

Capitolo 8

Lo spostamento del calore

1. Il calore si può spostare sia col meccanismo della conduzione che col meccanismo dell'irraggiamento. Il fenomeno della **conduzione** del calore consiste nel passaggio di calore da un corpo caldo a un corpo freddo posti materialmente a contatto, attraverso la superficie di contatto, senza che attraverso tale superficie si verifichi uno spostamento di materia: ciò che effettivamente si sposta da un corpo all'altro è energia cinetica associata al moto di agitazione termica delle molecole, per effetto delle interazioni («urti») tra molecole dei due corpi nella zona di contatto.

Ovviamente, la conduzione di calore si verifica anche tra una parte e un'altra parte di uno stesso corpo, nel caso siano diverse le rispettive temperature.

2. È ben noto che i diversi materiali presentano una diversa attitudine alla conduzione del calore: se volessimo arroventare sulla fiamma l'estremità di una bacchetta metallica, non potremmo certamente tenerne in mano l'altra estremità, mentre potremmo tranquillamente tenere in mano un bastone di legno che all'estremità opposta sta bruciando.

L'attitudine dei corpi alla trasmissione del calore per conduzione (la *conducibilità termica* di un materiale) viene precisata nel seguente modo. Supponiamo che una parete di area A e di spessore d separi un corpo caldo da un corpo freddo, e supponiamo che sia $\Delta\theta$ la differenza di temperatura tra i due corpi. La quantità di calore q che nel tempo Δt si sposta, attraverso la parete, dal corpo caldo al corpo freddo è data dalla **legge di Fourier**:

$$[A] \quad q = \frac{k A \Delta\theta \Delta t}{d}$$

dove k è il **coefficiente di conducibilità termica** del materiale della parete. Le dimensioni di k sono quelle di un'energia diviso una lunghezza, diviso un tempo e diviso una temperatura. L'unità internazionale è quindi il watt a metro e a kelvin ($\text{W/m}\cdot\text{K}$).

3. *Buoni conduttori* del calore sono quei materiali a cui compete un elevato valore del coefficiente di conducibilità: tra essi, tutti i metalli allo stato solido (il valore numerico di k , espresso in $\text{W/m}\cdot\text{K}$, è 429 per l'argento, 401 per il rame, 237 per l'alluminio, 46 per l'acciaio). *Cattivi conduttori* del calore sono invece i materiali ai quali compete un piccolo valore di k , come accade per i solidi non metallici e (importante) per *tutti i materiali allo stato fluido*: ad esempio, il valore numerico di k (sempre espresso in $\text{W/m}\cdot\text{K}$) è 0,8 per il vetro, 0,61 per l'acqua, 0,59 per il ghiaccio, 0,026 per l'aria.

4. L'aria dunque ha una conducibilità termica più di 15 000 volte inferiore a quella del rame: ciò significa che, *posto che il calore si possa spostare solo per conduzione*, per ottenere lo stesso isolamento termico assicurato da uno spessore d'aria di 1 mm occorrerebbe uno spessore di rame di oltre 15 m. La fig. 1 mostra chiaramente che l'isolamento termico prodotto dal vetro di una finestra è essenzialmente dovuto allo strato d'aria pressoché immobile a ridosso del vetro, all'interno come all'esterno (l'isolamento risulta quindi molto compromesso in caso di forte ventilazione).

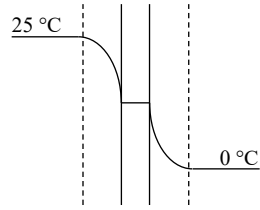


Fig. 1 – Il salto di temperatura attraverso il vetro di una finestra.

5. Il motivo per cui, in un ambiente a temperatura *inferiore* a quella corporea (ad esempio, in un appartamento), un oggetto metallico appare, al contatto con la mano, più freddo di un oggetto non metallico, trova spiegazione proprio nella diversa attitudine dei due materiali alla conduzione del calore. Il calore fluisce dalle dita all'oggetto tendendo a stabilire, nella zona di contatto, una situazione di equilibrio termico, cioè di uguaglianza della temperatura: se il materiale presenta una bassa conducibilità termica, si riscalda subito nella zona di contatto cosicché il flusso di calore rallenta rapidamente. Se, al contrario, la temperatura degli oggetti fosse superiore a quella corporea, l'oggetto metallico apparirebbe più caldo.

6. Si noti: la cattiva capacità di conduzione termica dei fluidi non autorizza a concludere che un materiale fluido realizza senz'altro un buon isolamento termico. In condizioni opportune, la trasmissione di calore da un corpo caldo a uno freddo separati da un fluido può essere fortemente agevolata dal fenomeno della **convezione**, cioè dello scambio di posizione tra fluido caldo e fluido freddo per effetto del diverso peso specifico.

Si consideri ad esempio (fig.2) un recipiente di vetro pieno d'acqua: sull'acqua galleggino alcuni cubetti di ghiaccio, mentre altri cubetti di ghiaccio sono trattenuti sul fondo del recipiente. Se, a mezzo di una resistenza elettrica posta all'interno del liquido, o di una fiamma portata a contatto del vetro, riscaldiamo l'acqua a mezza strada tra il fondo del recipiente e la superficie libera, possiamo osservare che i cubetti che galleggiano cominciano subito a fondere. Quelli posti sul fondo rimangono invece allo stato solido perfino quando l'acqua posta nella parte superiore entra in ebollizione.

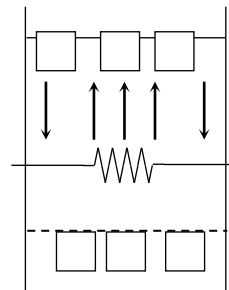


Fig. 2

La spiegazione è semplice. L'acqua calda è più voluminosa, quindi «più leggera» dell'acqua fredda (salvo la lieve anomalia attorno ai 4 °C). Perciò

l'acqua riscaldata dalla sorgente di calore sale in superficie, dove «galleggia» sull'acqua fredda che scende e viene a sua volta riscaldata dalla sorgente di calore: in tal modo giunge in superficie acqua sempre più calda, mentre sul fondo del recipiente l'acqua fredda, più pesante, non ha nessuna possibilità di risalire verso la sorgente di calore. Il calore si propaga dalla sorgente verso il fondo del recipiente solo per conduzione, e quindi – trattandosi di un liquido – con lentezza estrema.

Gli spostamenti di massa all'interno di un sistema fluido non isoterma hanno grandiose manifestazioni in natura: le correnti marine e i venti hanno nel meccanismo della convezione la loro causa principale.

7. A differenza di quanto accade per la conduzione, il passaggio di calore da un corpo *A* a un corpo *B* per **irraggiamento** non implica la presenza di un mezzo materiale tra *A* e *B*, anzi si compie meglio nel vuoto, dove l'energia trasportata dalla radiazione viaggia più velocemente (300 000 km/s) e senza perdite (la materia attraversata dalla radiazione assorbe energia). È per irraggiamento che dal Sole giunge ininterrottamente sulla Terra, dopo aver attraversato 150 milioni di chilometri di spazio vuoto, una enorme quantità di calore (e, più in generale, di energia).

8. Per il fatto di essere costituito da particelle cariche di elettricità (nuclei atomici, elettroni) in continuo, rapido movimento (agitazione termica), qualsiasi corpo emette, a qualsiasi temperatura (anche in prossimità dello zero assoluto), onde elettromagnetiche di tutte le lunghezze da un minimo di $0,80 \mu$ fino a un massimo di circa 1 mm: è la cosiddetta radiazione infrarossa, non visibile, percepibile invece attraverso gli effetti di riscaldamento che produce (si pensi al tepore irradiato da un calorifero). Se la temperatura di un corpo aumenta, l'energia da esso irradiata aumenta molto rapidamente, grosso modo in proporzione alla quarta potenza della temperatura assoluta: attorno ai 600°C i corpi cominciano ad irradiare anche per effetto della transizione degli elettroni più esterni degli atomi da stati energetici eccitati a stati di minor energia, e la radiazione emessa comincia conseguentemente a poter essere percepita anche come luce (lunghezze d'onda inferiori a $0,78 \mu$): prima di colore rosso cupo, poi, col crescere della temperatura e con l'estendersi dello spettro di emissione a lunghezze d'onda sempre più brevi, di colore rosso più brillante, poi giallo e finalmente, verso i 3000°C , con la sovrapposizione di tutte le frequenze ottiche, bianco ^[1].

¹ La radiazione termica (= dipendente dalla temperatura dei corpi) include quindi sia la radiazione infrarossa che la radiazione ottica, e a temperature molto elevate (sopra i 3000 K) si estende a lunghezze d'onda più piccole, sconfinando nel campo della radiazione ultravioletta. Onde di lunghezza ancora più piccola (ultravioletto, radiazione X, radiazione γ) non sono in relazione con la temperatura dei corpi: la radiazione ultravioletta, ad esempio, viene emessa per lo più dagli atomi dei gas, assieme a radiazione ottica, durante le scariche elettriche. Analogamente, non sono in relazione con la temperatura le onde di lunghezza superiore al millimetro (microonde e radioonde, prodotte a mezzo di dispositivi elettronici, ad esempio circuiti oscillanti).

9. In ogni caso, l'energia emessa non è distribuita uniformemente su tutte le lunghezze d'onda, ma preferibilmente su lunghezze d'onda intermedie, secondo una curva a campana del tipo mostrato nel grafico in fig.3 («spettro energetico di emissione»): la grandezza in ordinate è la **radianza specifica** (o «radianza spettrale», o ancora «potere emissivo specifico») $dH_e/d\lambda$, dove H_e è la **radianza** («potere emissivo»), vale a dire l'energia emessa per unità di tempo e di area (W/m^2); $d\lambda$ è un intervallo infinitesimo di lunghezze d'onda, dH_e è l'energia emessa per unità di tempo e di area sulle lunghezze d'onda comprese in $d\lambda$. In tal modo, l'area compresa tra il grafico e l'asse delle ascisse entro un dato intervallo di lunghezze d'onda corrisponde all'energia complessivamente emessa, per unità di area e di tempo, sulle lunghezze d'onda comprese entro tale intervallo.

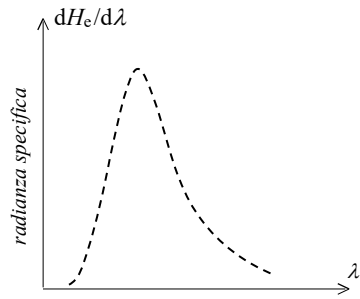


Fig. 3

10. La radianza dipende essenzialmente da due fattori: la natura della superficie e la sua temperatura. In generale, le superfici scure e opache irradiano più delle superfici chiare e lucide. E lo stesso vale per l'energia che una superficie assorbe quando viene investita da radiazione elettromagnetica (la parte non assorbita viene riflessa): la capacità di assorbimento è tanto più grande quanto più grande è la capacità di emissione. Una superficie coperta di nerofumo, che assorbe quasi tutta l'energia che riceve (il 95%), irradia, a parità di temperatura, di area e di tempo, più energia della maggior parte delle altre superfici. Le superfici lucidate a specchio, viceversa, riflettono quasi tutta l'energia ricevuta, e corrispondentemente emettono, a parità di ogni altra condizione, meno energia rispetto alle altre superfici.

11. Una superficie ideale, capace di assorbire tutta l'energia che riceve, si chiama **corpo nero**: tale superficie irradierebbe, a parità di condizioni, più energia di qualsiasi superficie reale. La migliore approssimazione di corpo nero è una piccola apertura di passaggio tra una cavità e l'ambiente esterno: la radiazione che penetra nella cavità dall'esterno subisce una serie di riflessioni, e a ogni riflessione una parte più o meno grande dell'energia incidente viene assorbita dalla superficie, per cui in pratica la radiazione viene tutta assorbita dall'apertura della cavità – *quale che sia il materiale delle pareti che la delimitano* – prima di poterne riemergere. In particolare, se ciò che incide sull'apertura di passaggio è luce, la luce non può riemergere dalla cavità, per cui l'apertura appare visivamente *nera* rispetto alla superficie circostante (che invece riflette in misura maggiore o minore la luce, in dipendenza dal tipo di materiale). Si noti tuttavia che, nel caso di radiazione ottica, l'apertura risulta nera solo rispetto alla riflessione, solo quindi se la temperatura della cavità è abbastanza bassa da non dar luogo a emissione di radiazione visibile: altrimenti, per quanto detto circa la corrispondenza tra capacità di assorbimento e capacità di emissione, la

superficie del foro appare al contrario più luminosa della superficie circostante (se si osserva, al buio, un oggetto metallico incandescente, sulla cui superficie è presente un forellino, si nota che la luce proveniente dal forellino è notevolmente più brillante di quella proveniente dal resto della superficie). Analogamente è più intensa la radiazione termica proveniente dal foro rispetto a quella proveniente dalle pareti.

12. Secondo la **legge di Stefan - Boltzmann**, l'irraggiamento di energia da un corpo nero è governato dalla relazione

$$[B] \quad H_e = \sigma T^4$$

dove σ è la **costante di Stefan**, $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$), e T è la temperatura assoluta della superficie emittente. Analizzando la radiazione che fuoriesce da una cavità si ottengono grafici (spettri energetici di emissione) che mostrano come varia, al variare della lunghezza d'onda, il potere emissivo specifico $dH_e/d\lambda$ del corpo nero alle diverse temperature.

La fig. 4 dà una idea dell'andamento di tali curve per tre diversi valori della temperatura: si nota subito che l'area sottesa da una curva (rappresentativa dell'energia complessivamente emessa) aumenta molto rapidamente col valore della temperatura, e si nota che al crescere della temperatura diminuisce l'ascissa λ_{\max} del vertice della curva. Secondo la **prima legge di Wien** ("legge dello spostamento"), l'ascissa del vertice è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta: dai dati sperimentali risulta

$$\lambda_{\max} T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}.$$

La **seconda legge di Wien** stabilisce invece che i valori massimi del potere emissivo specifico sono proporzionali alla quinta potenza della temperatura assoluta.

13. Chiaramente la radiazione che esce all'esterno della cavità («radiazione di corpo nero») è una frazione della radiazione interna, quella che riempie la cavità attraversandola in tutte le direzioni: la radiazione interna ha dunque in ogni caso, *indipendentemente dal materiale costitutivo*, la stessa natura della radiazione emergente, deve quindi essere considerata anch'essa radiazione di corpo nero.

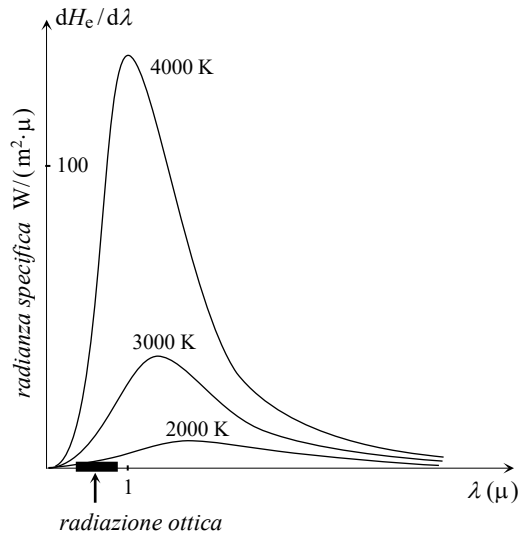


Fig. 4

Ciò risulta del resto anche dalla seguente considerazione: all'interno di una cavità, un corpo nero che si trova alla stessa temperatura delle pareti è in condizioni di equilibrio termico, assorbe cioè tutta l'energia che incide su di esso senza riscaldarsi e senza raffreddarsi: ciò significa che emette tanta energia quanta ne assorbe (entro qualsiasi intervallo di lunghezze d'onda, dato che il ragionamento potrebbe essere applicato anche a un corpo nero circondato da un filtro che lascia passare nei due sensi solo le lunghezze d'onda comprese nell'intervallo in questione). Dunque, la radiazione incidente sul corpo nero deve avere le stesse caratteristiche (lo stesso spettro energetico di emissione) della radiazione che esso emette, deve cioè essere anch'essa radiazione di corpo nero.

Ci si potrebbe chiedere come mai una generica superficie, che ha in generale un potere emissivo inferiore a quello di un corpo nero, emette invece come un corpo nero quando è richiusa su sé stessa a formare una cavità. La spiegazione sta nel fatto che nel secondo caso la radiazione emessa dalla superficie incide poi, dopo riflessione, in un altro punto della stessa superficie, dove subisce un'ulteriore riflessione parziale, e così via fino a completo assorbimento. Radiazione e assorbimento si compensano in tal modo senza produrre variazioni di temperatura.

14. Il fatto che, all'interno di una cavità, un corpo nero in equilibrio termico con le pareti assorba, *a tutte le temperature*, tanta energia quanta ne emette, significa che il **potere di assorbimento** H_a del corpo nero (l'energia assorbita per unità di area e di tempo) è espresso, come il potere emissivo, dalla relazione

$$[C] \quad H_a = \sigma T^4$$

dove T è la temperatura assoluta delle pareti.

A differenza del corpo nero, un corpo reale assorbe solo una parte della radiazione incidente: la radiazione non assorbita viene riflessa all'indietro. In particolare, il potere di assorbimento di un corpo posto in una cavità le cui pareti si trovano alla stessa temperatura T della superficie assorbente è espresso dalla relazione

$$[D] \quad H_a = \alpha \sigma T^4$$

dove σ è la costante di Stefan-Boltzmann e α è il **coefficiente di assorbimento** ("assorbività") della superficie del corpo considerato: un numero sempre inferiore a 1, il cui valore dipende dalla natura fisico-chimica della superficie considerata e dalla sua temperatura^[2]. Si vede dalla [D] che l'energia assorbita non dipende in questo specifico caso (corpo in equilibrio termico all'interno di una cavità) dal particolare materiale di cui le pareti sono costituite: si è visto infatti in precedenza che la radiazione che riempie una cavità è, a tutti gli effetti, radiazione di corpo nero.

² Più in generale, l'energia assorbita dipende anche dalla temperatura della superficie emittente, nonché dalla particolare distribuzione spettrale della radiazione (da come cioè l'energia incidente è distribuita fra le diverse lunghezze d'onda).

15. La corrispondenza tra capacità di assorbimento e capacità di emissione è precisata dalla **legge di Kirchhoff**, secondo la quale l'energia emessa, per unità di tempo e di area, da una superficie che si trova a temperatura assoluta T è

$$[E] \quad H_e = \alpha \sigma T^4$$

dove α è il coefficiente di assorbimento della superficie in questione alla temperatura data. Così, ad esempio, se un corpo assorbe, a una data temperatura, 1/3 dell'energia portata su di esso dalla radiazione elettromagnetica (1/3 quindi dell'energia che assorbirebbe se fosse un corpo nero), esso irradia a quella temperatura, per unità di area e di tempo, 1/3 dell'energia che irradierebbe nel caso fosse un corpo nero. La regola vale sia per l'energia complessivamente assorbita e irradiata, sia anche per l'energia assorbita e irradiata entro un qualsivoglia intervallo di lunghezze d'onda.

16. La legge di Kirchhoff si fonda sull'evidenza sperimentale: un corpo a temperatura T , posto in una cavità le cui pareti sono anch'esse a temperatura T , è in equilibrio termico: non si raffredda e non si riscalda. Ciò significa che assorbe, per unità di tempo e di area, un'energia uguale a quella emessa: quest'ultima deve perciò essere necessariamente espressa dalla [E].

Ne consegue che un corpo a temperatura assoluta T , circondato da pareti a temperatura kelvin T_p , perde, nell'unità di tempo e per unità di area, l'energia

$$[F] \quad H_e - H_a = \alpha \sigma (T^4 - T_p^4)$$

dove α è il coefficiente di assorbimento del corpo in questione alla temperatura T a cui si trova.

17. Un corpo immaginario per il quale il coefficiente di assorbimento è uguale a zero a tutte le temperature e per tutte le frequenze si chiama **riflettore ideale**: esso riflette la totalità della radiazione da cui è investito, e corrispondentemente non emette radiazione. Le superfici chiare e lucide sono quelle che meglio approssimano il concetto.

QUESITI E PROBLEMI

- 1 Due ambienti a diversa temperatura sono collegati (fig. 5) attraverso una sbarra metallica costituita da due tronchi, *A* e *B*, di uguale lunghezza ma di diverso materiale. Sapendo che la sbarra può scambiare calore solo alle due estremità, che in ogni punto del sistema la temperatura si mantiene costante e che il coefficiente di conduzione termica è tre volte più grande per *A* che per *B*, si stabilisca quale dei grafici seguenti (fig. 6) definisce meglio, in funzione della distanza *x* dall'ambiente caldo, l'intensità φ del flusso di calore (J/s) attraverso le sezioni trasversali della sbarra.

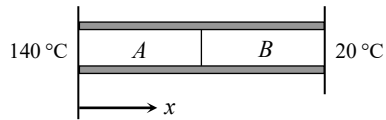


Fig. 5

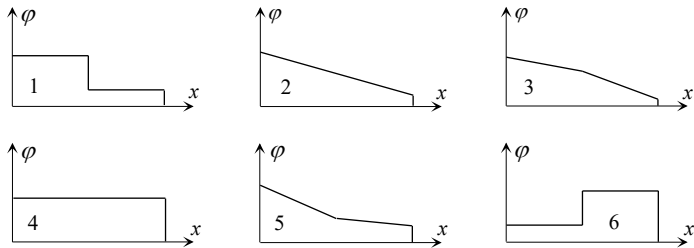


Fig. 6

- 2 Si consideri ancora la situazione del quesito precedente, e si tracci un diagramma che mostra come varia la temperatura lungo la sbarra metallica.
- 3 Attraverso i due corpi *A* e *B* (fig. 7) il calore fluisce da un ambiente caldo a un ambiente freddo, senza altre dispersioni. Tenuto conto che il corpo *A* ha lunghezza doppia e conducibilità termica tripla rispetto a *B*, si determini a quale valore si stabilizza la temperatura sulla superficie di contatto tra i due corpi.

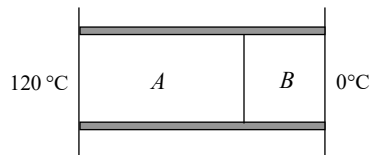


Fig. 7

- 4 Tre sbarre metalliche di uguale sezione trasversale, di uguale lunghezza ma di diverso materiale vengono usate per trasmettere calore da un corpo caldo a un corpo freddo, in circostanze tali per cui gli scambi termici avvengono solo tra le sbarre e i due corpi. Posto che interessi aumentare al massimo la rapidità di spostamento del calore, ci si chiede se convenga:
- (a) disporre le sbarre «in parallelo», cioè tutte con un estremo a contatto del corpo caldo e l'altro a contatto col corpo freddo,
- (b) disporle in successione («in serie»), in modo che formino un'unica sbarra di lunghezza tripla.

- 5 Nel caso (b) della domanda precedente, sarebbe possibile, scegliendo opportunamente l'ordine in cui le sbarre si susseguono, aumentare o diminuire il flusso di calore?
- 6 Le pareti di un contenitore termico per picnic, in polistirolo espanso, hanno spessore 2 cm e area complessiva 0,8 m². Nel contenitore vengono introdotte alcune lattine di bibite assieme a elementi refrigeratori contenenti complessivamente circa 5 kg di ghiaccio: la temperatura esterna è 30 °C, la temperatura interna è, all'inizio, 0 °C (il ghiaccio sta fondendo). Tenuto conto che il coefficiente di conduzione termica del polistirolo espanso vale 0,01 Wm⁻¹K⁻¹, si chiarisca se è ragionevole prevedere che dopo 24 h le bevande siano ancora alla temperatura iniziale.
- 7 Uno studente che vuole mettere in pratica le proprie conoscenze di Fisica decide di fare una stima del flusso di calore che attraversa il vetro della sua finestra. La temperatura interna è 22 °C, la temperatura esterna -5 °C. Avendo appurato che la lastra di vetro ha uno spessore di 2 mm e una superficie di circa 1,9 m², e che la conducibilità termica del vetro è circa 0,80 W/(m·K), lo studente imposta questo calcolo:

$$\varphi = q/\Delta t = (kA \Delta \theta)/d = (0,80 \times 1,9 \times 27 / 0,002) \text{ J/s.}$$
 Si esprima un parere sull'attendibilità del risultato in tal modo ottenuto.
- 8 Il filamento di tungsteno di una lampada a incandescenza da 60 W lavora a una temperatura di circa 2200 °C. Assumendo per l'emissività del filamento il valore 0,30, si determini l'area della sua superficie.
- 9 Quanta energia viene perduta per radiazione dal corpo umano? Si assuma che la superficie del corpo abbia una temperatura di 30 °C, un'area di 1,2 m², una emissività uguale a 1, e si supponga che la temperatura dell'ambiente circostante sia 20 °C.
- 10 Si chiarisca la ragione per cui la radiazione termica passa con difficoltà dall'esterno all'interno, o viceversa, di un vaso Dewar (o «thermos»).
- 11 Di quanto aumenta l'energia irradiata in un dato intervallo di tempo da una data superficie se la sua temperatura passa a 0 a 100 °C?
- 12 Supponiamo che a 700 °C l'energia emessa per unità di tempo da una data superficie sia distribuita tra le diverse lunghezze d'onda dello spettro di emissione in modo da risultare massima sulla lunghezza d'onda di 7,20 μ (1 μ = 10⁻⁶ m). Su quale lunghezza d'onda verrebbe irradiato il massimo della potenza se la temperatura salisse a 1000 °C?
- 13 La radiazione da cavità risulta del tutto indipendente dal particolare materiale entro al quale la cavità è stata ricavata (*vero/falso*).
- 14 Il cosiddetto «corpo nero» risulta visivamente nero solo rispetto alla riflessione (*vero/falso*).

15 Una data superficie irradia, per unità di tempo e di area, solo 1/3 dell'energia che, a parità di temperatura, irradierebbe se fosse un corpo nero. In che relazione stanno allora l'energia radiante assorbita per unità di tempo e di area da tale superficie e l'energia assorbita, nelle stesse circostanze, da un corpo nero?

16 Uno studente, chiamato a spiegare in che modo l'energia emessa per irraggiamento dal corpo nero è legata alla temperatura e alla lunghezza d'onda, risponde con uno schizzo analogo a quello della fig. 8. Purtroppo, il disegno contiene non meno di tre grossi errori: quali sono?

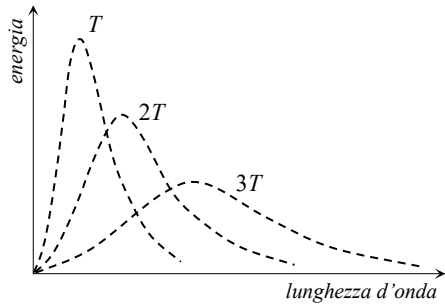


Fig. 8

RISPOSTE

1 Essendosi la temperatura, per ipotesi, stabilizzata ovunque, il flusso di calore ha necessariamente lo stesso valore in tutte le sezioni della sbarra: se infatti il flusso di calore fosse diverso per la sezione S e per la sezione S' , il materiale compreso tra le due sezioni tenderebbe a scaldarsi oppure a raffreddarsi, perché il calore complessivamente scambiato sarebbe diverso da zero. Il grafico corretto è pertanto il n. 4.

2 Perché il flusso di calore $\varphi = q/\Delta t$ sia lo stesso nei due tronchi, occorre (vedi legge di Fourier sul calore trasmesso per conduzione: $q = kA\Delta t\Delta\theta/d$) che il salto complessivo di temperatura sia tre volte più grande per B , che ha uguale lunghezza e uguale sezione trasversale, ma conducibilità termica tre volte inferiore (fig. 9).

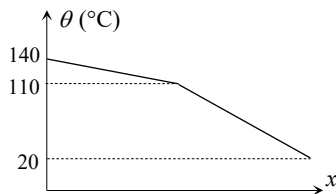


Fig. 9

3 Dato che per il corpo A il rapporto k/d (conducibilità su lunghezza) è più grande che per il corpo B nel rapporto di 3 a 2, la formula di Fourier impone che, in compenso, il salto di temperatura attraverso A sia più piccolo nel rapporto di 2 a 3 di quello attraverso B . Pertanto, alla superficie di separazione la temperatura è 72°C (il salto di temperatura è 48°C per A e 72°C per B).

4 Convienne la disposizione in parallelo. Il flusso di calore attraverso una singola sbarra dipende infatti dal salto di temperatura tra i due estremi, e quindi è in ogni caso più elevato quando le sbarre sono disposte in parallelo (se sono in serie, la temperatura continua a diminuire da un estremo all'altro della serie, e quindi per ogni sbarra è disponibile solo una parte

della differenza complessiva di temperatura). Oltre a questo, se le sbarre sono in parallelo i tre flussi termici si sommano, se invece sono in serie c'è un unico flusso termico (inferiore a ognuno dei tre flussi termici che si verificano con la disposizione in parallelo).

- 5 Se n sbarre metalliche, di lunghezza e sezione anche diverse, sono disposte in serie, il flusso di calore non varia al variare dell'ordine di successione. Risulta infatti $q/\Delta t = k_1 A_1 \Delta \theta_1 / d_1 = k_2 A_2 \Delta \theta_2 / d_2 = k_3 A_3 \Delta \theta_3 / d_3 = \dots$, il che significa che il salto di temperatura complessivo si ripartisce fra le varie sbarre esclusivamente in funzione delle relative caratteristiche geometriche e di conducibilità: il salto $\Delta \theta$ di temperatura su una sbarra è proporzionale alla sua lunghezza, e inversamente proporzionale alla conducibilità termica e alla sezione.

- 6 Inizialmente il flusso di calore è

$$\varphi = kA(\Delta\theta)/d = (0,01 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}) \times 0,8 \text{ m}^2 \times 30 \text{ K} / 0,02 \text{ m} = 12 \text{ W}.$$

La temperatura interna comincia a salire solo dopo che il ghiaccio si è completamente fuso, il che (essendo il calore di fusione del ghiaccio uguale a circa $80 \text{ cal/g} = 335 \text{ J/g}$) richiede la somministrazione di una quantità di calore $q = (335 \text{ J/g}) \times 5000 \text{ g} = 1,67 \times 10^6 \text{ J}$. Essendo il flusso di calore $\varphi = 12 \text{ J/s}$, il tempo necessario perché fonda tutto il ghiaccio è $(1,67 \times 10^6 \text{ J}) / (12 \text{ J/s}) = 1,39 \times 10^5 \text{ s}$. E dato che in 24 h ci sono solo 86400 s, dopo 24 ore la fusione del ghiaccio non è ancora completata, perciò le bevande si trovano ancora alla temperatura iniziale.

- 7 Il risultato è del tutto inattendibile, perché lo studente ha assegnato al salto di temperatura tra le due facce della lastra di vetro un valore molto più grande di quello effettivo, ottenendo in tal modo per il flusso termico un valore assolutamente esagerato. Come è mostrato in fig. 10, i 27°C di differenza tra temperatura interna ed esterna sono quasi tutti ripartiti tra i due sottili strati di aria che, all'interno e all'esterno, aderiscono al vetro³.

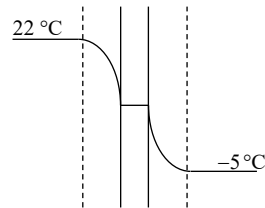


Fig. 10 – Andamento della temperatura attraverso il vetro della finestra

- 8 Se T è la temperatura assoluta del filamento e T_a quella dell'ambiente circostante, il filamento irradia, per unità di tempo e di area, un'energia netta $H = e\sigma(T^4 - T_a^4)$, dove e rappresenta l'emissività e σ è la costante di Stefan-Boltzmann. Nel nostro caso, supponendo che l'ambiente sia a 20°C risulta $H = 0,30 \times (5,67 \times 10^{-8}) \times [(2200 + 273)^4 - (20 + 273)^4] \text{ W/m}^2$. Trascurando, tra parentesi quadrata, il termine che contiene la temperatura

³ Se lo strato d'aria aderente alla superficie del vetro fosse omogeneo, la temperatura varierebbe in esso in modo lineare, e non nel modo indicato in figura. In realtà, più ci si allontana dal vetro e più diventa rapido il ricambio e il rimescolamento delle molecole, per cui al variare della distanza dal vetro la temperatura tende a variare in modo sempre più lento, fino a restare costante.