutto il ghiaccio fonde.
6. Misurare in laboratorio il calore latente di fusione del ghiaccio, con la sua incertezza.

INDICE DEL CAPITOLO

13.1 Gli stati della materia e i passaggi di stato 2

13.2 La fusione e la solidificazione 5

13.3 La vaporizzazione e la condensazione 6

13.4 Le curve di riscaldamento e di raffreddamento 10

13.5 La calorimetria con i passaggi di stato 13

Fisica 2 · Parte IV · I fenomeni termici · versione 1.0
Capitolo 13: I passaggi di stato · pagine 317–338 del volume completo · estratto per lo studio

Lascia un cubetto di ghiaccio in un bicchiere, in una stanza a 20 °C. Per un po' il ghiaccio galleggia nell'acqua di fusione, e se immergi un termometro nella miscela leggi 0 °C: non 5, non 10, sempre 0 °C, finché resta anche un solo frammento di ghiaccio. Eppure dalla stanza arriva continuamente calore. Dove va a finire quell'energia, se la temperatura non sale?

Nel capitolo 12 hai imparato a calcolare il calore scambiato con $Q = mc\Delta T$, e ti abbiamo avvertito che la formula vale solo finché il corpo non cambia stato. In questo capitolo studiamo proprio i cambiamenti di stato: perché avvengono a temperatura costante, quanta energia richiedono o liberano, come cambia la temperatura di ebollizione con la pressione e come si risolvono i problemi di calorimetria in cui un corpo fonde, solidifica o evapora. Gli stati della materia, i nomi dei passaggi e le curve di riscaldamento sono già comparsi in *Scienze 1*: qui diventano grandezze misurabili, leggi e problemi.

13.1 Gli stati della materia e i passaggi di stato

Ricordiamo in breve quello che sai da *Scienze 1*. Un solido ha forma e volume propri: le sue particelle sono legate in posizioni fisse, attorno alle quali vibrano. Un liquido ha volume proprio ma prende la forma del recipiente: le particelle restano vicine, ma possono scorrere le une sulle altre. Un aeriforme, gas o vapore, occupa tutto il volume disponibile: le particelle sono lontane e si muovono quasi liberamente. A pressione atmosferica la stessa sostanza, l'acqua, può presentarsi in tutti e tre gli stati, a seconda della temperatura.

Si chiama **passaggio di stato** la trasformazione di una sostanza da uno stato di aggregazione a un altro. I passaggi sono sei, a coppie opposte, e hanno nomi precisi (Figura 13.1): la **fusione** (da solido a liquido) e la **solidificazione** (da liquido a solido); la **vaporizzazione** (da liquido ad aeriforme) e la **condensazione** (da aeriforme a liquido); la **sublimazione** (da solido ad aeriforme, senza passare per il liquido) e il **brinamento** (da aeriforme a solido).

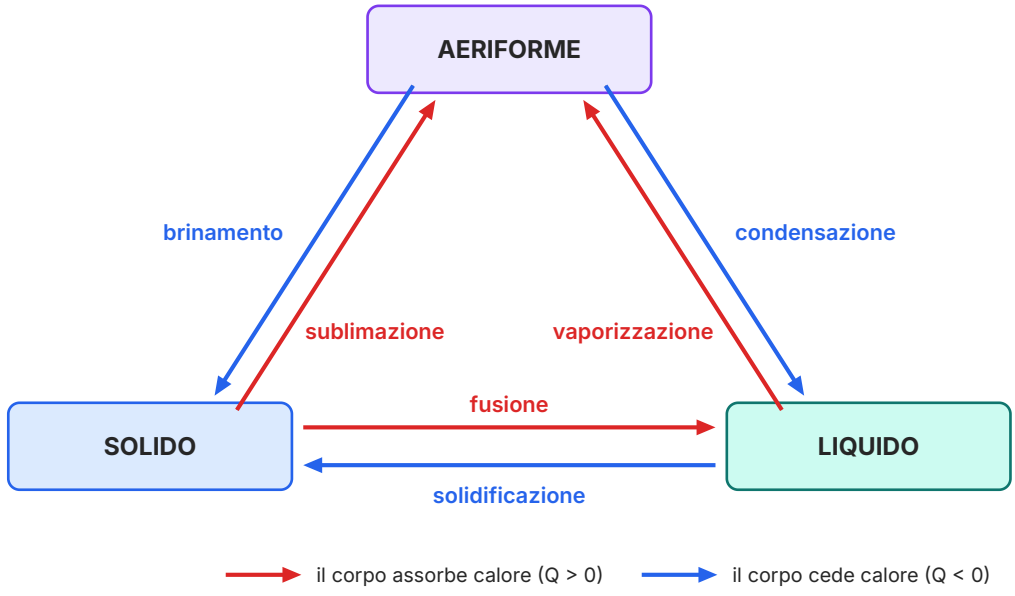


Figura 13.1 I sei passaggi di stato. Le frecce rosse indicano i passaggi in cui il corpo assorbe calore, verso stati in cui le particelle sono meno legate; le frecce blu i passaggi opposti, in cui il corpo cede calore.

Le frecce della Figura 13.1 hanno due colori. Fusione, vaporizzazione e sublimazione portano la sostanza verso uno stato in cui le particelle sono meno legate: per separarle bisogna fornire energia, e in questi passaggi il corpo **assorbe calore**. I tre passaggi opposti, solidificazione, condensazione e brinamento, riformano i legami e restituiscono la stessa energia: il corpo **cede calore**. Un chilogrammo d'acqua che congela cede esattamente l'energia che lo stesso chilogrammo di ghiaccio assorbe per fondere.

13.1.1 Il calore latente

Torniamo al cubetto nel bicchiere. Mentre fonde, il ghiaccio riceve calore dalla stanza, ma la sua temperatura resta 0 °C. L'energia che arriva non fa muovere più in fretta le particelle, e quindi non alza la temperatura: serve a rompere i legami che le tengono nelle posizioni del cristallo. Solo quando il ghiaccio è tutto fuso, l'acqua comincia a scaldarsi. Lo stesso accade in tutti i passaggi di stato di una sostanza pura: **a pressione costante il passaggio avviene a temperatura costante**.

Le misure mostrano che il calore necessario per un passaggio di stato è direttamente proporzionale alla massa della sostanza che cambia stato. La costante di proporzionalità dipende dalla sostanza e dal passaggio, e si chiama **calore latente** L: è il calore che serve a far cambiare

stato a 1 kg di sostanza, già alla temperatura del passaggio. L'aggettivo «latente», cioè nascosto, ricorda che questo calore non si rivela con un aumento di temperatura.

$$Q = mL \qquad (L \text{ in J/kg})$$

Per i segni vale la convenzione del capitolo 12: nella fusione, nella vaporizzazione e nella sublimazione il corpo assorbe calore e $Q = +mL$; nei passaggi opposti lo cede e $Q = -mL$. Per ogni sostanza si misurano un **calore latente di fusione** L_f, che vale anche per la solidificazione, e un **calore latente di vaporizzazione** L_v, che vale anche per la condensazione. La Tabella 13.1 riporta alcuni valori e le temperature dei passaggi a pressione atmosferica normale.

Tabella 13.1 Temperature di fusione e di ebollizione e calori latenti di alcune sostanze, a pressione atmosferica normale (valori arrotondati; per l'acqua, L_v a 100 °C).

Sostanza	Fusione (°C)	L_f (J/kg)	Ebollizione (°C)	L_v (J/kg)
acqua	0	$3{,}34 \times 10^5$	100	$2{,}26 \times 10^6$
alcol etilico	−114	$1{,}08 \times 10^5$	78	$8{,}5 \times 10^5$
mercurio	−39	$1{,}14 \times 10^4$	357	$2{,}96 \times 10^5$
piombo	327	circa $2{,}3 \times 10^4$	—	—
alluminio	660	$3{,}97 \times 10^5$	—	—

I numeri dell'acqua meritano attenzione. Con $3{,}34 \times 10^5$ J si fonde 1 kg di ghiaccio a 0 °C; la stessa energia scalderebbe 1 kg di acqua liquida di $3{,}34 \times 10^5$ J / 4186 J/(kg·K) ≈ 80 °C. E per vaporizzare 1 kg di acqua a 100 °C serve un'energia quasi sette volte maggiore di quella per fonderlo, e più di cinque volte quella per portarlo da 0 °C a 100 °C.

ERRORE FREQUENTE

«Fornisco calore, quindi la temperatura sale.» Non sempre: durante un passaggio di stato il corpo assorbe calore e la sua temperatura **non cambia**. Per lo stesso motivo la formula $Q = mc\Delta T$ non si può applicare «attraverso» un passaggio di stato, per esempio per portare il ghiaccio a −10 °C fino ad acqua a 20 °C in un solo colpo. Bisogna spezzare il calcolo in tratti: riscaldamento del ghiaccio con il suo calore specifico, fusione con $Q = mL_f$, riscaldamento dell'acqua liquida con il calore specifico dell'acqua.

13.2 La fusione e la solidificazione

13.2.1 La temperatura di fusione

Un solido cristallino puro, a pressione costante, fonde a una temperatura ben determinata, la **temperatura di fusione**, caratteristica della sostanza: per il ghiaccio a pressione atmosferica normale è 0 °C, per il piombo 327 °C, per il mercurio −39 °C. Raffreddando il liquido, la sostanza solidifica alla stessa temperatura: la temperatura di fusione e quella di solidificazione coincidono. Per questo la fusione del ghiaccio è uno dei punti fissi delle scale termometriche (capitolo 11).

Non tutti i solidi si comportano così. Il vetro, la cera, il burro e il cioccolato non hanno una struttura cristallina ordinata, oppure sono miscele di sostanze diverse: scaldati, si ammorbidiscono a poco a poco in un intervallo di temperature, senza una temperatura di fusione precisa. Anche una soluzione si comporta in modo diverso dalla sostanza pura: l'acqua salata solidifica sotto 0 °C, ed è per questo che d'inverno si sparge sale sulle strade.

Durante la solidificazione la sostanza cede il calore latente mL_f all'ambiente. È un'energia tutt'altro che piccola, e si sfrutta anche in agricoltura: nelle notti di gelata primaverile alcuni frutticoltori spruzzano acqua sulle piante in fiore. Mentre l'acqua congela sui germogli cede calore, e finché c'è acqua che solidifica la temperatura della miscela di acqua e ghiaccio resta a 0 °C, impedendo ai tessuti della pianta di scendere più in basso.

ESEMPIO SVOLTO

Fondere il ghiaccio di una borsa frigo

Problema. In una borsa frigo ci sono 250 g di ghiaccio a 0 °C. a) Quanto calore serve per fonderlo tutto? b) Se il calore arrivasse da una resistenza elettrica che fornisce 1,0 kW, tutto al ghiaccio, quanto tempo servirebbe? c) Di quanto la stessa quantità di calore scalderebbe 250 g di acqua liquida?

Ragionamento. Il ghiaccio è già alla temperatura di fusione: tutto il calore serve al passaggio di stato, e si usa $Q = mL_f$. Nella domanda c, invece, non c'è passaggio di stato e si usa $Q = mc\Delta T$.

Calcolo. a) $Q = mL_f = 0{,}250\ \text{kg} \times 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} \approx 8{,}35 \times 10^4\ \text{J}$. b) Dalla definizione di potenza (capitolo 8), $\Delta t = Q/P = 8{,}35 \times 10^4\ \text{J} / 1{,}0 \times 10^3\ \text{W} \approx 84\ \text{s}$, cioè circa un minuto e mezzo. c) $\Delta T = Q/(mc) = 8{,}35 \times 10^4\ \text{J} / (0{,}250\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)}) \approx 80\ \text{K}$.

Controllo. Il risultato c non dipende dalla massa: per ogni kilogrammo, fondere il ghiaccio costa quanto scaldare l'acqua di circa 80 gradi. Per questo il ghiaccio che fonde è un modo efficace per tenere fresche le bibite.

13.2.2 L'effetto della pressione

La temperatura di fusione dipende un poco dalla pressione. Per la maggior parte delle sostanze il solido è più denso del liquido, e una pressione maggiore ne favorisce la formazione: la temperatura di fusione **aumenta** se la pressione aumenta. L'acqua fa eccezione, come sai dal capitolo 11: il ghiaccio, con densità 917 kg/m^3, è meno denso dell'acqua liquida e galleggia. Per l'acqua una pressione maggiore favorisce lo stato liquido, e la temperatura di fusione **diminuisce** se la pressione aumenta.

L'effetto, però, è piccolo: servono più di cento atmosfere per abbassare di un solo grado la temperatura di fusione del ghiaccio. Lo mostra un esperimento classico. Un filo metallico sottile, con due pesi appesi alle estremità, viene appoggiato su un blocco di ghiaccio a 0 °C o appena sotto: sotto il filo la pressione è altissima, il ghiaccio fonde, il filo affonda, e sopra di esso l'acqua, tornata alla pressione normale, congela di nuovo. Dopo un po' il filo attraversa tutto il blocco, che resta intero.

Per molto tempo si è spiegato così anche il pattinaggio sul ghiaccio: la lama, premendo, farebbe fondere il ghiaccio sotto di sé. Ma i conti non tornano: la pressione di una lama abbassa la temperatura di fusione di poco, al massimo di qualche grado, mentre si pattina bene anche a −20 °C. Oggi gli scienziati ritengono che contino soprattutto altri due fenomeni: sulla superficie del ghiaccio esiste, anche sotto 0 °C, un sottilissimo strato dalle proprietà simili a quelle di un liquido, e l'attrito della lama che scivola scalda e fonde un velo di ghiaccio. Il peso relativo dei vari meccanismi è ancora discusso.

13.3 La vaporizzazione e la condensazione

La vaporizzazione può avvenire in due modi diversi, che è importante distinguere: l'evaporazione e l'ebollizione. In entrambi i casi il liquido assorbe il calore latente di vaporizzazione.

13.3.1 L'evaporazione

Una pozzanghera, dopo un temporale estivo, si asciuga in poche ore, anche se l'acqua non arriva mai a 100 °C. È l'**evaporazione**: il passaggio di stato da liquido a vapore che avviene **solo dalla superficie libera** del liquido, e **a qualunque temperatura**. Le particelle di un liquido non hanno tutte la stessa velocità; quelle più veloci che arrivano alla superficie possono vincere l'attrazione delle vicine e sfuggire nell'aria.

L'evaporazione è più rapida quando la temperatura è più alta, quando la superficie libera è più ampia, quando c'è vento, che porta via il vapore appena formato, e quando l'aria è secca. In un'aria già carica di vapore, come in una giornata umida, il bucato stenta ad asciugare. Poiché sfuggono le particelle più veloci, quelle che restano hanno in media un'energia minore: **il liquido che evapora si raffredda**, se non riceve calore dall'esterno. In altre parole, il calore latente necessario all'evaporazione viene sottratto al liquido stesso e ai corpi a contatto con esso.

COLLEGAMENTI

Il sudore e le brocche di terracotta

Biologia. Quando fa caldo o facciamo sport, le ghiandole sudoripare bagnano la pelle; il sudore che evapora sottrae calore al corpo. A temperatura corporea il calore latente di vaporizzazione dell'acqua è un po' maggiore che a 100 °C, circa $2{,}4 \times 10^6$ J/kg: l'evaporazione di 100 g di sudore porta via circa $2{,}4 \times 10^5$ J. Se l'aria è molto umida il sudore evapora a fatica e cola senza raffreddare: è il motivo per cui il caldo umido è più faticoso da sopportare del caldo secco.

Tradizione. In molti paesi del Mediterraneo l'acqua da bere si teneva in brocche di terracotta non smaltata. La terracotta porosa lascia trasudare un po' d'acqua, che evapora dalla superficie esterna e raffredda la brocca e il suo contenuto; l'effetto è maggiore se la brocca è all'ombra, in un luogo ventilato e con aria secca.

13.3.2 L'ebollizione

Scaldiamo una pentola d'acqua. Già prima che bolla si vedono piccole bolle sul fondo: sono di aria che era disciolta nell'acqua. Poi, a una certa temperatura, si formano bolle di vapore in tutto il liquido, che salgono e scoppiano in superficie. È l'**ebollizione**: la vaporizzazione che avviene **in tutto il volume del liquido**, a una temperatura ben determinata, la **temperatura di ebollizione**.

Per capire che cosa fissa questa temperatura, immagina un liquido in un recipiente chiuso, da cui sia stata tolta l'aria. Il liquido evapora finché il vapore sopra di esso raggiunge una certa pressione, oltre la quale per ogni particella che sfugge un'altra rientra nel liquido. Questa pressione si chiama **tensione di vapore** del liquido e cresce rapidamente con la temperatura (Figura 13.2). Una bolla di vapore può formarsi e crescere dentro il liquido solo se la pressione del vapore al suo interno riesce a contrastare la pressione esterna che la schiaccia. Per questo **un liquido bolle alla temperatura alla quale la sua tensione di vapore è uguale alla pressione esterna**. A livello del mare, con la pressione atmosferica normale di 101 kPa, l'acqua bolle a 100 °C.

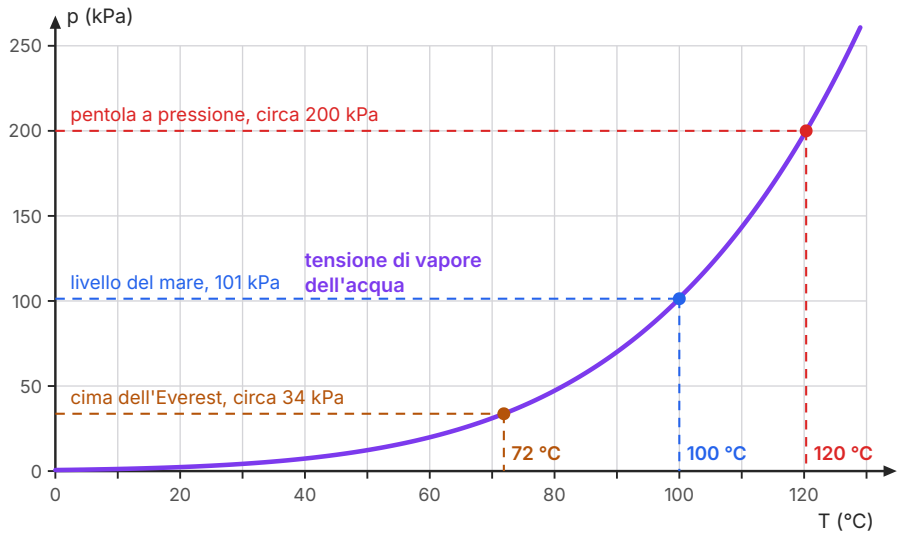


Figura 13.2 Tensione di vapore dell'acqua in funzione della temperatura (curva calcolata da una formula empirica che riproduce i dati sperimentali). L'acqua bolle quando la tensione di vapore uguaglia la pressione esterna: a pressioni diverse corrispondono temperature di ebollizione diverse.

Ne segue che la temperatura di ebollizione dipende dalla pressione esterna. In montagna la pressione atmosferica è minore (*Fisica 1*, capitolo 13) e l'acqua bolle sotto i 100 °C: in cima all'Everest, dove la pressione è circa un terzo di quella al livello del mare, bolle a poco più di 70 °C, e la pasta non cuoce bene. Nella pentola a pressione accade il contrario: il coperchio a chiusura ermetica trattiene il vapore, la pressione interna sale fino a circa il doppio di quella atmosferica e l'acqua bolle intorno a 120 °C. A quella temperatura i cibi cuociono molto più in fretta.

ERRORE FREQUENTE

«Quando l'acqua della pasta bolle, alzo la fiamma al massimo, così è più calda e la pasta cuoce prima.» No: a pressione atmosferica l'acqua che bolle resta a circa 100 °C, qualunque sia la fiamma. Con una fiamma più forte arriva più calore ogni secondo, ma serve solo a vaporizzare più acqua: le bolle sono più vivaci e la pentola si svuota prima, mentre la temperatura non cambia. Una fiamma moderata, che mantenga l'ebollizione, cuoce la pasta negli stessi minuti e consuma meno gas.

Il calore latente di vaporizzazione dell'acqua, $2{,}26 \times 10^6$ J/kg a 100 °C, è il più alto della Tabella 13.1. È la ragione per cui un'ustione da vapore è più grave di una da acqua bollente: il vapore

che tocca la pelle condensa e, prima ancora di raffreddarsi, cede tutto il suo calore latente.

ESEMPIO SVOLTO

Vapore o acqua bollente?

Problema. Confronta il calore ceduto alla pelle da 10 g di vapore a 100 °C, che condensa e poi si raffredda fino a 37 °C, con quello ceduto da 10 g di acqua a 100 °C che si raffredda fino a 37 °C.

Ragionamento. Il vapore attraversa due tratti: condensazione a 100 °C, con $Q = -mL_v$, e raffreddamento dell'acqua che ne risulta, con $Q = mc\Delta T$. L'acqua attraversa solo il secondo tratto.

Calcolo. Condensazione: $Q_1 = -0{,}010\ \text{kg} \times 2{,}26 \times 10^6\ \text{J/kg} = -2{,}26 \times 10^4\ \text{J}$. Raffreddamento: $Q_2 = 0{,}010\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times (37 - 100)\ \text{K} \approx -2{,}64 \times 10^3\ \text{J}$. Vapore in totale: $-2{,}52 \times 10^4$ J; acqua bollente: $-2{,}64 \times 10^3$ J.

Controllo. Il vapore cede circa dieci volte più energia dell'acqua alla stessa temperatura, e quasi tutta durante la condensazione. Per questo bisogna fare molta attenzione al getto di vapore di un ferro da stiro o di una pentola a pressione aperta troppo presto.

13.3.3 La condensazione

Nella condensazione il vapore torna liquido e cede il calore latente mL_v. La vedi ogni volta che il vapore incontra una superficie fredda: lo specchio del bagno che si appanna dopo la doccia, la bottiglia appena uscita dal frigorifero che si copre di goccioline, la rugiada sui prati dopo una notte serena. Anche le nuvole si formano per condensazione: l'aria umida che sale si raffredda, e il vapore condensa in minuscole goccioline. Il calore liberato dalla condensazione scalda la superficie su cui avviene: è così che la lancia della macchina del caffè scalda il latte.

13.3.4 La sublimazione e il brinamento

Alcune sostanze, a pressione atmosferica, passano direttamente dallo stato solido a quello aeriforme. Il ghiaccio secco, cioè anidride carbonica solida, sublima a −78,5 °C, senza lasciare traccia di liquido: per questo si usa per trasportare alimenti surgelati e per gli effetti di «nebbia» negli spettacoli, dove il gas freddissimo fa condensare il vapore dell'aria. Anche il ghiaccio sublima, lentamente: in una giornata fredda, secca e ventosa la neve può diminuire senza sciogliersi. Le industrie alimentari sfruttano la sublimazione per la liofilizzazione: molti caffè solubili e alcuni tipi di frutta disidratata si ottengono congelando l'alimento e facendo poi sublimare il ghiaccio a bassa pressione.

Il brinamento è il passaggio inverso. Nelle notti serene e fredde, quando gli oggetti all'aperto scendono sotto 0 °C, il vapore dell'aria si deposita direttamente come ghiaccio e forma la brina; lo strato bianco che si accumula sulle pareti di un congelatore nasce allo stesso modo, dal vapore dell'aria che entra quando apri lo sportello. Come gli altri passaggi, la sublimazione richiede calore e il brinamento lo cede: per il ghiaccio vicino a 0 °C servono circa $2{,}8 \times 10^6$ J/kg, più che per la fusione o per la vaporizzazione prese da sole.

13.4 Le curve di riscaldamento e di raffreddamento

13.4.1 La curva di riscaldamento dell'acqua

Mettiamo insieme tutto quello che sappiamo. Un blocco di 1 kg di ghiaccio a −20 °C riceve calore, lentamente e a pressione atmosferica, finché diventa vapore a 120 °C. Il grafico della temperatura in funzione del calore assorbito è la **curva di riscaldamento** (Figura 13.3). Lo calcoliamo tratto per tratto, con $c_{\text{ghiaccio}} \approx 2100$ J/(kg·K), $c_{\text{acqua}} = 4186$ J/(kg·K), $c_{\text{vapore}} \approx 2010$ J/(kg·K) e i calori latenti della Tabella 13.1:

A: il ghiaccio si scalda da −20 °C a 0 °C, $Q = 1\ \text{kg} \times 2100\ \text{J/(kg·K)} \times 20\ \text{K} = 42$ kJ. **B**: il ghiaccio fonde a 0 °C, $Q = 1\ \text{kg} \times 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} = 334$ kJ. **C**: l'acqua si scalda da 0 °C a 100 °C, $Q = 1\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 100\ \text{K} \approx 419$ kJ. **D**: l'acqua bolle a 100 °C, $Q = 1\ \text{kg} \times 2{,}26 \times 10^6\ \text{J/kg} = 2260$ kJ. **E**: il vapore si scalda da 100 °C a 120 °C, $Q = 1\ \text{kg} \times 2010\ \text{J/(kg·K)} \times 20\ \text{K} \approx 40$ kJ. In totale circa 3095 kJ.

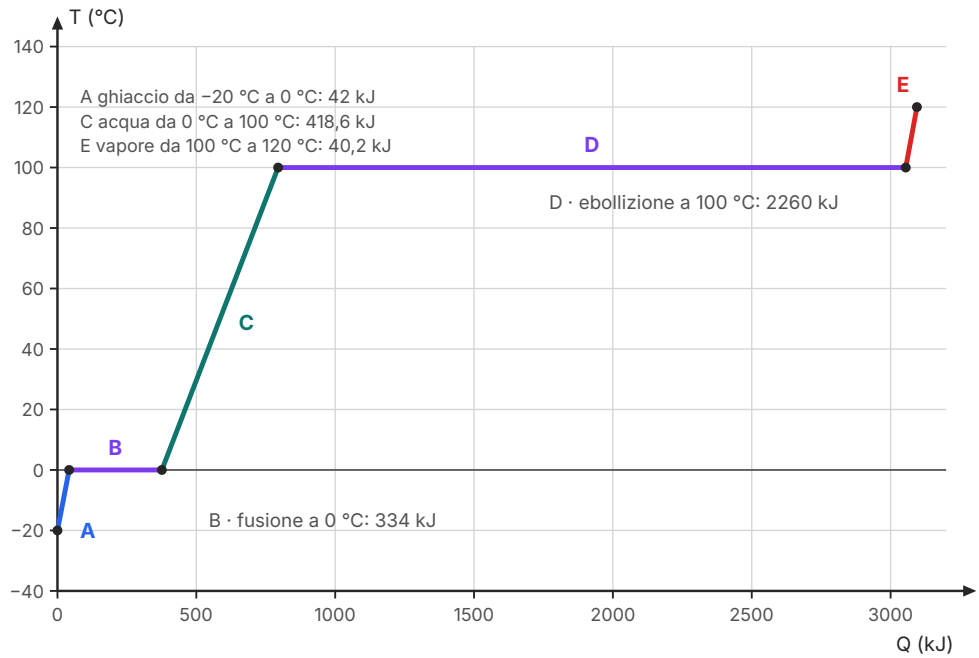


Figura 13.3 Curva di riscaldamento di 1 kg di acqua, da ghiaccio a −20 °C a vapore a 120 °C, a pressione atmosferica normale, calcolata con i calori specifici e i calori latenti del testo. In ascissa il calore assorbito dall'inizio; nei tratti orizzontali B e D la sostanza cambia stato a temperatura costante.

Il grafico si legge così. Nei tratti obliqui A, C ed E la sostanza è in un solo stato e la temperatura sale: poiché $\Delta T = Q/(mc)$, la pendenza è l'inverso della capacità termica mc. Ghiaccio e vapore, con un calore specifico circa metà di quello dell'acqua liquida, danno tratti circa due volte più ripidi. Nei tratti orizzontali B e D le due fasi convivono, ghiaccio e acqua oppure acqua e vapore, e la temperatura resta costante; la loro lunghezza è il calore latente moltiplicato per la massa. Il tratto D è di gran lunga il più lungo: quasi tre quarti dell'energia totale servono a far bollire l'acqua.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere la curva di riscaldamento

Problema. Il kilogrammo di ghiaccio della Figura 13.3 si trova in un recipiente scaldato da una resistenza che fornisce 2,0 kW, tutti all'acqua. a) Quanto dura ciascuno dei cinque tratti? b) Quanto dura l'intero processo? c) Disegna a mano libera il grafico della temperatura in funzione del *tempo*: in che cosa differisce dalla Figura 13.3?

Calcolo. a) Con potenza costante $\Delta t = Q/P$: A 42 kJ / 2,0 kW = 21 s; B 334 kJ / 2,0 kW = 167 s; C 418,6 kJ / 2,0 kW ≈ 209 s; D 2260 kJ / 2,0 kW = 1130 s; E 40,2 kJ / 2,0 kW ≈ 20 s. b) In totale circa 1547 s, cioè circa 26 minuti. c) Con potenza costante il tempo è proporzionale al calore fornito: il grafico in funzione del tempo ha la stessa forma della Figura 13.3, con l'asse orizzontale riscalato (1 s per ogni 2 kJ).

Osservazione. Più di 18 minuti su 26 se ne vanno per far bollire l'acqua. Nelle cucine reali i tempi sono più lunghi, perché una parte dell'energia scalda il recipiente e l'aria, e perché il ghiaccio e il vapore non ricevono calore in modo uniforme.

13.4.2 La curva di raffreddamento

Il procedimento si può rovesciare. Se mettiamo una bottiglietta di 0,5 kg di acqua a 20 °C in un congelatore a −18 °C e ne misuriamo la temperatura nel tempo, otteniamo una **curva di raffreddamento** (Figura 13.4). Prima l'acqua liquida si raffredda, tanto più lentamente quanto più si avvicina a 0 °C; poi, a 0 °C, comincia a solidificare e la temperatura resta costante finché tutta l'acqua non è diventata ghiaccio; infine il ghiaccio si raffredda verso la temperatura del congelatore.

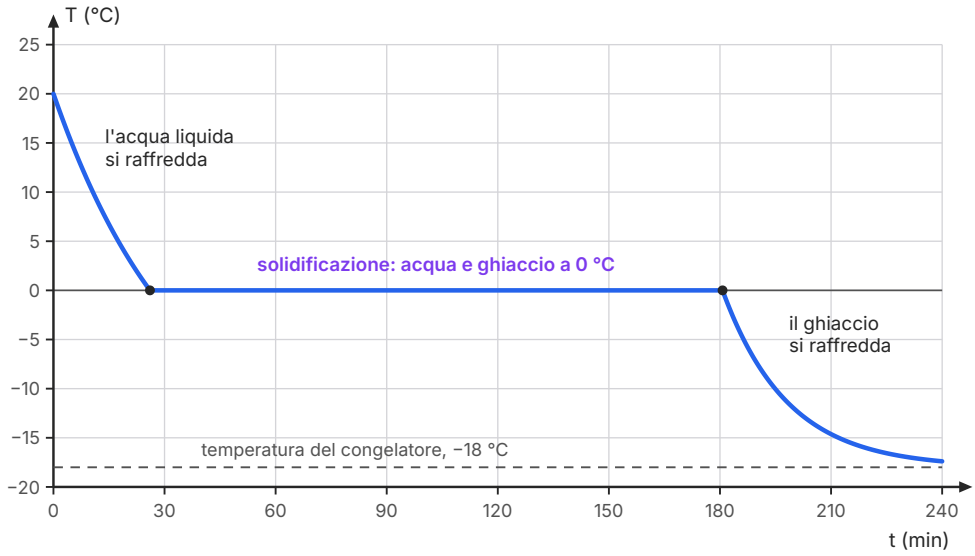


Figura 13.4 Curva di raffreddamento di 0,5 kg di acqua, inizialmente a 20 °C, in un congelatore a −18 °C, calcolata con un modello semplice in cui il calore ceduto ogni secondo è proporzionale alla differenza di temperatura con il congelatore. Il tratto orizzontale corrisponde alla solidificazione; la scala dei tempi è indicativa.

Il tratto orizzontale è molto lungo: per solidificare, l'acqua deve cedere $0{,}5\ \text{kg} \times 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} \approx 1{,}7 \times 10^5\ \text{J}$, circa quattro volte quanto ha ceduto per raffreddarsi da 20 °C a 0 °C. Ecco perché fare il ghiaccio in un congelatore richiede ore. Il tratto orizzontale rivela la temperatura di solidificazione: una miscela, che solidifica in un intervallo di temperature, non lo presenta.

APPROFONDIMENTO

La sopraffusione

In *Scienze 1* hai incontrato la **sopraffusione**: un liquido molto puro, raffreddato lentamente e senza scosse, può scendere sotto la temperatura di solidificazione restando liquido. Nella curva di raffreddamento della Figura 13.4 comparirebbe una piccola «buca» sotto 0 °C, prima del tratto orizzontale. Lo stato sopraffuso è però instabile: basta un granello di polvere, un urto o un cristallino di ghiaccio perché la solidificazione cominci all'improvviso.

A quel punto accade una cosa che il calore latente spiega bene: la temperatura **risale** di colpo fino a 0 °C. La parte di acqua che solidifica cede il suo calore latente al resto del liquido, scaldandolo; la solidificazione rapida si ferma quando tutto ha raggiunto 0 °C, e poi prosegue lentamente come nella curva normale.

La sopraffusione non è solo una curiosità di laboratorio. Nelle nuvole d'inverno ci sono goccioline d'acqua liquida ben sotto 0 °C, che congelano all'istante quando toccano un oggetto: è così che si forma il ghiaccio sulle ali degli aerei, contro cui gli aerei sono dotati di sistemi antighiaccio.

13.5 La calorimetria con i passaggi di stato

13.5.1 Prima di scrivere l'equazione: tutto il ghiaccio fonde?

Mettiamo del ghiaccio in acqua tiepida, in un recipiente isolato. Il bilancio del capitolo 12 vale ancora, $\Sigma Q = 0$, ma ora un corpo può cambiare stato, e non sappiamo in anticipo come andrà a finire: il ghiaccio può fondere tutto, e allora l'acqua finale sarà sopra 0 °C; oppure può fonderne solo una parte, e allora la miscela finale sarà acqua e ghiaccio a 0 °C. Se scrivessimo subito un'unica equazione supponendo il primo caso, nel secondo troveremmo una temperatura di equilibrio senza senso fisico, per esempio negativa per una miscela che contiene acqua liquida.

Il metodo sicuro è un ragionamento in due passi, che conviene fare **prima** di scrivere qualunque equazione (Figura 13.5). Primo passo: calcola il calore che l'acqua calda può cedere scendendo fino a 0 °C, il «calore disponibile». Secondo passo: calcola il calore necessario per portare tutto il ghiaccio a 0 °C e per fonderlo tutto, il «calore necessario». Se il disponibile supera il necessario, tutto il ghiaccio fonde e la temperatura di equilibrio è sopra 0 °C: la trovi con il bilancio completo. Se il disponibile è minore, fonde solo una parte del ghiaccio e la temperatura finale è 0 °C: la massa fusa è il calore rimasto diviso per L_f.

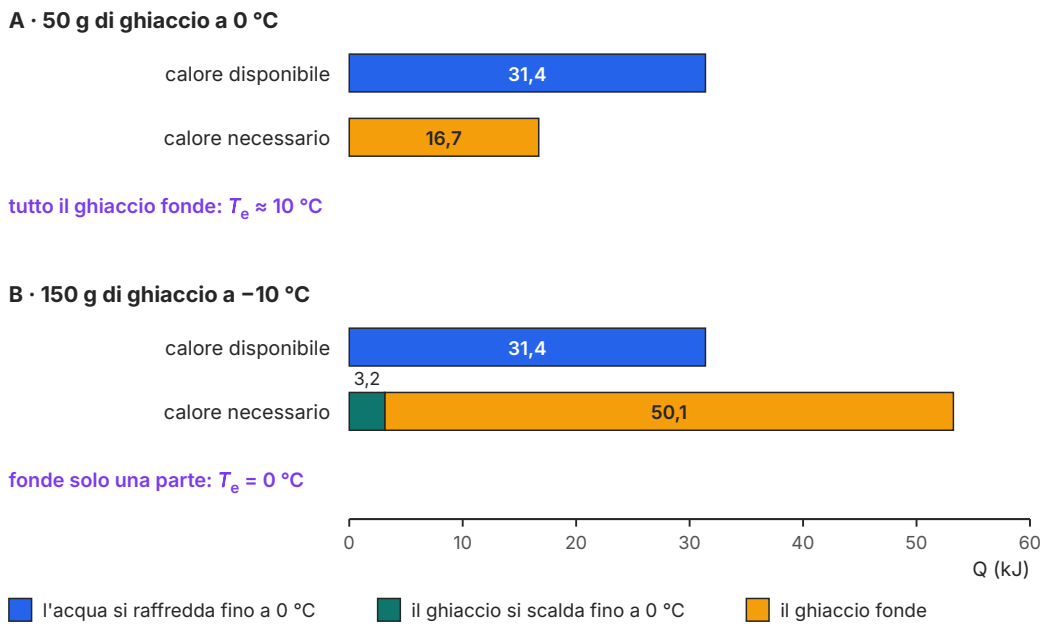


Figura 13.5 Il ragionamento in due passi per 0,300 kg di acqua a 25 °C, a cui si aggiunge del ghiaccio. Il calore disponibile è quello che l'acqua cede scendendo fino a 0 °C. A: 50 g di ghiaccio a 0 °C, il disponibile supera il necessario. B: 150 g di ghiaccio a −10 °C, il disponibile non basta a fondere tutto il ghiaccio.

ESEMPIO SVOLTO

Il ghiaccio fonde tutto

Problema. In un recipiente isolato, di capacità termica trascurabile, ci sono 0,300 kg di acqua a 25,0 °C. Si aggiungono 50 g di ghiaccio a 0 °C. Calcola la temperatura di equilibrio (caso A della Figura 13.5).

Due passi. Calore disponibile: 0,300 kg × 4186 J/(kg·K) × 25,0 K ≈ $3{,}14 \times 10^4$ J. Calore necessario per fondere tutto il ghiaccio: 0,050 kg × $3{,}34 \times 10^5$ J/kg = $1{,}67 \times 10^4$ J. Il disponibile è maggiore: il ghiaccio fonde tutto, e l'acqua che ne risulta si scalda fino a $T_e > 0$ °C.

Bilancio. Acqua calda: $Q_1 = 0{,}300$ kg × 4186 J/(kg·K) × (T_e − 25,0 °C). Ghiaccio: fusione $Q_2 = +1{,}67 \times 10^4$ J, poi riscaldamento dell'acqua di fusione da 0 °C a T_e: $Q_3 = 0{,}050$ kg × 4186 J/(kg·K) × (T_e − 0 °C). Ponendo $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$: $1255{,}8\ T_e - 31\,395 + 16\,700 + 209{,}3\ T_e = 0$, da cui $T_e = 14\,695 / 1465{,}1$ °C ≈ 10,0 °C.

Controllo. Senza la fusione, mescolare 300 g di acqua a 25 °C con 50 g di acqua a 0 °C darebbe una media pesata di circa 21 °C. Il ghiaccio raffredda molto di più dell'acqua alla stessa temperatura, perché per fondere assorbe il calore latente.

ESEMPIO SVOLTO

Il ghiaccio non fonde tutto

Problema. Nella stessa acqua, 0,300 kg a 25,0 °C, si mettono invece 150 g di ghiaccio a −10,0 °C (caso B della Figura 13.5). Qual è lo stato finale? Quanto ghiaccio fonde?

Due passi. Calore disponibile: $3{,}14 \times 10^4$ J, come prima. Calore necessario: per portare il ghiaccio a 0 °C, 0,150 kg × 2100 J/(kg·K) × 10,0 K = $3{,}15 \times 10^3$ J; per fonderlo tutto, 0,150 kg × $3{,}34 \times 10^5$ J/kg ≈ $5{,}01 \times 10^4$ J; in totale $5{,}33 \times 10^4$ J. Il disponibile è minore: il ghiaccio non fonde tutto e lo stato finale è una miscela di acqua e ghiaccio a 0 °C.

Calcolo. Scendendo a 0 °C l'acqua cede 31 395 J; 3150 J servono a scaldare il ghiaccio fino a 0 °C; restano 28 245 J per la fusione. Massa fusa: m = 28 245 J / $3{,}34 \times 10^5$ J/kg ≈ 0,085 kg. Alla fine ci sono 0,385 kg di acqua e circa 65 g di ghiaccio, a 0 °C.

Controllo. Se avessimo scritto subito il bilancio supponendo che il ghiaccio fondesse tutto, avremmo trovato $T_e \approx -11{,}6$ °C: impossibile per una miscela che contiene acqua liquida. Il risultato negativo è il segnale che l'ipotesi era sbagliata.

DA RICORDARE

Calorimetria con il ghiaccio, in quattro mosse. 1) Calcola il calore disponibile: quello che i corpi caldi cedono scendendo fino alla temperatura del passaggio di stato. 2) Calcola il calore necessario per portare il ghiaccio a quella temperatura e per fonderlo tutto. 3) Confronta: se il disponibile basta, scrivi il bilancio completo $\Sigma Q = 0$ con un termine mL_f e trova T_e; se non basta, T_e è la temperatura del passaggio e trovi la massa che ha cambiato stato. 4) Controlla che il risultato abbia senso fisico.

Con lo stesso bilancio si misura in laboratorio il calore latente di fusione: si mettono cubetti di ghiaccio a 0 °C in una quantità nota di acqua tiepida, scegliendo le masse in modo che tutto il ghiaccio fonda, e dalla temperatura di equilibrio si ricava L_f. Si usa il calorimetro delle mescolanze del capitolo 12, con il suo equivalente in acqua.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: il calore latente di fusione del ghiaccio

Materiali. Un calorimetro delle mescolanze con agitatore, di equivalente in acqua noto, m_e = (20 ± 5) g, misurato come nel capitolo 12; un termometro digitale (risoluzione 0,1 °C); una bilancia (sensibilità 0,1 g); cubetti di ghiaccio presi da una miscela di acqua e ghiaccio fondente, quindi a 0 °C; carta assorbente; acqua tiepida.

Procedimento. 1) Si versano nel calorimetro m_a = 200,0 g di acqua tiepida, si attende che la temperatura sia stabile e la si legge, T_a. 2) Si asciugano in fretta alcuni cubetti con la carta assorbente, perché l'acqua di fusione aderente non va contata come ghiaccio, e si mettono nel calorimetro; si chiude e si agita. 3) Si legge la temperatura minima raggiunta, T_e, quando tutto il ghiaccio è fuso. 4) Si pesa di nuovo il calorimetro con il contenuto: la differenza di massa è la massa di ghiaccio m_g. 5) Si ripete tre volte con masse diverse. Dal bilancio $(m_a + m_e)c_a(T_e - T_a) + m_g L_f + m_g c_a(T_e - 0\ °C) = 0$ si ricava L_f.

Tabella 13.2 Misure del calore latente di fusione del ghiaccio, con m_a = (200,0 ± 0,1) g e m_e = (20 ± 5) g; le temperature hanno incertezza ± 0,2 °C (dati tipici).

prova	m_g (g)	T_a (°C)	T_e (°C)	L_f (10^5 J/kg)
1	50,2	40,0	17,6	3,37 ± 0,18
2	41,8	38,6	19,7	3,34 ± 0,20
3	60,5	41,2	15,2	3,32 ± 0,17

Che cosa concludere. Per la prova 1, per esempio: L_f = [(0,2200 kg × 4186 J/(kg·K) × 22,4 K) − (0,0502 kg × 4186 J/(kg·K) × 17,6 K)] / 0,0502 kg ≈ $3{,}37 \times 10^5$ J/kg. L'incertezza si stima calcolando L_f con i valori estremi delle grandezze misurate: il contributo maggiore viene dall'equivalente in acqua, 5 g su 220 g, poi dalle temperature. I tre valori, con incertezze del 5–6%, sono compatibili fra loro e con il valore di riferimento $3{,}34 \times 10^5$ J/kg; la loro media è $3{,}34 \times 10^5$ J/kg.

Sicurezza. L'acqua tiepida non presenta rischi, ma la vetreria va maneggiata con cura e l'acqua versata asciugata subito, per non scivolare. Se l'acqua viene scaldata in laboratorio, la piastra la accende e la spegne l'insegnante.

Per la relazione. Segui lo schema di *Fisica 1*, capitolo 5. Scrivi il bilancio dei calori, spiegando ogni termine e il suo segno, e la formula risolta rispetto a L_f. Riporta la tabella con le incertezze e i tre valori di L_f; verifica che siano compatibili fra loro e con il valore di riferimento. Discuti gli errori sistematici: l'acqua di fusione rimasta sui cubetti, che fa sembrare il ghiaccio più abbondante e porta a un L_f troppo basso; il ghiaccio preso dal congelatore, sotto 0 °C, che porta a un valore troppo alto; gli scambi con l'ambiente. Indica infine come sceglieresti la temperatura iniziale dell'acqua per ridurre questi scambi (suggerimento: un po' sopra la temperatura ambiente, in modo che la temperatura finale cada un po' sotto).

IN SINTESI

Le formule dei passaggi di stato

$Q = \pm mL$ — calore (J) assorbito (+) o ceduto (−) da una massa m (kg) che cambia stato a temperatura costante; L calore latente (J/kg).

L_f — calore latente di fusione: vale per fusione e solidificazione; ghiaccio $3{,}34 \times 10^5$ J/kg.

L_v — calore latente di vaporizzazione: vale per vaporizzazione e condensazione; acqua a 100 °C $2{,}26 \times 10^6$ J/kg, quasi sette volte L_f.

$Q = mc\Delta T$ — vale solo nei tratti in cui la sostanza resta in un solo stato; attraverso un passaggio di stato il calcolo si spezza in tratti.

Una sostanza pura, a pressione costante, cambia stato a temperatura costante; un liquido bolle quando la sua tensione di vapore uguaglia la pressione esterna, quindi la temperatura di ebollizione cresce con la pressione.

$\Sigma Q = 0$ con i passaggi di stato — prima confronta il calore disponibile con quello necessario: se il ghiaccio non fonde tutto, $T_e = 0$ °C.

SINTESI

- I passaggi di stato sono sei: fusione e solidificazione, vaporizzazione e condensazione, sublimazione e brinamento.
- Nella fusione, nella vaporizzazione e nella sublimazione il corpo assorbe calore; nei passaggi opposti cede la stessa quantità di calore.
- A pressione costante una sostanza pura cambia stato a temperatura costante: l'energia assorbita serve a separare le particelle, non ad aumentarne l'agitazione.
- Il calore per un passaggio di stato è $Q = mL$; il calore latente L si misura in J/kg. Per l'acqua $L_f = 3{,}34 \times 10^5$ J/kg e $L_v = 2{,}26 \times 10^6$ J/kg a 100 °C.
- Temperatura di fusione e di solidificazione coincidono; per l'acqua la temperatura di fusione diminuisce leggermente se la pressione aumenta, perché il ghiaccio è meno denso dell'acqua.
- L'evaporazione avviene a qualunque temperatura, dalla sola superficie, e raffredda il liquido; dipende da temperatura, superficie, ventilazione e umidità dell'aria.
- L'ebollizione avviene in tutto il liquido, alla temperatura alla quale la tensione di vapore uguaglia la pressione esterna: in montagna l'acqua bolle sotto 100 °C, nella pentola a pressione sopra.
- Nella condensazione e nel brinamento il vapore cede calore: per questo le ustioni da vapore sono più gravi di quelle da acqua bollente.
- Nella curva di riscaldamento i tratti obliqui hanno pendenza inversamente proporzionale alla capacità termica, i tratti orizzontali hanno lunghezza mL; per l'acqua il tratto dell'ebollizione è il più lungo.
- Nella curva di raffreddamento il tratto orizzontale rivela la temperatura di solidificazione; nella sopraffusione un liquido resta tale sotto quella temperatura, in uno stato instabile.
- Nei problemi con ghiaccio e acqua si confronta prima il calore disponibile con quello necessario per fondere tutto il ghiaccio; se non basta, la temperatura finale è 0 °C.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Il passaggio diretto dallo stato aeriforme allo stato solido si chiama:
   - **A.** sublimazione
   - **B.** brinamento
   - **C.** condensazione
   - **D.** solidificazione

2. ● Mentre un blocco di ghiaccio fonde a pressione atmosferica, la sua temperatura:

   A. aumenta lentamente

   B. diminuisce

   C. resta costante a 0 °C

   D. aumenta e diminuisce in modo irregolare

3. ● Nel SI il calore latente si misura in:

   A. J/kg

   B. J/(kg·K)

   C. J/K

   D. W

4. ●● In quale di questi passaggi di stato il corpo cede calore?

   A. fusione

   B. sublimazione

   C. vaporizzazione

   D. condensazione

5. ● L'evaporazione di un liquido:

   A. avviene solo alla temperatura di ebollizione

   B. avviene a qualunque temperatura, dalla superficie libera

   C. avviene in tutto il volume del liquido

   D. scalda il liquido che rimane

6. ●● In alta montagna l'acqua bolle a una temperatura più bassa di 100 °C perché:

   A. l'aria è più fredda

   B. la pressione atmosferica è minore

   C. l'acqua di montagna è più pura

   D. l'accelerazione di gravità è minore

7. ●● Per fondere 2,0 kg di ghiaccio a 0 °C servono:

   A. $6{,}7 \times 10^5$ J

   B. $1{,}7 \times 10^5$ J

   C. $8{,}4 \times 10^3$ J

   D. $4{,}5 \times 10^6$ J

8. ●● Nella curva di riscaldamento dell'acqua della Figura 13.3 il tratto più lungo corrisponde:

   A. al riscaldamento del ghiaccio

   B. alla fusione

   C. al riscaldamento dell'acqua liquida

   D. all'ebollizione

9. ●●● In un recipiente isolato si mettono 100 g di ghiaccio a 0 °C in 100 g di acqua a 20 °C. Alla fine:
   A. tutto il ghiaccio è fuso e la temperatura è 10 °C
   B. tutto il ghiaccio è fuso e la temperatura è 0 °C
   C. restano circa 75 g di ghiaccio, a 0 °C
   D. tutta l'acqua è diventata ghiaccio

Vero o falso

10. ● La condensazione è il passaggio da aeriforme a liquido. V / F

11. ● A pressione atmosferica normale, se si alza la fiamma sotto una pentola d'acqua che bolle, la temperatura dell'acqua supera i 100 °C. V / F

12. ●● Per vaporizzare 1 kg di acqua a 100 °C serve più energia che per scaldarlo da 0 °C a 100 °C. V / F

13. ●● Alla stessa pressione, una sostanza pura solidifica a una temperatura diversa da quella a cui fonde. V / F

14. ●● Il sudore raffredda la pelle perché, evaporando, sottrae calore al corpo. V / F

Applicare

15. ● Calcola il calore necessario per fondere 350 g di ghiaccio a 0 °C.

16. ● Quanto calore cedono 0,80 kg di vapore a 100 °C condensando completamente, senza raffreddarsi?

17. ● Quanto ghiaccio a 0 °C si può fondere con $5{,}0 \times 10^4$ J?

18. ● Usa la Tabella 13.1. Quanto calore serve per fondere 0,50 kg di piombo che si trova già alla sua temperatura di fusione? A quale temperatura avviene la fusione?

19. ●● Un campione di 0,200 kg di una sostanza, che si trova alla sua temperatura di fusione, fonde completamente assorbendo $2{,}16 \times 10^4$ J. Calcola il calore latente di fusione e, con la Tabella 13.1, riconosci la sostanza.

20. ● Completa. Il passaggio diretto da solido ad aeriforme si chiama _____ ; in esso il corpo _____ calore. Il passaggio inverso si chiama _____ . Un liquido bolle quando la sua _____ è uguale alla pressione esterna.

21. ●● Usa la Figura 13.2. A una quota di circa 3000 m la pressione atmosferica è circa 70 kPa. A che temperatura bolle l'acqua?

22. ●● Usa la Figura 13.3. Quanta energia serve per portare 1 kg di ghiaccio da −20 °C ad acqua liquida a 100 °C? Che percentuale di questa energia serve per la fusione?

Problemi

23. ●● Calcola l'energia necessaria per trasformare 0,500 kg di ghiaccio a −10,0 °C in vapore a 100 °C, a pressione atmosferica normale. Quale tratto richiede più energia?

24. ●● Un bollitore elettrico da 2,0 kW contiene 1,2 kg di acqua a 20 °C. Supponi che tutta la potenza vada all'acqua. a) Quanto tempo serve per portarla all'ebollizione? b) Se il bollitore non si spegnesse, quanto tempo servirebbe ancora per far evaporare metà dell'acqua? (Usa la definizione di potenza del capitolo 8.)

25. ●● In una vaschetta per il ghiaccio ci sono 0,200 kg di acqua a 0 °C. a) Quanto calore deve cederle il congelatore per trasformarla in ghiaccio a −18 °C? b) Se il congelatore sottrae all'acqua 50 W, quanto tempo serve?

26. ●●● Hai 0,300 kg di tè a 80 °C (consideralo acqua) in un contenitore isolato di capacità termica trascurabile. a) Aggiungi 60 g di ghiaccio a 0 °C: verifica che fonda tutto e calcola la temperatura finale. b) Quanto ghiaccio a 0 °C avresti dovuto aggiungere al tè a 80 °C per portarlo a 10 °C?

27. ●●● In un calorimetro di capacità termica trascurabile ci sono 0,250 kg di acqua a 20,0 °C. Si aggiungono 0,120 kg di ghiaccio a −15,0 °C. Determina lo stato finale e, se resta del ghiaccio, la sua massa.

28. ●●● Un blocco di ghiaccio di 2,0 kg, a 0 °C, parte da fermo e scende lungo uno scivolo alto 6,0 m; in fondo ha una velocità di 4,0 m/s. a) Calcola l'energia meccanica dissipata dall'attrito (capitolo 10). b) Se metà di questa energia diventa energia interna del ghiaccio, quanto ghiaccio fonde?

29. ●● La lancia della macchina del caffè soffia vapore a 100 °C in 0,150 kg di latte a 5 °C, per scaldarlo fino a 65 °C. Considera il latte come acqua e trascura le perdite. Quanto vapore condensa nel latte?

Ragionare e argomentare

30. ●● In una giornata fredda il vetro interno della finestra di una cucina in cui bolle una pentola si appanna. Spiega perché, e spiega perché l'appannamento scalda leggermente il vetro.

31. ●●● Trova l'errore. Un compagno scrive: «Metto 100 g di ghiaccio a −20 °C in 200 g di acqua a 30 °C. Bilancio: $0{,}200 \cdot 4186 \cdot (T_e - 30) + 0{,}100 \cdot 2100 \cdot (T_e + 20) = 0$, quindi $T_e \approx 20$ °C». Dov'è l'errore? Qual è lo stato finale corretto?

32. ●●● Stima di Fermi. Durante un'ora di salita in bicicletta un ciclista deve smaltire circa 600 W di potenza termica. Se la smaltisse tutta con l'evaporazione del sudore (calore latente circa $2{,}4 \times 10^6$ J/kg), quanta acqua perderebbe in un'ora? Che cosa ne concludi per la borraccia?

33. ●● Progetta un esperimento per mostrare che l'evaporazione raffredda un corpo e che l'effetto aumenta con la ventilazione. Indica il materiale, che cosa misuri e quali grandezze tieni uguali.

PER APPROFONDIRE

- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo su temperatura e calore, con i problemi di calorimetria che includono i passaggi di stato.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: il capitolo sui passaggi di stato, con molti esempi quotidiani di evaporazione, condensazione ed ebollizione.
- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: le pagine iniziali sugli atomi in movimento, con la descrizione dell'evaporazione dell'acqua vista dalle molecole.

Glossario del capitolo

Brinamento
Passaggio diretto dallo stato aeriforme allo stato solido; il corpo cede calore.

Calore latente
Calore che fa cambiare stato a 1 kg di una sostanza che si trova già alla temperatura del passaggio: $L = Q/m$, in J/kg.

Calore latente di fusione
Calore latente L_f della fusione e della solidificazione; per il ghiaccio $3{,}34 \times 10^5$ J/kg.

Calore latente di vaporizzazione
Calore latente L_v della vaporizzazione e della condensazione; per l'acqua a 100 °C $2{,}26 \times 10^6$ J/kg.

Condensazione
Passaggio dallo stato aeriforme allo stato liquido; il corpo cede calore.

Curva di raffreddamento
Grafico della temperatura di una sostanza che si raffredda in funzione del tempo; il tratto orizzontale indica la solidificazione.

Curva di riscaldamento
Grafico della temperatura di una sostanza in funzione del calore assorbito (o del tempo, a potenza costante), con tratti orizzontali nei passaggi di stato.

Ebollizione
Vaporizzazione che avviene in tutto il volume del liquido, con formazione di bolle di vapore, alla temperatura di ebollizione.

Evaporazione
Vaporizzazione che avviene dalla sola superficie libera di un liquido, a qualunque temperatura; raffredda il liquido.

Fusione
Passaggio dallo stato solido allo stato liquido; il corpo assorbe calore.

Passaggio di stato
Trasformazione di una sostanza da uno stato di aggregazione a un altro; a pressione costante, per una sostanza pura, avviene a temperatura costante.

Solidificazione
Passaggio dallo stato liquido allo stato solido; il corpo cede calore. Per l'acqua si dice anche congelamento.

Sopraffusione
Stato instabile di un liquido che si trova sotto la propria temperatura di solidificazione senza solidificare.

Sublimazione
Passaggio diretto dallo stato solido allo stato aeriforme; il corpo assorbe calore.

Temperatura di ebollizione
Temperatura alla quale la tensione di vapore di un liquido uguaglia la pressione esterna; per l'acqua 100 °C a pressione atmosferica normale.

Temperatura di fusione
Temperatura alla quale, a una data pressione, un solido cristallino puro fonde; coincide con la temperatura di solidificazione.

Tensione di vapore
Pressione del vapore in equilibrio con il proprio liquido in un recipiente chiuso; cresce con la temperatura.

Vaporizzazione
Passaggio dallo stato liquido allo stato aeriforme, per evaporazione o per ebollizione; il corpo assorbe calore.

Soluzioni

1. B. La sublimazione è il passaggio opposto, da solido ad aeriforme; la condensazione porta da aeriforme a liquido.

2. C. Durante un passaggio di stato di una sostanza pura, a pressione costante, la temperatura non cambia: il calore assorbito serve al passaggio.

3. A. $L = Q/m$: joule diviso kilogrammo. Non c'è il kelvin, perché la temperatura non cambia.

4. D. La condensazione riforma i legami fra le particelle e libera il calore latente di vaporizzazione.

5. B. L'evaporazione riguarda la superficie e avviene a ogni temperatura; sfuggendo le particelle più veloci, il liquido si raffredda.

6. B. Un liquido bolle quando la tensione di vapore uguaglia la pressione esterna: se la pressione è minore, basta una temperatura più bassa.

7. A. $Q = mL_f = 2{,}0\ \text{kg} \times 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} \approx 6{,}7 \times 10^5\ \text{J}$.

8. D. L'ebollizione di 1 kg di acqua richiede 2260 kJ, quasi tre quarti dell'energia totale.

9. C. Calore disponibile: $0{,}100\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 20\ \text{K} \approx 8{,}4 \times 10^3\ \text{J}$; per fondere tutto il ghiaccio ne servono $3{,}34 \times 10^4$ J. Fondono 8372 J / $3{,}34 \times 10^5$ J/kg ≈ 25 g; restano circa 75 g di ghiaccio, e la miscela è a 0 °C.

10. V. È il passaggio opposto alla vaporizzazione.

11. F. Durante l'ebollizione la temperatura resta costante: il calore in più vaporizza più acqua ogni secondo.

12. V. $2{,}26 \times 10^6$ J contro $4186\ \text{J/(kg·K)} \times 1\ \text{kg} \times 100\ \text{K} \approx 4{,}19 \times 10^5$ J: più di cinque volte tanto.

13. F. Alla stessa pressione la temperatura di fusione e quella di solidificazione coincidono.

14. V. L'evaporazione richiede il calore latente di vaporizzazione, che viene sottratto alla pelle.

15. $Q = mL_f = 0{,}350\ \text{kg} \times 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} \approx 1{,}17 \times 10^5\ \text{J}$.

16. $Q = -mL_v = -0{,}80\ \text{kg} \times 2{,}26 \times 10^6\ \text{J/kg} \approx -1{,}8 \times 10^6$ J: il vapore cede $1{,}8 \times 10^6$ J.

17. $m = Q/L_f = 5{,}0 \times 10^4\ \text{J} / 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} \approx 0{,}15\ \text{kg}$.

18. $Q = mL_f = 0{,}50\ \text{kg} \times 2{,}3 \times 10^4\ \text{J/kg} \approx 1{,}2 \times 10^4$ J, a 327 °C.

19. $L_f = Q/m = 2{,}16 \times 10^4\ \text{J} / 0{,}200\ \text{kg} = 1{,}08 \times 10^5\ \text{J/kg}$: è alcol etilico.

20. sublimazione; assorbe; brinamento; tensione di vapore.

21. Sulla curva, alla tensione di vapore di 70 kPa corrisponde una temperatura di circa 90 °C.

22. Si sommano i tratti A, B e C: 42 kJ + 334 kJ + 418,6 kJ ≈ 795 kJ, cioè circa $7{,}9 \times 10^5$ J. La fusione ne richiede 334/795 ≈ 42%.

23. Quattro tratti. Ghiaccio da −10 °C a 0 °C: $0{,}500\ \text{kg} \times 2100\ \text{J/(kg·K)} \times 10{,}0\ \text{K} = 1{,}05 \times 10^4$ J. Fusione: $0{,}500\ \text{kg} \times 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} = 1{,}67 \times 10^5$ J. Acqua da 0 °C a 100 °C: $0{,}500\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 100\ \text{K} \approx 2{,}09 \times 10^5$ J. Vaporizzazione: $0{,}500\ \text{kg} \times 2{,}26 \times 10^6\ \text{J/kg} = 1{,}13 \times 10^6$ J. Totale ≈ $1{,}52 \times 10^6$ J; la vaporizzazione ne richiede circa il 74%.

24. a) $Q = mc\Delta T = 1{,}2\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 80\ \text{K} \approx 4{,}02 \times 10^5$ J; $\Delta t = Q/P = 4{,}02 \times 10^5\ \text{J} / 2{,}0 \times 10^3\ \text{W} \approx 2{,}0 \times 10^2$ s, circa 3,3 minuti. b) $Q = 0{,}60\ \text{kg} \times 2{,}26 \times 10^6\ \text{J/kg} \approx 1{,}36 \times 10^6$ J; $\Delta t \approx 1{,}36 \times 10^6\ \text{J} / 2{,}0 \times 10^3\ \text{W} \approx 6{,}8 \times 10^2$ s, circa 11 minuti: più del triplo del tempo per scaldarla.

25. a) Solidificazione: $-0{,}200\ \text{kg} \times 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} = -6{,}68 \times 10^4$ J; raffreddamento del ghiaccio: $0{,}200\ \text{kg} \times 2100\ \text{J/(kg·K)} \times (-18\ \text{K}) \approx -7{,}56 \times 10^3$ J. Totale $Q \approx -7{,}44 \times 10^4$ J: il congelatore deve sottrarre $7{,}44 \times 10^4$ J. b) $\Delta t = 7{,}44 \times 10^4\ \text{J} / 50\ \text{W} \approx 1{,}5 \times 10^3$ s, circa 25 minuti.

26. a) Calore disponibile: $0{,}300\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 80\ \text{K} \approx 1{,}00 \times 10^5$ J; necessario per fondere il ghiaccio: $0{,}060\ \text{kg} \times 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} \approx 2{,}0 \times 10^4$ J. Fonde tutto. Bilancio: $0{,}300 \times 4186 \times (T_e - 80) + 20\,040 + 0{,}060 \times 4186 \times T_e = 0 \Rightarrow T_e = 80\,424 / 1507\ °\text{C} \approx 53\ °\text{C}$. b)

Il tè cede 0,300 kg × 4186 J/(kg·K) × 70 K ≈ $8{,}79 \times 10^4$ J; ogni kilogrammo di ghiaccio assorbe $3{,}34 \times 10^5$ J/kg + 4186 J/(kg·K) × 10 K ≈ $3{,}76 \times 10^5$ J/kg. $m = 8{,}79 \times 10^4$ J / $3{,}76 \times 10^5$ J/kg ≈ 0,23 kg.

27. Calore disponibile: 0,250 kg × 4186 J/(kg·K) × 20,0 K ≈ $2{,}09 \times 10^4$ J. Necessario: per scaldare il ghiaccio a 0 °C, 0,120 kg × 2100 J/(kg·K) × 15,0 K = $3{,}78 \times 10^3$ J; per fonderlo tutto, 0,120 kg × $3{,}34 \times 10^5$ J/kg ≈ $4{,}01 \times 10^4$ J. Il disponibile non basta: la temperatura finale è 0 °C. Per la fusione restano 20 930 J − 3780 J = 17 150 J, che fondono 17 150 J / $3{,}34 \times 10^5$ J/kg ≈ 0,051 kg. Restano circa 0,069 kg di ghiaccio, con 0,301 kg di acqua, a 0 °C.

28. a) Sul blocco agiscono il peso, la reazione normale (che non compie lavoro) e l'attrito. Con lo zero in fondo: mgh = 2,0 kg × 9,8 m/s^2 × 6,0 m ≈ 118 J; K = ½ × 2,0 kg × (4,0 m/s)^2 = 16 J. Energia dissipata: 117,6 J − 16 J ≈ $1{,}0 \times 10^2$ J ($W_{nc} \approx -1{,}0 \times 10^2$ J). b) $Q \approx 51$ J; $m = Q/L_f$ = 51 J / $3{,}34 \times 10^5$ J/kg ≈ $1{,}5 \times 10^{-4}$ kg, cioè circa 0,15 g: una quantità minuscola.

29. Il latte assorbe 0,150 kg × 4186 J/(kg·K) × 60 K ≈ $3{,}77 \times 10^4$ J. Ogni kilogrammo di vapore cede L_v condensando e poi 4186 J/(kg·K) × 35 K raffreddandosi da 100 °C a 65 °C: in totale ≈ $2{,}41 \times 10^6$ J/kg. m = $3{,}77 \times 10^4$ J / $2{,}41 \times 10^6$ J/kg ≈ 0,016 kg, circa 16 g.

30. Traccia di risposta. L'aria della cucina contiene molto vapore; a contatto con il vetro freddo il vapore si raffredda e condensa in goccioline. La condensazione cede il calore latente di vaporizzazione al vetro, che quindi si scalda un poco.

31. Il compagno ha ignorato la fusione e ha usato il calore specifico del ghiaccio anche sopra 0 °C. Ragionamento in due passi: disponibile 0,200 kg × 4186 J/(kg·K) × 30 K ≈ $2{,}51 \times 10^4$ J; necessario 0,100 kg × 2100 J/(kg·K) × 20 K + 0,100 kg × $3{,}34 \times 10^5$ J/kg = 4200 J + 33 400 J = $3{,}76 \times 10^4$ J. Il disponibile non basta: lo stato finale è acqua e ghiaccio a 0 °C. Fondono (25 116 − 4200) J / $3{,}34 \times 10^5$ J/kg ≈ 0,063 kg; restano circa 37 g di ghiaccio.

32. Traccia di risposta. Energia in un'ora: 600 W × 3600 s ≈ $2{,}2 \times 10^6$ J. Massa evaporata: $2{,}2 \times 10^6$ J / $2{,}4 \times 10^6$ J/kg ≈ 0,9 kg, cioè quasi un litro. In realtà una parte dell'energia esce anche per convezione e irraggiamento, e una parte del sudore cola senza evaporare; l'ordine di grandezza, circa un litro all'ora, dice che bisogna bere regolarmente durante uno sforzo lungo al caldo.

33. Traccia di risposta. Tre termometri digitali uguali: il bulbo del primo resta asciutto, quello del secondo e del terzo viene avvolto in una garza bagnata con acqua a temperatura ambiente. Il terzo viene posto davanti a un piccolo ventilatore. Si leggono le tre temperature ogni 30 s per alcuni minuti, nella stessa stanza e lontano da fonti di calore. Ci si aspetta che il termometro asciutto segni la temperatura dell'aria, quello bagnato una temperatura più bassa e quello bagnato e ventilato la più bassa di tutte. Si ripete scambiando i termometri, per escludere differenze fra gli strumenti.