VERIFICA

Verifica di fine parte · Temperatura e calore

Tempo indicativo: 100 minuti · Punteggio totale: 100 punti

Fisica 4 · Parte III · Temperatura e calore · versione 1.0
Verifica: Verifica di fine parte · Temperatura e calore · pagine 233–238 del volume completo · estratto per lo studio

La verifica riguarda i capitoli 6, 7 e 8. È ammessa la calcolatrice scientifica. Scrivi sempre le formule che usi, i passaggi e le unità di misura: un risultato senza unità è incompleto. Esprimi i risultati con un numero di cifre significative coerente con i dati. Nei bilanci termici indica il sistema e usa la convenzione del capitolo 7: $Q > 0$ per il calore assorbito, $Q < 0$ per quello ceduto. Dove non è indicato diversamente usa i valori delle Tabelle A.4 e A.5 dell'Appendice; in particolare: $c_{\text{acqua}} = 4186$ J/(kg·K), $c_{\text{ghiaccio}} = 2100$ J/(kg·K), $L_f = 3{,}34 \times 10^5$ J/kg e $L_v = 2{,}26 \times 10^6$ J/kg per l'acqua, $g = 9{,}8$ m/s^2.

Parte A · Domande a scelta multipla (10 domande, 2 punti ciascuna)

1. ● Il mercurio solidifica a −39 °C. Nella scala Kelvin questa temperatura è circa:
   - **A.** 312 K
   - **B.** −39 K
   - **C.** 234 K
   - **D.** 39 K

2. ● Una variazione di temperatura di 10 °C corrisponde a una variazione di:
   - **A.** 50 °F
   - **B.** 18 °F
   - **C.** 10 °F
   - **D.** 283 K

3. ●● In pieno inverno un lago profondo è coperto da uno strato di ghiaccio. L'acqua sul fondo del lago è a circa:
   - **A.** 4 °C
   - **B.** 0 °C
   - **C.** −4 °C
   - **D.** la temperatura dell'aria sopra il ghiaccio

4. ● Un blocco di rame e uno di alluminio, di uguale massa e alla stessa temperatura iniziale, ricevono lo stesso calore senza cambiare stato. Alla fine:
   - **A.** i due blocchi hanno la stessa temperatura
   - **B.** il blocco di alluminio è più caldo
   - **C.** è più caldo il blocco con il volume maggiore
   - **D.** il blocco di rame è più caldo

5. ● Una pentola ha una capacità termica di 900 J/K. Per scaldarla da 20 °C a 70 °C servono:
   - **A.** 18 J
   - **B.** 45 kJ
   - **C.** 63 kJ
   - **D.** 4,5 kJ

6. ●● Di una lastra isolante si raddoppia la superficie e si dimezza lo spessore, lasciando uguali il materiale e la differenza di temperatura fra le facce. Il calore che la attraversa ogni secondo:
   - **A.** non cambia
   - **B.** raddoppia
   - **C.** quadruplica
   - **D.** si dimezza

7. ●● In una giornata di sole, lungo la costa, al suolo soffia di solito:
   - **A.** una brezza dalla terra verso il mare, perché l'aria sopra la terra è più densa
   - **B.** nessuna brezza, perché l'aria è un cattivo conduttore
   - **C.** una brezza dalla terra verso il mare, perché il mare ha un calore specifico maggiore
   - **D.** una brezza dal mare verso la terra, perché la terra si scalda più in fretta del mare

8. ● Per vaporizzare 0,10 kg d'acqua che si trova già a 100 °C, alla pressione di 1 atm, servono:
   - **A.** $2{,}26 \times 10^{5}$ J
   - **B.** $3{,}34 \times 10^{4}$ J
   - **C.** $4{,}19 \times 10^{4}$ J
   - **D.** $2{,}26 \times 10^{7}$ J

9. ●● In una pentola a pressione l'acqua bolle intorno ai 120 °C perché:
   - **A.** il coperchio impedisce all'acqua di evaporare
   - **B.** la pressione sopra l'acqua è maggiore, e la tensione di vapore la uguaglia solo a una temperatura più alta
   - **C.** ad alta pressione il calore latente di vaporizzazione è nullo
   - **D.** il vapore è più caldo dell'acqua che lo produce

10. ●● Un liquido che evapora senza ricevere calore dall'esterno si raffredda perché:
    - **A.** dalla superficie sfuggono le molecole più veloci, e l'energia cinetica media di quelle che restano diminuisce
    - **B.** il vapore che si forma cede calore al liquido
    - **C.** l'evaporazione avviene soltanto sotto i 100 °C
    - **D.** le molecole che restano nel liquido perdono massa

Parte B · Esercizi (5 esercizi, 6 punti ciascuno)

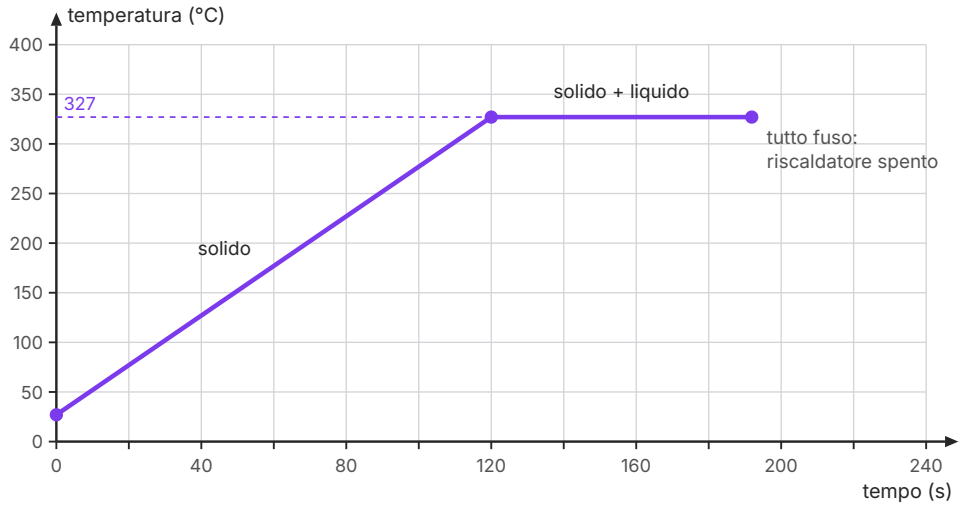


Figura V3.1 Curva di riscaldamento di 0,500 kg di un metallo solido, inizialmente a 27 °C, che riceve 160 W senza dispersioni (andamento calcolato). Il riscaldatore viene spento quando il campione è tutto fuso.

11. ●● **(6 punti)** Il coperchio di alluminio di un barattolo di vetro comune è bloccato. A 20 °C il diametro interno del bordo del coperchio e il diametro esterno dell'imboccatura del barattolo valgono entrambi 80,00 mm. Si tiene il barattolo chiuso sotto l'acqua calda finché coperchio e imboccatura arrivano a 70 °C. a) Di quanto aumenta il diametro interno del coperchio (2 punti)? b) Di quanto aumenta il diametro esterno dell'imboccatura (2 punti)? c) Quanto «gioco» si crea fra i due? Spiega perché il bordo del coperchio, che è un anello, si allarga invece di stringersi sul vetro (2 punti).

12. ●● **(6 punti)** Un matraccio di vetro Pyrex ha una capacità di 250,0 cm^3 a 10 °C ed è pieno fino all'orlo di alcol etilico alla stessa temperatura. Matraccio e alcol vengono scaldati fino a 35 °C. a) Di quanto aumenta il volume dell'alcol (2 punti)? b) Di quanto aumenta la capacità del matraccio? Per il Pyrex usa $\alpha \approx 3\lambda$ (2 punti). c) Quanto alcol trabocca? Qual è, circa, il coefficiente della dilatazione apparente dell'alcol in questo recipiente (2 punti)?

13. ●● **(6 punti)** Un fabbro immerge un pezzo di ferro di 0,300 kg, alla temperatura di 200 °C, in un secchio che contiene 2,00 kg d'acqua a 15,0 °C. Trascura il secchio e le dispersioni verso l'ambiente. a) Indica il sistema e scrivi il bilancio termico con i segni dei calori (2 punti). b) Calcola la temperatura di equilibrio (2 punti). c) Calcola il calore ceduto dal ferro, con il suo segno, e spiega perché la temperatura dell'acqua cambia così poco (2 punti).

14. ●● **(6 punti)** Il fondo di una pentola d'alluminio (k = 237 W/(m·K)) è spesso 4,0 mm e ha una superficie di $2{,}0 \times 10^{-2}$ m^2; il fornello fa passare attraverso il fondo 1,5 kW di calore. a) Quale differenza di temperatura c'è fra la faccia esterna e quella interna del fondo (2 punti)? b) Quanto varrebbe con un fondo di acciaio inossidabile dello stesso spessore ($k \approx 16$ W/(m·K))? Che cosa ne concludi sulla scelta del materiale (2 punti)? c) Se tutto quel calore va all'acqua, quanto tempo serve per portare 1,5 kg d'acqua da 20 °C a 100 °C (2 punti)?

15. ●● **(6 punti)** Un campione di 0,500 kg di un metallo solido, a 27 °C, è posto in un crogiolo e scaldato da un riscaldatore elettrico che gli cede 160 W; il crogiolo e le dispersioni si trascurano. La Figura V3.1 mostra la curva di riscaldamento. a) Leggi sul grafico la temperatura di fusione e riconosci il metallo con la Tabella A.4 dell'Appendice (2 punti). b) Dal primo tratto ricava il calore specifico del metallo solido (2 punti). c) Dalla durata della sosta termica ricava il calore latente di fusione e confrontalo con il valore del capitolo 8, $2{,}3 \times 10^4$ J/kg (2 punti).

Parte C · Problemi e domanda sulla fonte (50 punti in totale)

16. ●●● **(13 punti)** In un thermos, che ha un equivalente in acqua di 30 g, ci sono 400 g di tè a 60,0 °C; si aggiungono 100 g di ghiaccio preso dal congelatore a −15,0 °C. Considera il tè come acqua e il thermos chiuso come un sistema isolato. a) Calcola il calore che tè e thermos possono cedere scendendo a 0 °C e quello che serve al ghiaccio per arrivare a 0 °C e fondere del tutto; decidi quale sarà lo stato finale (3 punti). b) Scrivi il bilancio termico e calcola la temperatura finale (4 punti). c) Quale massa di ghiaccio a −15,0 °C, al posto dei 100 g, porterebbe il sistema esattamente a 0 °C, con tutto il ghiaccio appena fuso (3 punti)? d) Se invece si mettessero 400 g di ghiaccio a −15,0 °C, quale sarebbe lo stato finale? Quanto ghiaccio resterebbe (3 punti)?

17. ●● **(13 punti)** Un tratto di rotaia d'acciaio è lungo 30,0 m e ha una massa di 1800 kg; la sua temperatura varia fra −5 °C nelle notti d'inverno e 45 °C sotto il sole d'estate. Per l'acciaio usa $\lambda = 12 \times 10^{-6}$ K^{-1} e il calore specifico del ferro. a) Di quanto varia la lunghezza del tratto fra la temperatura minima e la massima? Qual è l'allungamento relativo (3 punti)? b) Una mattina d'estate la rotaia passa da 15 °C a 45 °C: quanto calore ha assorbito (3 punti)? c) Supponi che la rotaia assorba dal Sole, in media, una potenza netta di 1,0 kW. Quanto tempo serve per quel riscaldamento? Il tempo reale sarà maggiore o minore? Perché (3 punti)? d) Sotto il sole la rotaia, scura, diventa molto più calda dell'aria che la circonda. Spiega perché, nominando la via di propagazione del calore coinvolta, e spiega perché di notte, a cielo sereno, la rotaia si raffredda (4 punti).

18. ●● **(12 punti)** Al bar il latte del cappuccino si scalda soffiandoci dentro vapore a 100 °C, che condensa nel latte. Si vogliono portare 150 g di latte da 5 °C a 60 °C; considera il latte come acqua e trascura il bricco e le dispersioni. a) Quanto calore deve ricevere il latte (2 punti)? b) Quanto calore cede ogni grammo di vapore che condensa e poi, come acqua, si raffredda fino a 60 °C? Quanto vapore serve (4 punti)? c) Quanta acqua a 100 °C bisognerebbe aggiungere al latte per ottenere lo stesso riscaldamento? Perché il barista usa il vapore (3 punti)? d) Quale frazione del calore ceduto dal vapore viene dalla condensazione? Spiega con il modello particellare dove si trovava quell'energia prima della condensazione (3 punti).

19. ●● **(12 punti) Domanda sulla fonte.** Nella memoria *On the Mechanical Equivalent of Heat*, pubblicata nel 1850 dalla Royal Society di Londra, James Prescott Joule riassume i risultati dei suoi esperimenti con il mulinello in due conclusioni, che qui riportiamo in una parafrasi della redazione: 1) la quantità di calore prodotta dall'attrito dei corpi, solidi o liquidi, è sempre proporzionale alla quantità di «forza» spesa; 2) per produrre la quantità di calore che innalza di 1 grado Fahrenheit la temperatura di una libbra d'acqua (pesata nel vuoto, e presa fra 55° e 60°) bisogna spendere una «forza» meccanica pari a quella della caduta di 772 libbre per l'altezza di un piede. a) Spiega con parole tue che cosa affermano le due conclusioni; che cosa chiama Joule «forza» spesa, e come la chiamiamo oggi (3 punti)? b) Con 1 libbra = 0,4536 kg e 1 piede = 0,3048 m, calcola in joule il lavoro compiuto dal peso di 772 libbre che scende di un piede, e in calorie il calore che innalza di 1 °F la temperatura di una libbra d'acqua. Ricava il rapporto in J/cal e confrontalo con il valore moderno, 4,186 J/cal: di quanto per cento differiscono (5 punti)? c) Converti in gradi Celsius l'intervallo «fra 55° e 60°» e confrontalo con la definizione della caloria del capitolo 7. Perché il risultato di Joule fu un colpo decisivo per la teoria del calorico (4 punti)?

Griglia di valutazione Punti per sezione.

Sezione	Contenuto	Punti
Parte A	domande 1–10 × 2 punti	20
Parte B	esercizi 11–15 × 6 punti	30
Parte C	problemi 16 (13), 17 (13), 18 (12); domanda sulla fonte 19 (12)	50
Totale		**100**

Dal punteggio al voto Corrispondenza indicativa fra punteggio e voto in decimi.

Punteggio	0–24	25–34	35–44	45–54	55–64	65–74	75–84	85–94	95–100
Voto	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Soluzioni

1. C (2 punti). $T = t + 273{,}15 = -39 + 273{,}15 \approx 234$ K.

2. B (2 punti). Una differenza di 1 °C vale 9/5 = 1,8 °F: 10 °C × 1,8 = 18 °F. Non 50 °F, che è la temperatura corrispondente a 10 °C, né 283 K: le differenze in kelvin e in gradi Celsius sono uguali, 10 K.

3. A (2 punti). L'acqua a circa 4 °C, la più densa, resta sul fondo; quella più fredda, meno densa, sta in alto e gela in superficie. Il ghiaccio galleggia e isola il lago dall'aria.

4. D (2 punti). $\Delta T = Q/(mc)$: a parità di Q e di m si scalda di più il corpo con il calore specifico minore, il rame (385 J/(kg·K) contro 900 J/(kg·K)).

5. B (2 punti). $Q = C\,\Delta T = 900$ J/K × 50 K = $4{,}5 \times 10^4$ J = 45 kJ (63 kJ si otterrebbe usando 70 K al posto della differenza).

6. C (2 punti). $Q/\Delta t = kS\Delta T/d$: la superficie doppia raddoppia il flusso, lo spessore dimezzato lo raddoppia ancora: × 4.

7. D (2 punti). La terra, che ha un calore specifico minore, si scalda più in fretta del mare; l'aria sopra la terra sale e al suolo la sostituisce aria più fresca proveniente dal mare: è la brezza di mare (moto convettivo).

8. A (2 punti). $Q = mL_v = 0{,}10$ kg × $2{,}26 \times 10^6$ J/kg = $2{,}26 \times 10^5$ J. ($3{,}34 \times 10^4$ J servirebbe a fondere 0,10 kg di ghiaccio, $4{,}19 \times 10^4$ J a scaldare l'acqua da 0 °C a 100 °C.)

9. B (2 punti). Un liquido bolle quando la sua tensione di vapore è uguale alla pressione esterna; il coperchio a tenuta porta la pressione a circa il doppio di quella atmosferica, e la tensione di vapore dell'acqua raggiunge quel valore intorno ai 120 °C.

10. A (2 punti). Sfuggono le molecole della superficie con velocità abbastanza grande; quelle che restano hanno in media un'energia cinetica minore, e la temperatura, che è legata all'energia cinetica media delle particelle, diminuisce.

11. a) $\Delta d_{\text{coperchio}} = \lambda_{\text{Al}}\, d_0\, \Delta T = 23 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1} \times 80{,}00$ mm × 50 K ≈ 0,092 mm (2 punti). b) $\Delta d_{\text{vetro}} = 9 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1} \times 80{,}00$ mm × 50 K ≈ 0,036 mm (2 punti). c) Il gioco è 0,092 mm − 0,036 mm ≈ 0,06 mm: poco, ma basta a staccare il coperchio dal vetro (1 punto). La dilatazione è un ingrandimento uniforme di tutte le distanze del corpo, come in una fotografia ingrandita: il bordo del coperchio si allarga come si allargherebbe il disco che riempie il foro, e il diametro interno cresce; poiché l'alluminio ha un coefficiente più che doppio di quello del vetro, cresce più dell'imboccatura (1 punto).

12. a) $\Delta V_{\text{alcol}} = \alpha\, V_0\, \Delta T = 1{,}1 \times 10^{-3}\ \text{K}^{-1} \times 250{,}0\ \text{cm}^3 \times 25$ K ≈ 6,9 cm³ (2 punti). b) $\alpha_{\text{Pyrex}} \approx 3 \times 3 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1} = 9 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$; $\Delta V_{\text{matraccio}} = 9 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1} \times 250{,}0\ \text{cm}^3 \times 25$ K ≈ 0,056 cm³ (2 punti). c) Trabocca la differenza: 6,9 cm³ − 0,06 cm³ ≈ 6,8 cm³. Il coefficiente della dilatazione apparente è circa $\alpha_{\text{alcol}} - \alpha_{\text{Pyrex}} \approx 1{,}1 \times 10^{-3}\ \text{K}^{-1} - 0{,}009 \times 10^{-3}\ \text{K}^{-1} \approx 1{,}09 \times 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$: con un recipiente di Pyrex la dilatazione del vetro è meno dell'1% di quella del liquido (2 punti).

13. a) Sistema: ferro + acqua, considerato isolato. Con $Q = mc(t_e - t_{\text{iniziale}})$ per ciascun corpo: 0,300 kg × 450 J/(kg·K) × (t_e − 200 °C) + 2,00 kg × 4186 J/(kg·K) × (t_e − 15,0 °C) = 0; il primo termine (ferro) risulterà negativo, il secondo (acqua) positivo (2 punti). b) t_e = (135 J/K × 200 °C + 8372 J/K × 15,0 °C)/(135 J/K + 8372 J/K) = 152 580/8507 °C ≈ 17,9 °C (2 punti). c) Q_{ferro} = 135 J/K × (17,9 − 200) K ≈ $-2{,}46 \times 10^4$ J: il ferro cede circa 25 kJ, che l'acqua riceve ($+2{,}46 \times 10^4$ J). La capacità termica dell'acqua (8372 J/K) è circa 62 volte quella del ferro (135 J/K): la temperatura di equilibrio è una media pesata con le capacità termiche, e resta vicina a quella dell'acqua (2 punti).

14. a) Dalla legge di Fourier, $\Delta T = (Q/\Delta t)\, d/(kS) = 1500$ W × 0,0040 m / (237 W/(m·K) × $2{,}0 \times 10^{-2}$ m²) ≈ 1,3 K (2 punti). b) Con l'acciaio: $\Delta T = 1500$ W × 0,0040 m / (16 W/(m·K) × $2{,}0 \times 10^{-2}$ m²) ≈ 19 K. A parità di flusso, un metallo che conduce poco ha bisogno di una dif-

ferenza di temperatura molto maggiore: la faccia a contatto con la fiamma diventa molto più calda e il calore si distribuisce peggio. Per questo le pentole hanno spesso il fondo di alluminio o di rame, anche quando sono d'acciaio (2 punti). c) $Q = mc\Delta T = 1{,}5\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 80\ \text{K} \approx 5{,}0 \times 10^5\ \text{J}$; $\Delta t = Q/P = 5{,}02 \times 10^5\ \text{J} / 1500\ \text{W} \approx 3{,}3 \times 10^2\ \text{s}$, circa 5,6 minuti (2 punti).

15. a) La sosta termica è a 327 °C: nella Tabella A.4 è la temperatura di fusione del piombo (2 punti). b) Il primo tratto dura 120 s: il campione riceve $Q = P\Delta t = 160\ \text{W} \times 120\ \text{s} = 1{,}92 \times 10^4\ \text{J}$ e si scalda di 300 K, quindi $c = Q/(m\Delta T) = 1{,}92 \times 10^4\ \text{J} / (0{,}500\ \text{kg} \times 300\ \text{K}) = 128\ \text{J/(kg·K)}$, il valore del piombo (2 punti). c) La sosta va da 120 s a circa 190 s: $\Delta t \approx 70$ s, $Q = 160\ \text{W} \times 70\ \text{s} \approx 1{,}1 \times 10^4\ \text{J}$ e $L_f = Q/m \approx 2{,}2 \times 10^4\ \text{J/kg}$ (con la lettura 192 s si ottiene $2{,}3 \times 10^4\ \text{J/kg}$). Il valore è compatibile con quello del capitolo 8, entro l'incertezza della lettura sul grafico (2 punti).

16. Sistema: tè, thermos (equivalente in acqua) e ghiaccio, isolato. a) Tè e thermos equivalgono a 0,400 kg + 0,030 kg = 0,430 kg d'acqua; scendendo a 0 °C possono cedere $|Q_{\text{disp}}| = 0{,}430\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 60{,}0\ \text{K} \approx 1{,}08 \times 10^5\ \text{J}$ (1 punto). Al ghiaccio servono $0{,}100\ \text{kg} \times 2100\ \text{J/(kg·K)} \times 15{,}0\ \text{K} = 3150\ \text{J}$ per arrivare a 0 °C e $0{,}100\ \text{kg} \times 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} = 3{,}34 \times 10^4\ \text{J}$ per fondere: in tutto $3{,}66 \times 10^4\ \text{J}$ (1 punto). Il calore disponibile è maggiore: tutto il ghiaccio fonde e la temperatura finale è sopra 0 °C (1 punto). b) Calore ceduto da tè e thermos = calore assorbito dal ghiaccio, che va a 0 °C, fonde e, come acqua, si scalda fino a t: $0{,}430 \times 4186 \times (60{,}0 - t) = 3150 + 33\,400 + 0{,}100 \times 4186 \times t$ (2 punti); $107\,999 - 1800\,t = 36\,550 + 418{,}6\,t$, da cui $t = 71\,449/2218{,}6 \approx 32{,}2$ °C (2 punti). c) Il ghiaccio deve assorbire esattamente il calore disponibile: $m\ (2100 \times 15{,}0 + 3{,}34 \times 10^5)\ \text{J/kg} = 1{,}08 \times 10^5\ \text{J}$, cioè $m \times 3{,}655 \times 10^5\ \text{J/kg} = 1{,}08 \times 10^5\ \text{J}$ e $m \approx 0{,}295$ kg, circa 295 g (3 punti). d) 400 g sono più di 295 g: il sistema arriva a 0 °C prima che il ghiaccio sia fuso, e lo stato finale è una miscela di acqua e ghiaccio a 0 °C (1 punto). Per portare il ghiaccio a 0 °C servono $0{,}400 \times 2100 \times 15{,}0\ \text{J} = 1{,}26 \times 10^4\ \text{J}$; restano $1{,}08 \times 10^5\ \text{J} - 1{,}26 \times 10^4\ \text{J} \approx 9{,}54 \times 10^4\ \text{J}$, che fondono $9{,}54 \times 10^4\ \text{J} / 3{,}34 \times 10^5\ \text{J/kg} \approx 0{,}286$ kg (1 punto). Restano circa 400 g − 286 g ≈ 114 g di ghiaccio (1 punto).

17. a) $\Delta T = 45\ ^\circ\text{C} - (-5\ ^\circ\text{C}) = 50\ \text{K}$; $\Delta L = \lambda L_0 \Delta T = 12 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1} \times 30{,}0\ \text{m} \times 50\ \text{K} = 0{,}018\ \text{m} = 18\ \text{mm}$ (2 punti); l'allungamento relativo è $\Delta L/L_0 = \lambda\Delta T = 6{,}0 \times 10^{-4}$, sei decimillesimi (1 punto). b) $Q = mc\Delta T = 1800\ \text{kg} \times 450\ \text{J/(kg·K)} \times 30\ \text{K} \approx 2{,}4 \times 10^7\ \text{J}$, positivo perché la rotaia lo riceve (3 punti). c) $\Delta t = Q/P = 2{,}43 \times 10^7\ \text{J} / 1000\ \text{W} \approx 2{,}4 \times 10^4\ \text{s}$, circa 6,8 ore (2 punti). Il tempo reale è maggiore: mentre si scalda, la rotaia cede calore all'aria e alle traversine (conduzione e convezione), tanto più quanto più è calda dell'ambiente, quindi la potenza che resta per scaldarla diminuisce (1 punto). d) L'energia del Sole arriva per irraggiamento, che non ha bisogno di un mezzo. L'aria, quasi trasparente alla luce solare, ne assorbe poca; la superficie scura e opaca della rotaia ne assorbe gran parte, e la sua energia interna aumenta finché le perdite verso l'aria bilanciano la potenza assorbita, a una temperatura molto più alta di quella dell'aria (2 punti). Di notte la rotaia non riceve più la radiazione del Sole ma continua a emettere radiazione infrarossa, come ogni corpo, e una superficie scura, che assorbe bene, emette anche bene; a cielo sereno l'atmosfera le rimanda molta meno radiazione di quanta ne emetta, e la rotaia si raffredda, come il suolo su cui si forma la brina (2 punti).

18. a) $Q_{\text{latte}} = mc\Delta T = 0{,}150\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 55\ \text{K} \approx 3{,}45 \times 10^4\ \text{J}$ (2 punti). b) Un grammo di vapore che condensa cede $10^{-3}\ \text{kg} \times 2{,}26 \times 10^6\ \text{J/kg} = 2260\ \text{J}$; l'acqua che ne risulta, scendendo da 100 °C a 60 °C, cede altri $10^{-3}\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 40\ \text{K} \approx 167\ \text{J}$: in tutto circa $2{,}43 \times 10^3\ \text{J}$ per grammo (2 punti). Bilancio: $m_v \times 2{,}43 \times 10^6\ \text{J/kg} = 3{,}45 \times 10^4\ \text{J}$, $m_v \approx 0{,}014\ \text{kg} = 14\ \text{g}$ (2 punti). c) L'acqua a 100 °C cede solo $m \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 40\ \text{K}$: $m = 3{,}45 \times 10^4\ \text{J} / (4186\ \text{J/(kg·K)} \times 40\ \text{K}) \approx 0{,}21$ kg, cioè circa 210 g (2 punti). Il latte diventerebbe acqua per più della metà; con il vapore la massa aumenta solo di 14 g, meno del 10%, perché ogni grammo di vapore porta con sé il calore latente di vaporizzazione (1 punto). d) 2260 J su 2427 J: circa il 93% del calore viene dalla condensazione (1 punto). Nel vapore le molecole sono lontane le une dalle altre; l'energia spesa per separarle quando l'acqua è evaporata è energia potenziale delle particelle, cioè energia interna del vapore, a 100 °C come l'acqua. Quando il vapore condensa, le molecole si

riavvicinano e tornano a legarsi, e quell'energia viene ceduta al latte senza che la temperatura del vapore che condensa cambi (2 punti).

19. Traccia di risposta. a) La prima conclusione: il calore prodotto per attrito, nei solidi come nei liquidi, è sempre proporzionale al lavoro meccanico speso per produrlo. La seconda dà il valore del rapporto: per un'unità di calore (quella che scalda di 1 °F una libbra d'acqua) occorre sempre lo stesso lavoro, quello del peso di 772 libbre che scende di un piede (2 punti). La «forza spesa» di Joule è quella che oggi chiamiamo **lavoro**, cioè energia trasferita; nel suo tempo la parola «forza» si usava anche in questo senso (1 punto). b) Il peso di 772 libbre è 772 × 0,4536 kg × 9,8 m/s^2 ≈ 3432 N; scendendo di 0,3048 m compie un lavoro W = 3432 N × 0,3048 m ≈ 1046 J (2 punti). Una libbra d'acqua è 453,6 g; 1 °F corrisponde a una differenza di 5/9 °C, quindi il calore è 453,6 × 5/9 cal = 252,0 cal (1 punto). Il rapporto è 1046 J / 252,0 cal ≈ 4,15 J/cal (1 punto), meno dell'1% sotto il valore moderno: (4,186 − 4,15)/4,186 ≈ 0,8% (1 punto). c) 55 °F = (5/9)(55 − 32) °C ≈ 12,8 °C; 60 °F = (5/9)(60 − 32) °C ≈ 15,6 °C (1 punto). L'intervallo contiene quello della definizione della caloria, da 14,5 °C a 15,5 °C: Joule precisava a quale temperatura stava l'acqua perché il calore specifico dell'acqua cambia un poco con la temperatura (1 punto). Per la teoria del calorico il calore è un fluido che si conserva: non può essere creato. Joule mostrò che se ne produce quanto se ne vuole spendendo lavoro, e sempre nello stesso rapporto, qualunque sia il modo (palette nell'acqua, attrito di dischi di ferro): lavoro e calore sono due forme di trasferimento della stessa grandezza, l'energia, che si conserva. Rumford aveva mostrato che l'attrito produce calore apparentemente senza limite; Joule ne diede la misura (2 punti).