

Come viaggia l'energia termica?

Conduzione, convezione e irraggiamento

Fisica · 3A · 12 ottobre 2026

Una domanda dal mare

(slide 2)

Il mare è a 20 °C. L'aria è a 20 °C. Un termometro nell'acqua e uno nell'aria segnano lo stesso valore. Entri: in acqua senti freddo, in aria no.

Prima di andare avanti. Perché? Tre risposte possibili. (a) L'acqua è davvero più fredda dell'aria. (b) Hanno la stessa temperatura, ma l'acqua toglie energia alla pelle più in fretta. (c) È solo un'impressione, sta nella nostra testa. Sceglina una e tienila: la domanda resta aperta fino alla fine del capitolo.

Per rispondere servono tre parole che si confondono spesso e tre meccanismi di trasferimento. Cominciamo dalle parole.

Tre parole da non confondere

(slide 3)

Grandezza	Che cos'è	Unità
Temperatura T (<i>temperature</i>)	Proprietà di un oggetto, legata all' energia cinetica media delle sue particelle.	K, °C
Energia interna (<i>internal energy</i>)	Energia totale, cinetica e potenziale, di tutte le particelle: è immagazzinata nell'oggetto.	J
Trasferimento di energia termica, Q (<i>thermal energy transfer</i> ; in italiano «calore»)	Energia che passa da un luogo più caldo a uno più freddo a causa di una differenza di temperatura . È un processo , non qualcosa che si possiede.	J

Un'analogia con il conto in banca. L'energia interna è il saldo; il calore è il bonifico. Dopo il bonifico nel conto non esiste una voce «bonifico» da qualche parte: esiste un saldo cambiato. Allo stesso modo un corpo non *contiene* calore: contiene energia interna, e quando c'è una differenza di temperatura una parte di quell'energia passa da un corpo all'altro. Quel passaggio è il calore.

Due conseguenze. Primo: due oggetti alla stessa temperatura possono avere energie interne molto diverse, perché l'energia interna dipende anche dalla massa e dal tipo di sostanza (un lago e una tazza d'acqua a 20 °C). Secondo: la temperatura dice in che *direzione* passa l'energia (dal più caldo al più freddo), non *quanta*.

Nel libro troverai sia *heat* sia *thermal energy transfer*. Noi useremo la seconda espressione quando conta, perché ricorda che si tratta di un trasferimento.

Tre modi di trasferire energia termica

(slide 4)

Il libro (P3.04) distingue tre meccanismi.

- **Conduzione** (*conduction*): attraverso un materiale, da particella a particella, senza che il materiale si muova.
- **Convezione** (*convection*): attraverso un fluido, trasportata dal movimento del fluido stesso.
- **Irraggiamento** (*radiation*): con onde infrarosse, senza bisogno di alcun materiale.

Tutti e tre richiedono una differenza di temperatura, e in tutti e tre il verso netto va dal più caldo al più freddo. Li vediamo uno alla volta, e a ciascuno associamo un'animazione.

Conduzione: il cubo di metallo

(slide 5)

L'8 settembre abbiamo toccato quattro cubi: vetro, metallo, legno, plastica. Tutti a temperatura ambiente, tutti con lo stesso valore sul termometro. Il cubo di metallo sembrava il più freddo.

Prima di andare avanti. Se i termometri segnano lo stesso valore, che cosa sta rilevando il dito?

Che cos'è la conduzione

(slide 6)

La **conduzione termica** (*thermal conduction*) è il trasferimento di energia termica attraverso un materiale, dalla parte più calda a quella più fredda, senza che il materiale si muova.

Un materiale che trasferisce bene l'energia è un **conduttore termico** (*thermal conductor*): i metalli. Uno che ne trasferisce pochissima è un **isolante termico** (*thermal insulator*): legno, plastica, aria. Serve sempre una differenza di temperatura: l'energia fluisce da T alta a T bassa.

Come leggere l'animazione: conduzione

(slide 7–8)

L'animazione mostra una sbarra scaldata a un'estremità (figura 1). Ci sono due modi di guardarla.

Vista «una sbarra: atomi ed elettroni». Ci sono tre termometri, A, B e C, al 24%, al 52% e all'81% della lunghezza. Due cursori: la *temperatura del riscaldatore* (parto da 400 °C) e il *materiale*, da «tipo legno» (isolante) a «tipo rame» (metallo).

Che cosa cambio. Con il materiale su isolante, lascio andare l'animazione. Poi la riavvio con il cursore a metà e infine tutto verso il metallo. Provo anche a cambiare la temperatura.

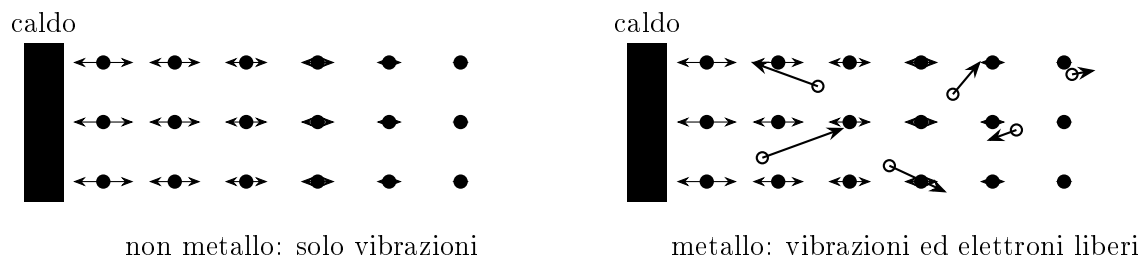


Figura 1: Una sbarra scaldata a sinistra. I punti pieni sono gli atomi, che vibrano attorno alla loro posizione (la freccia doppia è l'ampiezza della vibrazione, maggiore all'estremo caldo). I cerchietti sono gli elettroni liberi del metallo; la lunghezza della freccia indica l'energia cinetica (schema, non in scala).

Che cosa osservo. Gli atomi non si spostano: vibrano attorno alla loro posizione e la vibrazione è più ampia (e il colore più caldo) vicino al riscaldatore. I termometri A, B e C salgono uno dopo l'altro: l'energia viaggia lungo la sbarra. Sotto, un grafico $T(t)$ e un'indicazione di quanti secondi servono a ciascun punto per arrivare a 30°C . Spostando il cursore verso il metallo compaiono gli **elettroni liberi**: punti luminosi che corrono attraverso il reticolo. La luminosità di un elettrone indica la sua energia cinetica; un lampo segna un urto con un atomo (lampo bianco: l'atomo guadagna energia; lampo arancione: ne perde). Gli elettroni veloci vengono dall'estremo caldo e urtando gli atomi più freddi cedono loro energia anche molto lontano dal riscaldatore.

Che cosa ci dice. Che l'energia attraversa la sbarra e il materiale no: gli atomi restano dove sono. E che nei metalli ci sono portatori di energia in più, gli elettroni, che si muovono davvero e coprono la distanza con pochi urti invece che con una catena di spintarelle fra vicini. Più metallo, più rapido il percorso.

Vista «gara: legno – acciaio – rame». Tre sbarre scaldate allo stesso modo. Sotto ciascuna, un fermaglio attaccato con vaselina. Quando il punto C raggiunge 30°C la vaselina fonde e il fermaglio cade; l'animazione scrive il tempo di caduta. È il metodo del libro (figura P3.25) per confrontare i conduttori.

Materiale	legno	vetro	acciaio	rame
Tempo (s) a cui C raggiunge 30°C	28,7	19	8,4	3,5

I tempi sono quelli del modello, a riscaldatore a 400°C . La scala è compressa: fra rame e legno l'animazione mostra un rapporto di circa 8, mentre nella realtà il legno è molto più lento. Serve a vedere l'effetto, non a misurarlo.

Una precisazione sul libro. Descrivendo l'esperimento dei fermagli il libro scrive che «*heat will quickly reach the petroleum jelly*». Il calore non è una cosa che viaggia: ciò che passa lungo la sbarra è *energia termica*, trasferita per conduzione. Per questo, come nella tabella delle tre parole, conviene dire *thermal energy transfer*.

Perché i metalli conducono bene

(slide 9)

In un **non metallo** l'energia passa solo per vibrazioni: l'estremo caldo vibra di più, gli atomi urtano i vicini e condividono energia, e così atomo dopo atomo. È un processo lento.

In un **metallo** (Supplement) c'è in più una nube di **elettroni delocalizzati** (*delocalised, mobile electrons*), liberi di muoversi nel metallo. Gli elettroni veloci dell'estremo caldo urtano atomi più freddi e cedono loro energia: veloce, e anche a grande distanza.

Non è un caso che i buoni conduttori elettrici (rame, argento) siano anche buoni conduttori termici: sono gli stessi elettroni liberi a fare entrambe le cose. Il legame quantitativo fra le due conducibilità è la legge di Wiedemann–Franz, qui solo qualitativa.

Una precisazione sul libro. Il libro dice che gli elettroni «*get hot and move through the metal*». Un elettrone non ha una temperatura: la temperatura è una proprietà di un insieme di particelle (energia cinetica *media*). Un elettrone trasporta energia cinetica e, urtando un atomo più freddo, ne cede una parte. Inoltre il libro presenta le vibrazioni come il meccanismo dei soli «cattivi conduttori»: in realtà le vibrazioni ci sono in ogni solido, metalli compresi, e in un metallo si sommano al contributo degli elettroni (che nei metalli buoni è quello dominante).

Quanto conduce un materiale

(slide 10)

Per confrontare i materiali con un numero si usa la **conducibilità termica** κ (fuori dal syllabus 0653; la citiamo perché chiarisce che cosa vuol dire «conduce meglio»). Se una lastra di spessore d e area A ha una differenza di temperatura ΔT fra le due facce, l'energia che la attraversa in un tempo t è

$$\frac{Q}{t} = \kappa \frac{A \Delta T}{d}, \quad \text{quindi} \quad \kappa = \frac{Q}{t} \frac{d}{A \Delta T},$$

con κ in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Materiale	κ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	rispetto all'aria
Rame	≈ 400	$\approx 15\,000\times$
Acciaio	15–50	$\approx 600\text{--}2000\times$
Vetro	≈ 1	$\approx 40\times$
Acqua	$\approx 0,6$	$\approx 23\times$
Legno	$\approx 0,15$	$\approx 6\times$
Aria	$\approx 0,026$	1

Valori tipici a temperatura ambiente. Il rapporto con l'aria si ottiene dividendo: per l'acqua, $0,6/0,026 \approx 23$; per il rame, $400/0,026 \approx 15\,400$.

Che cosa sente il dito

(slide 11)

Torniamo ai cubi. Il dito non misura la temperatura del cubo: i nervi sensibili alla temperatura rispondono a **quanto in fretta il dito perde energia**. Un metallo, buon conduttore, porta via energia dal punto di contatto e la distribuisce nel resto del blocco: la zona toccata resta fredda e il dito continua a cedere energia a ritmo alto. Nel legno, isolante, la superficie a contatto si scalda quasi subito fino alla temperatura del dito: la differenza di temperatura nel punto di contatto si riduce, e con lei il ritmo con cui il dito perde energia. Stessa temperatura dei cubi, **diversa rapidità di trasferimento**.

Una precisazione sul libro. Il libro scrive che toccando il legno «*your finger loses no more thermal energy*». Finché il legno è più freddo del dito, l'energia continua a passare: perde *meno*, non *niente*. Conta la rapidità, e la rapidità è piccola, non nulla.

Applichiamolo al mare. Pelle a circa 33°C, acqua a 20°C: l'acqua conduce circa 23 volte meglio dell'aria, quindi l'energia lascia la pelle molto più in fretta verso l'acqua che verso l'aria alla stessa temperatura. Stessa temperatura, diversa rapidità di trasferimento: la risposta (b) sembra reggere. Ma qualcosa non torna.

Prima di andare avanti. L'acqua a contatto con la pelle assorbe energia e si scalda. Perché la pelle non si ritrova avvolta da uno strato d'acqua tiepida, che isolerebbe un poco? Che cosa fa quello strato?

Isolanti: l'aria è la chiave

(slide 12)

L'aria è un pessimo conduttore: l'aria **intrappolata** isola. Lana di vetro, lana, polistirolo, piume sono per lo più aria trattenuta in piccoli spazi. Per questo due maglie sottili scaldano più di una spessa: fra una e l'altra c'è uno strato d'aria.

Perché soltanto aria *intrappolata*? Perché l'aria libera trasporta energia anche in un altro modo, muovendosi. È il prossimo meccanismo.

Una precisazione sul libro. Il libro scrive che i vetri doppi hanno «*usually a vacuum*» fra i due vetri. I doppi vetri comuni contengono invece aria o argon, in uno strato sottile e sigillato, tanto stretto da impedire quasi del tutto la convezione; per questo conduzione e convezione sono piccole, non nulle. Le finestre con il vuoto vere e proprie esistono ma sono rare e costose.

Convezione: dov'è la resistenza del bollitore?

(slide 13)

Un bollitore elettrico scalda l'acqua con una resistenza.

Prima di andare avanti. La resistenza sta in alto, a metà altezza o sul fondo? Perché proprio lì?

Sta sul fondo. Il perché lo capiamo fra poco; tienilo come test della spiegazione.

Che cos'è la convezione

(slide 14)

La **convezione** (*convection*) è il trasferimento di energia termica attraverso un fluido, per effetto del movimento del fluido stesso.

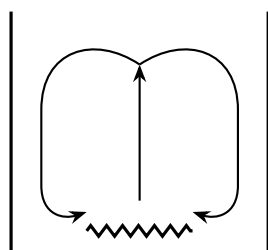
Un **fluido** (*fluid*) è un liquido o un gas, perché può scorrere. Il fluido caldo si muove portando con sé energia da un luogo caldo a uno più freddo: il suo movimento si chiama **corrente di convezione** (*convection current*). Nei solidi non c'è convezione, perché le particelle restano in posizioni fisse. In un fluido ci sarebbe anche conduzione, ma è debole: il trasferimento è dovuto soprattutto al moto del fluido.

Un modo per ricordare la differenza: nella conduzione il materiale **non si muove**; nella convezione **si muove**.

Come leggere l'animazione: convezione

(slide 15–16)

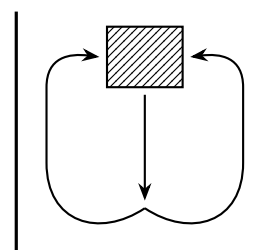
L'animazione mostra una vasca d'acqua nel modello particellare (figura 2): ogni punto è un gruppo di particelle e la distanza fra i punti indica la densità.



(a) riscaldatore in basso



(b) riscaldatore in alto



(c) ghiaccio in alto

Figura 2: Le tre configurazioni dell'animazione. Le frecce mostrano la corrente di convezione: sale dove il fluido è caldo, scende dove è freddo (schema).

Che cosa cambio. Scelgo la *sorgente* della differenza di temperatura: riscaldatore o cubetto di ghiaccio. Poi la *posizione* della sorgente, dal fondo alla cima della vasca, e la *potenza* (parto dall'80 %). Posso accendere o spegnere le frecce del flusso. Due termometri misurano la temperatura nel 20 % superiore e nel 20 % inferiore della vasca; un grafico li segue nel tempo.

Che cosa osservo. Le particelle calde (rosse) sono più distanziate e salgono; quelle fredde (blu) sono più vicine e scendono; le frecce mostrano la circolazione. I numeri dell'animazione a $t = 96\text{ s}$, con potenza dell'80 %, sono questi.

Configurazione	Partenza	T_{alto}	T_{basso}
riscaldatore in basso	20 °C	36,7 °C	51,2 °C
riscaldatore in alto	20 °C	39,2 °C	20,8 °C
ghiaccio in alto	25 °C	15,8 °C	16,7 °C
ghiaccio in basso	25 °C	25,0 °C	11,7 °C

Con il riscaldatore in basso l'acqua si scalda *tutta*: dopo meno di un minuto il termometro in alto ha già superato i 30 °C (l'acqua scaldata è salita fin lì), e il fondo, vicino al riscaldatore, è il punto più caldo. Con il riscaldatore in alto si scalda soltanto lo strato superiore: il fondo resta a 20,8 °C, cioè quasi come all'inizio. Con il ghiaccio in alto si raffredda tutta la vasca (alto e basso quasi uguali); con il ghiaccio in basso si raffredda solo il fondo.

Che cosa ci dice. L'energia viaggia perché il fluido si muove, e il motore del movimento è una differenza di densità: la sorgente va dove crea la corrente più lunga. Il riscaldatore va in basso, il ghiaccio in alto (e per lo stesso motivo il congelatore di un frigorifero sta in alto).

Perché il fluido caldo sale

(slide 17)

Passo per passo.

1. Il fluido viene scaldato: le sue particelle si muovono più veloci (maggiore energia cinetica media).
2. Si **dilata** (*expands*): la stessa massa occupa un volume maggiore, le particelle si allontanano. È la dilatazione termica che abbiamo studiato a settembre.
3. La **densità** $\rho = \frac{m}{V}$ diminuisce, perché m resta costante e V aumenta: il fluido caldo è *meno denso*.
4. Il fluido più denso e più freddo che lo circonda lo spinge verso l'alto; quello freddo scende a prendere il suo posto: è una corrente di convezione.

Una precisazione sul libro. Il libro scrive che l'aria scaldata «*becomes lighter*» e che un materiale meno denso «*is lighter*». La massa del fluido non è cambiata (il fluido non diventa «più leggero»): è cambiata la densità. La parola corretta è *less dense*. L'unica eccezione apparente è la mongolfiera, dove l'aria scaldata esce dall'apertura in basso e rimane meno massa nello stesso volume; ma il criterio resta la densità.

La convezione al lavoro

(slide 18)

- **Il bollitore.** La resistenza sta sul fondo: l'acqua che la tocca si scalda, si dilata, sale; quella fredda e densa scende. Se la resistenza stesse in cima, si scalderebbe solo lo strato superiore.
- **Il termosifone in una stanza.** L'aria vicino al termosifone si scalda e sale; aria più fredda arriva a prendere il suo posto. In questo modo l'energia si ripartisce in tutta la stanza.
- **Il frigorifero.** Il congelatore sta in alto: l'aria fredda scende, raffredda gli alimenti sottostanti, e l'aria calda sale per essere raffreddata a sua volta.
- **L'intercapedine di una parete (*cavity wall*).** L'aria nell'intercapedine porta energia da una parete all'altra con la convezione. Riempirla di schiuma isolante impedisce all'aria di muoversi: la schiuma conduce un po', ma bloccando la convezione il bilancio complessivo migliora.

Torniamo al mare: lo strato d'acqua si rinnova

(slide 19)

Torniamo alla domanda lasciata aperta. L'acqua a contatto con la pelle si scalda: diventa meno densa, si allontana e arriva acqua fredda. La pelle non si ritrova mai con un «cappotto» d'acqua tiepida. In aria succede lo stesso con il vento: una brezza porta via lo strato sottile d'aria calda attorno alla pelle.

Dunque in acqua c'è conduzione, molto più efficiente che in aria, *più* convezione che rinnova continuamente lo strato a contatto con la pelle. Però il Sole scalda anche chi sta fermo sulla spiaggia. Come arriva fin qui quell'energia?

Irraggiamento: dal Sole a noi

(slide 20)

Prima di andare avanti. Il Sole è a 150 milioni di chilometri. Fra noi e lui c'è quasi il nulla. Come arriva l'energia termica sulla Terra: per conduzione, per convezione o in un altro modo?

Nel vuoto dello spazio non c'è materiale da attraversare né da far muovere: conduzione e convezione sono escluse. Ne resta uno solo, che non ha bisogno di alcun materiale: l'**irraggiamento** (*radiation*).

La radiazione infrarossa

(slide 21)

- È emessa da **tutti** gli oggetti: più un oggetto è caldo, più emette ogni secondo.
- È un'onda elettromagnetica: viaggia nel **vuoto** e in linea retta.
- Riscalda l'oggetto che la **assorbe**.
- È invisibile all'occhio, la pelle la sente, una termocamera la vede.
- Un oggetto caldo e uno freddo emettono e assorbono entrambi: il trasferimento netto va dal caldo al freddo perché il caldo emette più di quanto assorbe.

Una precisazione sul libro. Il libro scrive che l'irraggiamento è «*the only form of thermal energy transfer which does not involve the movement of particles*». Non è la distinzione giusta: anche nella conduzione gli atomi non si spostano (vibrano sul posto; si muovono solo gli elettroni liberi dei metalli). La differenza vera è un'altra: la conduzione e la convezione hanno bisogno di un *materiale*, l'irraggiamento no. Il libro lo dice subito dopo («*does not need a medium*»); è questa la frase da ricordare.

In quale parte dello spettro?

(slide 22)

Ogni oggetto sopra lo 0 K emette radiazione elettromagnetica. Ma quale? La radiazione termica non è di un solo colore: è uno spettro continuo, con un massimo a una certa lunghezza d'onda che dipende dalla temperatura. La **legge di Wien** (fuori syllabus) dice che

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K},$$

dove $\lambda_{\max}$ è la lunghezza d'onda a cui l'emissione è massima e T la temperatura assoluta. Più l'oggetto è caldo, più il massimo si sposta verso le lunghezze d'onda corte.

Oggetto	T (K)	$\lambda_{\max}$	regione
pelle umana	310	9,3 μm	infrarosso
ferro rovente	1000	2,9 μm	infrarosso (e un bagliore rosso)
filamento di lampada	3000	0,97 μm	vicino infrarosso (e visibile)
il Sole	5800	0,50 μm	luce visibile

Per esempio, per la pelle: $\lambda_{\max} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{310} = 9,35 \times 10^{-6} \text{ m} \approx 9,3 \mu\text{m}$.

Una precisazione sul libro. Il syllabus e il libro parlano di radiazione termica come di radiazione infrarossa. A temperature ordinarie è giusto: il picco dei corpi a 20°C–40°C cade nell'infrarosso. Ma non è una proprietà dell'«irraggiamento»: un ferro rovente emette anche luce rossa visibile, e il Sole ha il picco nella luce visibile. La radiazione termica è uno spettro continuo il cui massimo si sposta con T .

Resta una domanda che useremo come ponte con il prossimo argomento. Che cosa distingue l'infrarosso emesso dalla pelle dalla luce emessa dal Sole? Una grandezza che per ora non abbiamo ancora: la **lunghezza d'onda**. La introdurremo nella lezione sullo spettro elettromagnetico.

Colore e finitura della superficie

(slide 23)

Superficie nera opaca (<i>matt, dull black</i>)	Superficie lucida o bianca (<i>shiny silver or white</i>)
buon assorbitore (<i>absorber</i>)	cattivo assorbitore
buon emettitore (<i>emitter</i>)	cattivo emettitore
cattivo riflettore (<i>reflector</i>)	buon riflettore

Una superficie che assorbe bene emette bene: le due proprietà vanno sempre in coppia. È un fatto generale (legge di Kirchhoff, qui solo qualitativa): la stessa superficie nera che si scalda tanto al Sole è anche quella che si raffredda più in fretta di notte.

Una precisazione sul libro. La regola «lucido o bianco = cattivo emettitore» è la regola semplificata del libro e dell'esame, ed è giusta per le superfici lucide e per il bianco rispetto alla luce del Sole (la riflette). Per l'infrarosso emesso da oggetti a temperatura ambiente conta soprattutto la *finitura*, più del colore: una vernice bianca opaca emette l'infrarosso quasi come una nera. Il colore decide cosa succede alla luce visibile; per l'infrarosso termico decide la natura della superficie. Per l'esame usa la regola del libro; per noi, sapere perché è una semplificazione.

Due lattine

(slide 24)

Il libro propone un esperimento (Experimental Skills P3.01): due lattine identiche con la stessa acqua e lo stesso coperchio, una nera opaca e una argento lucido, alla stessa distanza da una lampada.

Prima di andare avanti. Quale delle due ha il termometro che sale più in fretta? E se partono entrambe calde, quale si raffredda più in fretta?

Risposta: la nera, in entrambi i casi. Sotto la lampada la nera assorbe di più; nel raffreddamento la nera emette di più. Vediamolo con l'animazione.

Come leggere l'animazione: irraggiamento

(slide 25–26)

Questa è l'animazione più ricca, e conviene capire bene che cosa c'è dentro (figura 3).

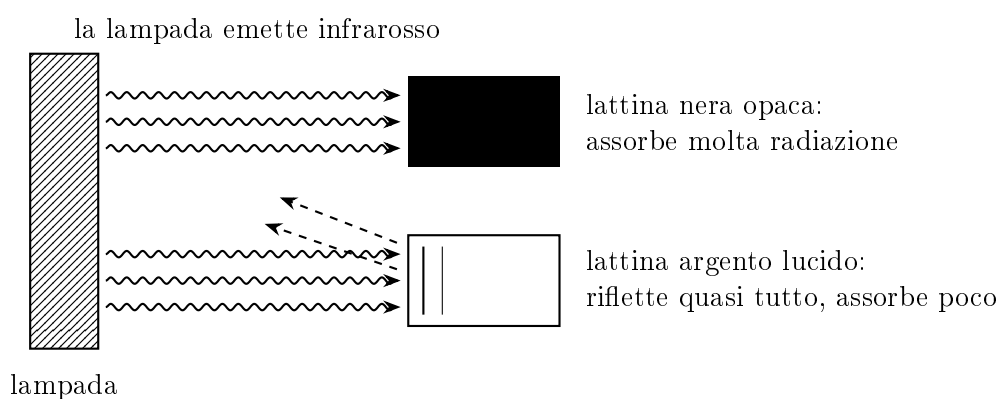


Figura 3: Il riscaldamento dell'animazione. Le linee ondulate sono la radiazione assorbita; le frecce tratteggiate la radiazione riflessa dalla lattina lucida (schema).

Che cosa cambio. Quattro controlli. L'*esperimento*: «la lampada scalda le lattine» oppure «le lattine calde si raffreddano». La *temperatura della lampada* (parto da 600 °C). La *finitura della lattina inferiore*, da argento lucido a nera opaca (quella superiore è sempre nera opaca). E lo *spazio attorno alle lattine*: aria oppure vuoto.

Che cosa osservo. Le linee ondulate fra la lampada e le lattine sono più scure e fitte quando passa più energia; sulla lattina lucida si vedono i raggi riflessi. Ci sono due termometri, un grafico $T(t)$ per ciascuna lattina, e due numeri che indicano la temperatura e la rapidità di

variazione in °C al secondo. Il tempo è quello del modello, non secondi reali: i numeri sono illustrativi, e la lattina nera dà lo stesso risultato a ogni prova.

Aria e vuoto: che cosa cambia. È la parte da capire bene.

- **In aria** una lattina scambia energia in tre modi: irraggiamento, e conduzione e convezione con l'aria a contatto. In **vuoto** resta solo l'irraggiamento.
- Il colore (la finitura) agisce **soltanto** sull'irraggiamento, e con lo stesso fattore sia nell'assorbire sia nell'emettere. Lo scambio con l'aria non dipende dal colore.
- Una lattina si scalda finché l'energia che assorbe ogni secondo uguaglia quella che perde. A quel punto la temperatura smette di salire.

Nel vuoto. L'energia assorbita dalla lampada e quella emessa dalla lattina sono entrambe moltiplicate per il fattore della superficie. Quel fattore compare da entrambe le parti e si semplifica: la temperatura finale è la **stessa** per la lattina nera e per quella lucida. La differenza è solo la rapidità: la lucida ci arriva molto più lentamente, perché assorbe (ed emette) poco. Nel modello, tutte e due tendono a circa 164 °C; dopo 120 secondi la nera ci è arrivata, la lucida è ancora a circa 78 °C (figura 4).

In aria. Alla perdita per irraggiamento si aggiunge quella per conduzione e convezione, che non dipende dal colore. Per la lattina nera l'irraggiamento domina e si ferma a circa 118 °C. Per la lucida l'assorbimento è piccolo e basta poca perdita verso l'aria per pareggiarlo: si ferma a circa 41 °C. In aria dunque il colore conta molto di più.

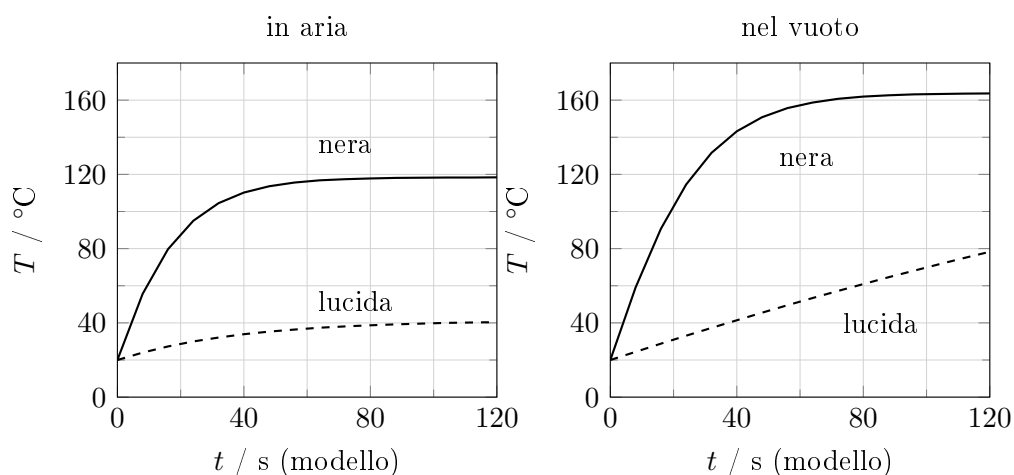


Figura 4: Riscaldamento sotto la lampada a 600 °C da 20 °C, in aria e nel vuoto. Linea continua: lattina nera; tratteggiata: lattina lucida. Valori del modello dell'animazione.

Il raffreddamento. Con l'esperimento «le lattine calde si raffreddano» entrambe partono da 90 °C e la lampada è spenta. Dopo 30 secondi del modello:

Lattina	in aria	nel vuoto
nera	37 °C	54 °C
lucida	52 °C	85 °C

La nera si raffredda più in fretta della lucida in entrambi i casi. Nel vuoto il raffreddamento è più lento per tutte e due, e la lucida perde quasi niente (da 90 a 85 °C in 30 secondi): è il principio del thermos.

Che cosa ci dice. Che l'energia attraversa lo spazio vuoto, e che la superficie decide quanta

ne passa. E che per capire un esperimento reale bisogna contare *tutti* i canali di perdita, non solo quello che ci interessa.

Aria o vuoto, in una figura

(slide 27)

La figura 5 riassume il confronto. In aria una lattina calda perde energia in tre modi; nel vuoto in uno solo.

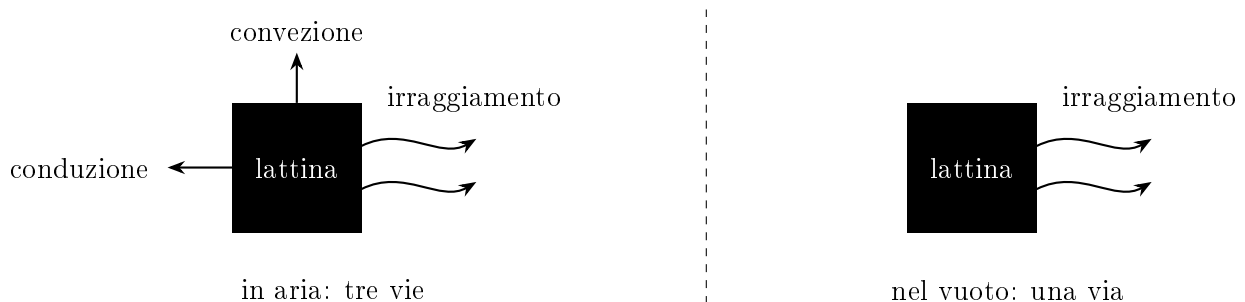


Figura 5: Una lattina calda in aria e nel vuoto (schema).

Bicchieri in una stanza a 20 °C

(slide 28)

In una stanza a 20 °C ci sono tre bicchieri, il primo a 80 °C, il secondo a 20 °C, il terzo a 5 °C (figura 6). Consideriamo solo l'irraggiamento. Ogni bicchiere *emette* ogni secondo in base alla propria temperatura e *assorbe* dalla stanza ogni secondo in base alla temperatura della stanza, uguale per tutti.

linea continua: emessa dal bicchiere; tratteggiata: assorbita dalla stanza
larghezza della freccia $\propto$ energia al secondo

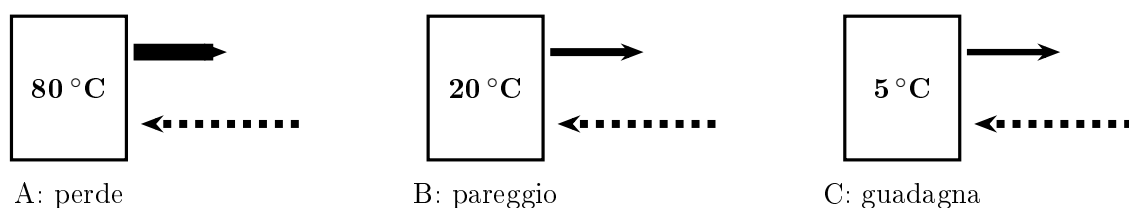


Figura 6: Radiazione emessa e assorbita da tre bicchieri in una stanza a 20 °C (schema).

Il bicchiere A emette più di quanto assorbe: **si raffredda**. Il bicchiere B emette quanto assorbe: la sua temperatura resta **costante**. Il bicchiere C assorbe poco più di quanto emette: **si scalda**. La temperatura finale è quella a cui emissione e assorbimento si pareggiano: è l'idea che sta dietro alla temperatura della Terra (Supplement P2.3.3.3).

Le larghezze delle frecce seguono la legge reale: la potenza emessa cresce come la quarta potenza della temperatura in kelvin (legge di Stefan-Boltzmann, fuori syllabus). Rispetto alla stanza, il bicchiere a 80 °C emette $(353/293)^4 \approx 2,1$ volte tanto; quello a 5 °C emette $(278/293)^4 \approx 0,81$ volte. Nella realtà agiscono anche conduzione e convezione, che qui non consideriamo.

L'irraggiamento nella vita di tutti i giorni

(slide 29)

- **Parasole dell'auto.** È lucido: riflette la radiazione del Sole e l'auto resta più fresca. Il cruscotto nero la assorbe e diventa troppo caldo per toccarlo.
- **Casa bianca, vestiti chiari.** Riflettono la radiazione del Sole: assorbono poco.
- **Il fuoco da campo.** Il calore sul viso è quasi tutto irraggiamento; l'aria sopra il fuoco, invece, si scalda e sale per convezione.
- **Notte serena, gelata.** Il terreno irradia verso lo spazio e riceve poco in cambio, perché il cielo sereno è molto freddo: si raffredda anche sotto la temperatura dell'aria. Con le nuvole il terreno riceve molta radiazione di ritorno, e la gelata è meno probabile.

Il thermos

(slide 30)

Il thermos (*vacuum flask*) usa tutto quello che abbiamo visto (figura 7).

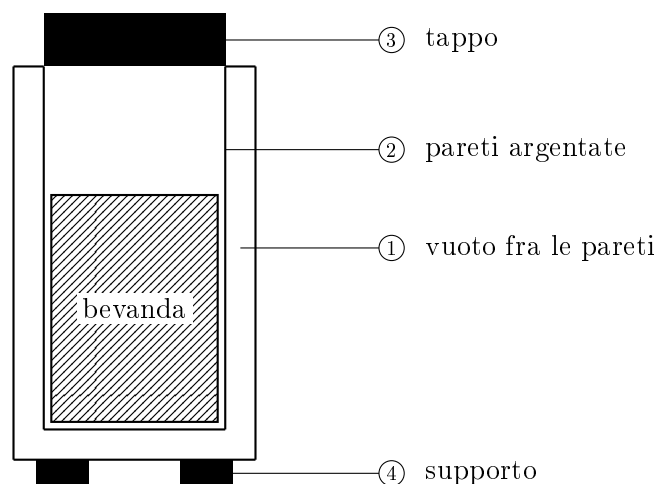


Figura 7: Sezione di un thermos (schema, non in scala). Le pareti sono due, con il vuoto in mezzo; le facce rivolte verso il vuoto sono argentate (2).

1. **Vuoto fra le pareti:** niente conduzione e niente convezione.
2. **Superfici argentate:** riflettono l'infrarosso, quindi poca radiazione emessa e poca assorbita.
3. **Tappo di plastica:** blocca la convezione e l'evaporazione dall'alto.
4. **Vetro e supporti:** cattivi conduttori.

Funziona anche al contrario, per tenere fredda una bevanda: le stesse barriere frenano l'energia che entra.

Un pannello solare

(slide 31)

Domanda del libro (P3.31): in un pannello solare per l'acqua calda (figura 8), spiega perché (a) l'interno del pannello è dipinto di nero, (b) il retro è isolato, (c) l'acqua fredda entra dal basso ed esce calda dall'alto.

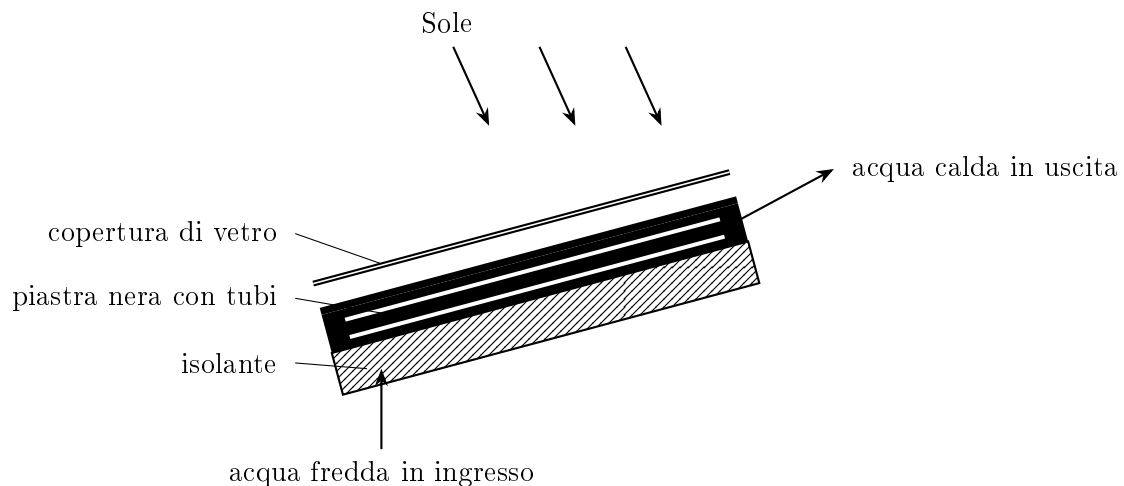


Figura 8: Pannello solare per l'acqua calda (schema).

(a) Una superficie nera opaca è un buon assorbitore di radiazione infrarossa (e di luce): assorbe più energia dal Sole. (b) L'isolante riduce le perdite per conduzione (e per convezione) dal retro. (c) L'acqua riscaldata si dilata, diventa meno densa e sale: dal punto più alto parte la corrente di convezione che porta fuori l'acqua calda.

Quale meccanismo è?

(slide 32)

Tre domande, in quest'ordine.

1. Potrebbe avvenire nello spazio, nel vuoto? Se sì, è **irraggiamento** (l'unico che non ha bisogno di materiale).
2. Il materiale stesso si sta muovendo, ed è un liquido o un gas? Allora è **convezione**.
3. L'energia attraversa un materiale fermo (di solito un solido)? Allora è **conduzione**.

Spesso agiscono **più meccanismi insieme**: in un esercizio vanno nominati tutti.

Torniamo al mare, ultima volta

(slide 33)

Perché l'acqua a 20 °C sembra più fredda dell'aria a 20 °C?

- **Conduzione**: l'acqua conduce circa 23 volte meglio dell'aria.
- **Convezione**: l'acqua a contatto con la pelle viene sostituita di continuo (in aria lo fa il vento).

- **Irraggiamento:** in aria scambiamo anche infrarosso con l'ambiente, e non è una frazione trascurabile (dello stesso ordine della convezione in aria ferma); in acqua è una goccia rispetto agli altri due.

La risposta giusta era la (b): stessa temperatura, ma l'acqua porta via energia dalla pelle molto più in fretta. Non è «solo nella nostra testa»: è un flusso di energia reale, diverso, e i nervi della pelle sentono la *rapidità* con cui perdiamo energia, non la temperatura.

Uscire dall'acqua

(slide 34)

Esci dalla doccia, o dal mare. L'aria è a 20 °C. Bagnato senti ancora più freddo che in acqua: per questo ci asciughiamo.

Prima di andare avanti. Che cosa succede, fisicamente? (a) L'acqua sulla pelle è più fredda dell'aria. (b) L'acqua sulla pelle evapora. (c) L'asciugamano è caldo.

L'evaporazione: una quarta via

(slide 35)

È la (b). Nel modello cinetico (figura P3.24 del libro) le particelle che sfuggono dalla superficie di un liquido sono le **più energetiche**. Quelle che restano hanno un'energia cinetica media minore: il liquido si raffredda, e se il liquido è sulla pelle si raffredda anche la pelle, che cede l'energia necessaria.

L'evaporazione è più rapida a temperatura più alta, con superficie più grande, con **aria in movimento** sopra la superficie (vento, ventilatore). Un asciugamano toglie il velo d'acqua: non resta niente da evaporare. I vestiti bagnati isolano male: l'acqua sostituisce l'aria intrappolata, molto più conduttrice, e in più evapora.

Quanta energia?

(slide 36)

Facciamo un ordine di grandezza. Per far evaporare 10 g d'acqua sulla pelle serve

$$Q = mL = 0,010 \text{ kg} \times 2,4 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1} = 2,4 \times 10^4 \text{ J} = 24 \text{ kJ},$$

dove L è il calore latente specifico di evaporazione dell'acqua, circa $2,4 \text{ MJ kg}^{-1}$ a temperatura della pelle (lo studieremo con i passaggi di stato). A riposo il corpo cede circa 100 W (valore del libro). Quindi

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{2,4 \times 10^4 \text{ J}}{100 \text{ W}} = 240 \text{ s} = 4 \text{ minuti}.$$

Evaporare appena dieci grammi d'acqua sottrae al corpo tutta l'energia che cede a riposo in quattro minuti. Non è un dettaglio: è un quarto modo di perdere energia, oltre a conduzione, convezione e irraggiamento.

Tre punti da tenere

(slide 37)

- **Conduzione:** l'energia passa in un materiale fermo, per vibrazioni e, nei metalli, per elettroni liberi.
- **Convezione:** un fluido porta l'energia muovendosi; il fluido caldo è meno denso e sale.
- **Irraggiamento:** onde infrarosse, nessun materiale necessario; chi assorbe bene emette bene.

E ancora: la pelle sente la rapidità con cui perde energia, non la temperatura; e l'evaporazione è un quarto modo di perderne.

Le precisazioni sul libro, in sintesi

Il libro dice	Meglio dire
L'irraggiamento è l'unico trasferimento «senza moto di particelle».	Anche nella conduzione gli atomi non si spostano. La differenza è che l'irraggiamento non ha bisogno di materiale.
Il fluido caldo diventa « <i>lighter</i> ».	Diventa meno denso: la massa non è cambiata.
Gli elettroni « <i>get hot</i> ».	Portano energia cinetica; la temperatura è di un insieme di particelle.
Le vibrazioni spiegano i soli «cattivi conduttori».	Le vibrazioni ci sono in ogni solido; nei metalli si aggiungono gli elettroni.
Con il legno il dito « <i>loses no more thermal energy</i> ». « <i>Heat will quickly reach the petroleum jelly.</i> »	Ne perde meno, non nulla. È l'energia termica che viene trasferita: il calore non è una cosa che viaggia.
I doppi vetri hanno « <i>usually a vacuum</i> ».	Di solito aria o argon, in uno strato sottile e sigillato.
Lucido o bianco: cattivo emettitore.	Vale per le superfici lucide e per la luce del Sole; per l'infrarosso conta la finitura più del colore.
La radiazione termica è infrarossa.	Solo a temperature ordinarie: il picco si sposta con T (Wien).

Esercizi

(slide 38–40)

1. Indica i due stati della materia in cui può avvenire la convezione, e spiega perché non può avvenire negli altri.

2. Un recipiente d'acqua è scaldato da un riscaldatore elettrico posto sul fondo (figura 9). Descrivi come il riscaldatore scalda tutta l'acqua. [3]

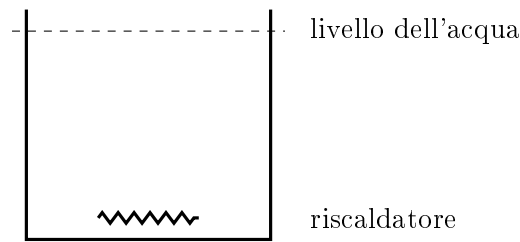


Figura 9: Il recipiente dell'esercizio 2.

3. Un cubo di Leslie è un contenitore di metallo con quattro facce diverse: nera opaca, nera lucida, bianca opaca, argento lucido. Lo si riempie con acqua bollente, in modo che tutte le facce siano alla stessa temperatura. Un rivelatore di infrarossi, tenuto sempre alla stessa distanza, misura la radiazione emessa da ciascuna faccia (figura 10).
- (a) Spiega perché il rivelatore deve restare alla stessa distanza da ogni faccia. [1]
- (b) Quale faccia dà la lettura più alta e quale la più bassa? Giustifica la risposta. [3]

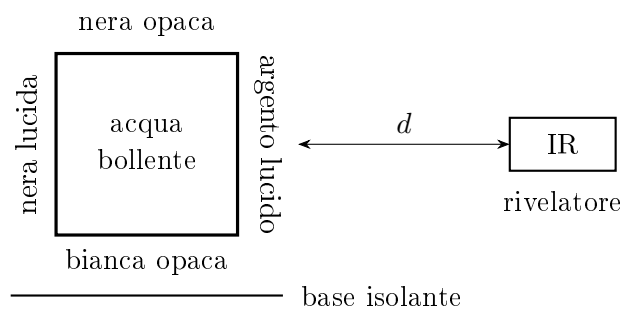


Figura 10: Il cubo di Leslie dell'esercizio 3, visto dall'alto (schema).

4. Una pentola di zuppa è sul fornello, con un cucchiaino di metallo lasciato dentro. Una persona è ferma a 30 cm dal bordo (figura 11). Per ciascuna situazione indica il meccanismo principale di trasferimento di energia termica e giustifica la risposta: (a) il manico del cucchiaino diventa caldo; (b) la zuppa sul fondo scalda quella in superficie; (c) la persona sente il viso scaldarsi. [6]

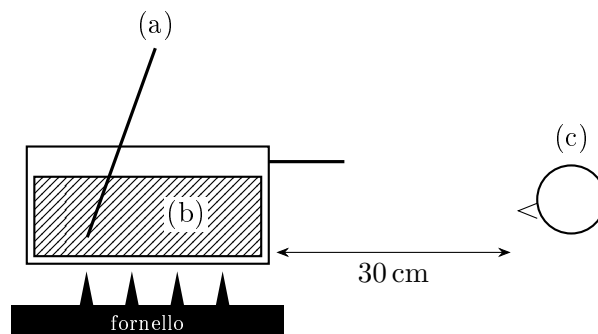


Figura 11: La pentola dell'esercizio 4 (schema).

5. Nell'esperimento delle due lattine (una nera opaca e una argento lucido, entrambe a 90°C all'inizio, senza lampada), la temperatura dopo 30 secondi del modello è:

Lattina	in aria	nel vuoto
nera	37°C	54°C
lucida	52°C	85°C

- (a) Calcola di quanto è scesa la temperatura in ciascuno dei quattro casi. [2]
 (b) In quale caso la lattina ha perso meno energia? [1]
 (c) Spiega perché la lattina lucida si raffredda molto di più in aria che nel vuoto. [2]
 (d) Indica due caratteristiche di un thermos che sfruttano questi risultati. [2]
6. Un oggetto a temperatura assoluta T emette radiazione con un massimo alla lunghezza d'onda $\lambda_{\text{max}} = b/T$, con $b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}$.
 (a) Calcola λ_{max} per la pelle umana, $T = 310 \text{ K}$. [2]
 (b) Una stella ha il massimo a $0,35 \mu\text{m}$. Calcola la sua temperatura e dì se è più calda o più fredda del Sole (5800 K). [3]
 (c) Una resistenza elettrica è a 800 K . Calcola λ_{max} e dì in che regione cade. [2]
7. Un atleta suda e 50 g di sudore evaporano dalla pelle. Per l'acqua $L = 2,4 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$.
 (a) Calcola l'energia necessaria per l'evaporazione. [2]
 (b) A riposo il corpo cede circa 100 W . Per quanto tempo basterebbe quell'energia? [2]
 (c) Spiega perché un ventilatore ci fa sentire più freschi senza abbassare la temperatura dell'aria. [2]

Soluzioni

1. **Liquidi e gas:** sono fluidi, le particelle possono muoversi e scorrere. Nei solidi le particelle restano in posizioni fisse, quindi il materiale non può spostarsi trasportando energia.
2. Tre idee, una per punto.
- L'acqua vicino al riscaldatore si scalda, quindi le sue particelle si muovono più veloci e l'acqua si **dilata**: diventa **meno densa**.
 - L'acqua meno densa **sale**.
 - L'acqua più fredda e più densa **scende** a prendere il suo posto: la **corrente di convezione** porta energia in tutta l'acqua (figura 12).

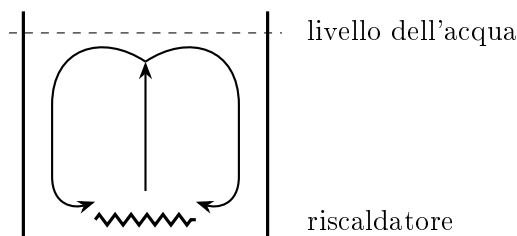


Figura 12: La corrente di convezione dell'esercizio 2 (schema).

3. (a) La lettura dipende anche dalla distanza: il rivelatore riceve meno radiazione se è più lontano. Per confrontare le facce la distanza deve essere l'unica cosa che non cambia (variabile controllata): così la differenza fra le letture dipende solo dalla superficie.

(b) Le facce sono tutte alla stessa temperatura, quindi le differenze dipendono dalla superficie. La lettura più **alta** è quella della faccia **nera opaca**: è un buon emettitore di infrarosso. La più **bassa** è quella della faccia **argento lucido**: è un cattivo emettitore (buon riflettore). La nera lucida e la bianca opaca stanno in mezzo.

4. (a) *Conduzione*: l'energia passa lungo il cucchiaino di metallo, che è un buon conduttore (vibrazioni degli atomi ed elettroni liberi); il materiale non si muove. (b) *Convezione*: la zuppa sul fondo si scalda, si dilata, diventa meno densa e sale; quella più fredda e più densa scende: è un fluido che si muove. (c) *Irraggiamento*: la persona è a lato della pentola. L'aria calda sale, non va di lato (esclude la convezione), e l'aria conduce pochissimo (esclude la conduzione): resta l'infrarosso emesso dalla pentola calda, che viaggia in linea retta e viene assorbito dalla pelle.

5. (a) Calo di temperatura, $\Delta T = 90 - T_{30}$:

Lattina	in aria	nel vuoto
nera	$90 - 37 = 53 \text{ K}$	$90 - 54 = 36 \text{ K}$
lucida	$90 - 52 = 38 \text{ K}$	$90 - 85 = 5 \text{ K}$

(b) La lattina lucida nel vuoto: è scesa di soli 5 K.

(c) In aria la lattina perde energia anche per conduzione e convezione con l'aria, e questi due meccanismi non dipendono dalla superficie. Nel vuoto resta solo l'irraggiamento, e una superficie lucida è un cattivo emettitore.

(d) Il vuoto fra le pareti (niente conduzione né convezione) e le superfici argentate (poca radiazione). Anche il tappo, che ferma la convezione e l'evaporazione dall'alto, va bene.

6. (a) $\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{310} = 9,348 \times 10^{-6} \text{ m} \approx 9,3 \mu\text{m}$.

(b) $T = \frac{b}{\lambda_{\max}} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{0,35 \times 10^{-6}} = 8,28 \times 10^3 \text{ K} \approx 8300 \text{ K}$ (con $0,35 \mu\text{m} = 3,5 \times 10^{-7} \text{ m}$).

È **più calda** del Sole (5800 K): massimo a lunghezza d'onda più corta, temperatura più alta.

(c) $\lambda_{\max} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{800} = 3,62 \times 10^{-6} \text{ m} \approx 3,6 \mu\text{m}$: infrarosso.

7. (a) $m = 0,050 \text{ kg}$; $Q = mL = 0,050 \times 2,4 \times 10^6 = 1,2 \times 10^5 \text{ J} = 120 \text{ kJ}$.

(b) $t = \frac{Q}{P} = \frac{1,2 \times 10^5}{100} = 1200 \text{ s} = 20 \text{ minuti}$.

(c) L'aria in movimento porta via il vapore e l'aria umida vicino alla pelle: l'evaporazione diventa più rapida, e con essa la perdita di energia dalla pelle. Inoltre rinnova lo strato d'aria a contatto con la pelle (convezione forzata). La temperatura dell'aria non cambia: cambia la rapidità con cui perdiamo energia, che è ciò che sentiamo.