

1. Temperatura ed equilibrio termico

Fin da bambini abbiamo imparato a non toccare gli oggetti "troppo caldi". Abbiamo anche imparato che, se dimentichiamo di indossare la nostra giacca, quando usciamo in inverno possiamo sentire "freddo". Queste però sono sensazioni soggettive. Per poter trasformare in osservazioni scientifiche dobbiamo introdurre una nuova grandezza fisica, la **temperatura**. Assoceremo allora alti valori di questa grandezza agli oggetti caldi e bassi valori agli oggetti freddi.

Quando poniamo una pentola d'acqua fredda su un fornello, diciamo che del "calore" passa dal fornello caldo all'acqua fredda.

Più precisamente, definiamo il **calore** nel seguente modo:

Calore

Il calore è l'energia trasferita tra due oggetti a causa della loro differenza di temperatura.

Quando diciamo che c'è un "trasferimento di calore" o "un flusso di calore" da un oggetto A a un oggetto B, affermiamo semplicemente che l'energia totale dell'oggetto A diminuisce e quella dell'oggetto B aumenta. Quindi un oggetto non "contiene" calore, ma una certa quantità di energia, e l'energia che esso *scambia* con altri corpi, a causa della differenza di temperatura, è chiamata calore.



→ Il calore passa dal fornello caldo all'acqua più fredda contenuta nella pentola: si tratta di un trasferimento di energia dovuto alla differenza di temperatura.

Si dice che due oggetti sono in *contatto termico* se tra loro può avvenire un passaggio di calore. In generale, quando un oggetto caldo è posto in contatto termico con un oggetto freddo viene *scambiato del calore*. Il risultato è che l'oggetto caldo si raffredda e quello freddo si riscalda. Dopo un certo periodo di contatto termico, il flusso di calore si interrompe; diciamo allora che gli oggetti sono in **equilibrio termico**.

Scambio di calore ed equilibrio termico

Se due oggetti in contatto termico hanno una temperatura diversa, *il calore fluisce da quello più caldo a quello più freddo*, fino a quando non raggiungono entrambi la stessa temperatura.

Due oggetti sono in **equilibrio termico** quando hanno la *stessa temperatura*.

Supponiamo, ad esempio, di avere un pezzo di metallo e una vasca piena d'acqua e di voler sapere se, mettendo il metallo nell'acqua, fluisca del calore tra di essi.

Misuriamo la temperatura del metallo e quella dell'acqua: se le temperature sono uguali, possiamo concludere che non fluirà calore, invece, se le temperature sono diverse, ci sarà un flusso di calore. Non è importante il tipo di metallo, la sua massa, la sua forma, la quantità d'acqua, se l'acqua è dolce o salata e così via; tutto ciò che conta è la temperatura.

Possiamo quindi dire che:

Temperatura

La temperatura è la grandezza fisica che determina se due corpi sono in equilibrio termico oppure no.

La parte della fisica che si occupa dei fenomeni riguardanti il calore e la temperatura è la **termologia**.

A

ATTENZIONE

Il *contatto termico* e il *contatto fisico* non sono necessariamente la stessa cosa. Ad esempio, può esserci contatto termico senza che avvenga alcun contatto fisico, come quando ci scaldiamo le mani vicino a un fuoco.



2. La misura della temperatura

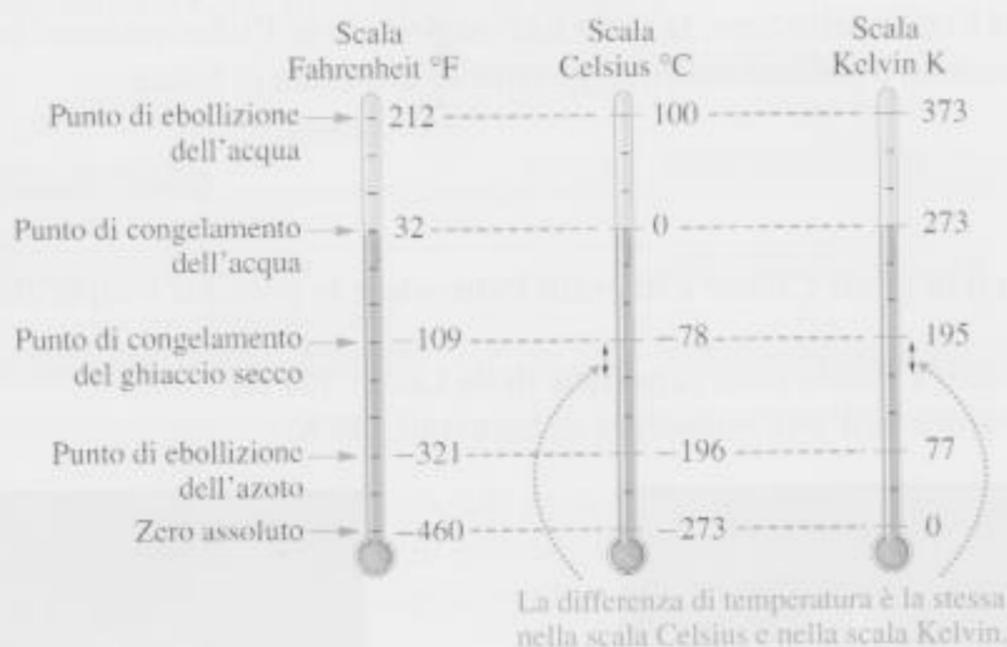
Per misurare la temperatura si usano strumenti chiamati **termometri**, che sfruttano gli effetti fisici determinati dalla temperatura stessa, come, ad esempio, la dilatazione che subisce un liquido (alcol o mercurio) posto all'interno di un sottile tubo di vetro, quando viene riscaldato.

Perché il termometro diventi uno strumento di misura è necessario fissare convenzionalmente due temperature di riferimento (ad esempio quella di fusione del ghiaccio e quella di ebollizione dell'acqua) e un intervallo unitario di temperatura. Ciò equivale a scegliere una **scala termometrica**.

Le scale termometriche più diffuse sono la *scala Celsius*, la *scala Fahrenheit* e la *scala Kelvin*: nella figura 1 le diverse scale sono confrontate fra loro prendendo come riferimento alcune temperature di particolare interesse, come quelle di congelamento e di ebollizione. Osserviamo che non esiste alcun limite superiore al valore che può assumere la temperatura. Gli esperimenti mostrano invece che esiste una *temperatura al di sotto della quale non è possibile raffreddare un oggetto*; questa temperatura è detta **zero assoluto** e corrisponde allo zero della scala Kelvin; sebbene sia possibile avvicinarsi sempre più allo zero assoluto, è tuttavia impossibile raggiungerlo.



↑ Un termometro da esterni.



TUTOR
Disegno attivo

figura 1

Confronto fra scale termometriche

La scala Celsius

Probabilmente la scala termometrica con la quale abbiamo maggiore confidenza è la **scala Celsius**, così chiamata in onore dell'astronomo svedese Anders Celsius (1701-1744). In questa scala si assegna il valore **0 °C** (0 gradi Celsius) alla temperatura del ghiaccio fondente e **100 °C** alla temperatura dell'acqua in ebollizione. L'intervallo tra queste due temperature è quindi suddiviso in **100** gradi Celsius.

Nella scala Celsius il limite inferiore dello zero assoluto corrisponde a $-273,15$ °C.

La scala Fahrenheit

Nei Paesi anglosassoni si usa comunemente la **scala Fahrenheit**, introdotta dal fisico polacco Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736). In questa scala la temperatura del ghiaccio fondente è **32 °F** (32 gradi Fahrenheit) e la temperatura dell'acqua bollente è **212 °F**. L'intervallo tra queste due temperature è quindi suddiviso in **180** gradi Fahrenheit.

Per passare dalla temperatura in Fahrenheit, T (°F), alla temperatura in Celsius, T (°C), e viceversa (fig. 2), si utilizza la proporzione:

$$T(^{\circ}\text{C}) : [T(^{\circ}\text{F}) - 32] = 100 : 180$$

figura 2

Corrispondenza fra gradi Celsius e gradi Fahrenheit



A

ATTENZIONE

La notazione per la scala Kelvin differisce un po' rispetto a quella della scala Celsius. In particolare, per un accordo internazionale, il termine *grado* e il suo simbolo ° non vengono usati nella scala Kelvin. Una temperatura di 5 K viene letta semplicemente "5 kelvin".

La scala Kelvin

La **scala Kelvin**, così chiamata in onore del fisico scozzese William Kelvin (1824-1907), si basa sull'esistenza dello zero assoluto. Lo zero della scala Kelvin, che indichiamo come **0 K**, è posto infatti **in corrispondenza dello zero assoluto**: nella scala Kelvin non esistono perciò temperature negative.

Le suddivisioni della scala Kelvin sono uguali a quelle della scala Celsius: 1 grado Celsius è uguale a 1 kelvin:

$$1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$$

Sapendo che lo zero assoluto è a $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, la conversione tra una temperatura $T\text{ (}^{\circ}\text{C)}$ espressa nella scala Celsius e una temperatura $T\text{ (K)}$ espressa nella scala Kelvin si basa sulla seguente relazione:

Conversione da gradi Celsius a kelvin, e viceversa

$$T\text{ (K)} = T\text{ (}^{\circ}\text{C)} + 273,15$$

$$T\text{ (}^{\circ}\text{C)} = T\text{ (K)} - 273,15$$

PLUS



Laboratorio La costruzione e la taratura di un termometro

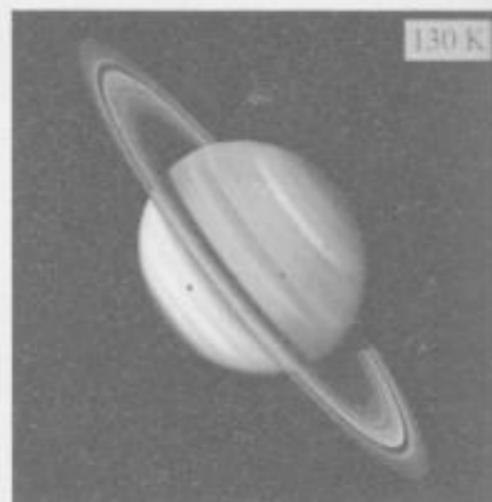
Sebbene la differenza tra le scale Celsius e Kelvin consista semplicemente in una scelta differente del livello dello zero, la scala Kelvin porta in sé l'informazione dell'esistenza dello zero assoluto e per questo è maggiormente utilizzata in fisica.

ESERCIZIO

1. Converti in gradi Celsius e in gradi Fahrenheit le seguenti temperature espresse in kelvin:

a) temperatura media sulla superficie della Luna: 400 K;

b) temperatura nell'alta atmosfera di Saturno: 130 K.



Convertiamo le temperature in gradi Celsius:

$$a) T\text{ (}^{\circ}\text{C)} = 400 - 273,15 = 126,85\text{ }^{\circ}\text{C} = 127\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$b) T\text{ (}^{\circ}\text{C)} = 130 - 273,15 = -143,15\text{ }^{\circ}\text{C} = -143\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Convertiamo in gradi Fahrenheit le temperature ottenute in gradi Celsius utilizzando la proporzione:

$$T\text{ (}^{\circ}\text{C)} : [T\text{ (}^{\circ}\text{F)} - 32] = 100 : 180$$

Otteniamo:

$$a) T\text{ (}^{\circ}\text{F)} - 32 = \frac{127 \cdot 180}{100} = 229 \rightarrow T\text{ (}^{\circ}\text{F)} = 229 + 32 = 261\text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$b) T\text{ (}^{\circ}\text{F)} - 32 = \frac{-143 \cdot 180}{100} = -257 \rightarrow T\text{ (}^{\circ}\text{F)} = -257 + 32 = -225\text{ }^{\circ}\text{F}$$

3. La dilatazione termica

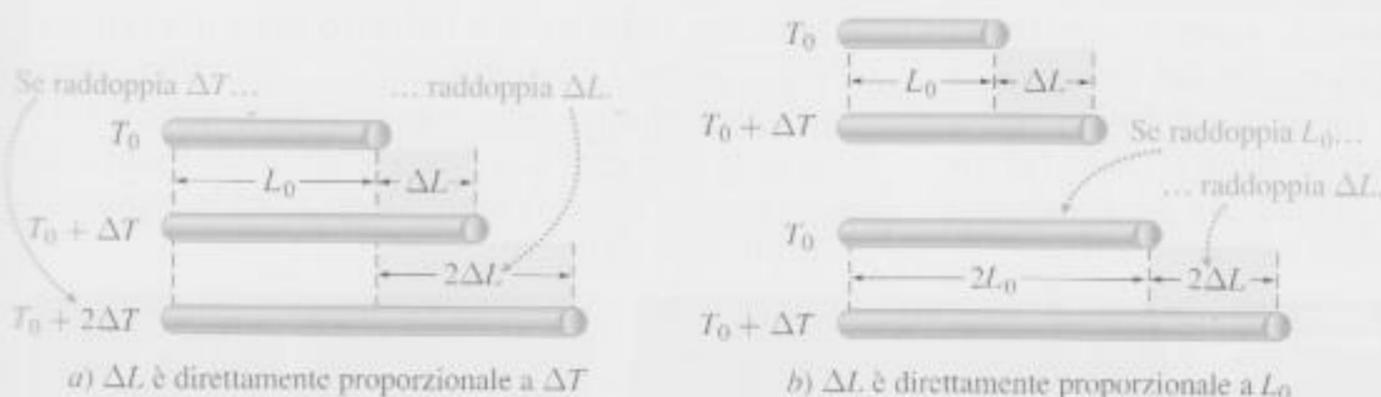
La maggior parte delle sostanze si dilata quando viene riscaldata. Ad esempio, i cavi delle linee elettriche aeree in una calda giornata estiva pendono di più, perché sono più lunghi rispetto a una fredda giornata invernale.

La **dilatazione termica** è alla base del funzionamento dei termometri a liquido (mercurio o alcol), compresi quelli usati fino a qualche tempo fa per misurare la febbre. Il liquido, messo a contatto con il corpo di cui si vuole misurare la temperatura, si espande e ciò provoca la variazione del suo livello all'interno del capillare del termometro; la lettura di questo livello su una scala graduata fornisce il valore della temperatura.

Ci sono tuttavia alcune eccezioni a questo comportamento dei liquidi: la più importante riguarda l'acqua.

La dilatazione lineare

Consideriamo una sbarra la cui lunghezza alla temperatura T_0 sia L_0 . Sperimentalmente osserviamo che, quando la sbarra viene riscaldata o raffreddata, la variazione della sua lunghezza $\Delta L = L - L_0$ è proporzionale alla variazione di temperatura $\Delta T = T - T_0$ e alla lunghezza iniziale L_0 , come mostrato in figura 3.



La costante di proporzionalità, che dipende dalla sostanza di cui è fatta la sbarra, è detta **coefficiente di dilatazione lineare**; la indicheremo con α .

Possiamo perciò esprimere le considerazioni precedenti con la seguente relazione:

Legge della dilatazione termica lineare

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

Nel SI il coefficiente di dilatazione lineare α si misura in K^{-1} , perché dal punto di vista delle dimensioni è l'inverso di una temperatura.

Poiché una variazione di temperatura di 1°C è uguale a una variazione di temperatura di 1 K , quando calcoliamo la dilatazione termica di un oggetto, la variazione di temperatura ΔT può essere espressa indifferentemente in gradi Celsius o in kelvin.

La tabella 1 fornisce i valori di α per alcune sostanze comuni.

ESERCIZIO

2. La Tour Eiffel, costruita nel 1889 da Alexandre Eiffel, è un'imponente struttura in ferro. Sapendo che la torre è alta 301 m alla temperatura di 22°C , calcola qual è la sua altezza alla temperatura di 0°C .

Il coefficiente di dilatazione lineare del ferro è $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. La variazione di temperatura ipotizzata è $\Delta T = 0^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C} = -22^\circ\text{C} = -22\text{ K}$. Usando la legge della dilatazione lineare, calcoliamo la variazione di lunghezza ΔL :

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T = (1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1})(301 \text{ m})(-22 \text{ K}) = -7,9 \cdot 10^{-9} \text{ m} = -7,9 \text{ cm}$$

Nelle giornate fredde, quindi, la Tour Eiffel si accorcia di circa 8 centimetri.



REAL PHYSICS

Perché i cavi delle linee elettriche aeree in una giornata calda pendono di più?



PLUS

Laboratorio La dilatazione termica dei liquidi

figura 3

Legge della dilatazione lineare

tabella 1 Coefficienti di dilatazione termica lineare

Sostanza	α (K^{-1})
Piombo	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Alluminio	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Ottone	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Rame	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Ferro	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Cemento	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Vetro di finestra	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Vetro pyrex	$3,3 \cdot 10^{-6}$
Quarzo	$5,0 \cdot 10^{-7}$



La dilatazione termica e le giunzioni

La dilatazione termica può avere talvolta effetti indesiderati, che devono essere evitati. Nei ponti, ad esempio, per prevenire eventuali danni alle strutture che possono derivare dalla dilatazione termica dei materiali, vengono mantenute separate le sezioni contigue, in modo da permettere la loro dilatazione nelle calde giornate estive. Se non ci fossero queste fessure, chiamate **giunti di dilatazione**, la dilatazione delle diverse sezioni della struttura potrebbe causare una deformazione o addirittura la rottura del ponte. La dilatazione termica è tutt'altro che trascurabile in molte situazioni, soprattutto quando riguarda oggetti lunghi; ricordiamo, infatti, che la dilatazione lineare che subisce un oggetto è direttamente proporzionale alla sua lunghezza iniziale. Le rotaie dei binari ferroviari, ad esempio, sono soggette ad allungamento e ad accorciamento nel senso della lunghezza a seconda della variazione di temperatura dell'ambiente esterno. Molti incidenti su linee ferroviarie sono stati prodotti proprio da deragliamenti dovuti alla deformazione delle rotaie.



Tradizionalmente, le rotaie sono costituite da tratti consecutivi fissati alle traversine e leggermente distanziati in modo tale da consentire la dilatazione di ogni singolo tratto nella stagione calda. Fino a poco tempo fa quando le ruote di un veicolo ferroviario passavano sulle discontinuità provocavano un caratteristico rumore metallico: attualmente si è sempre più diffuso il sistema di saldare i tratti di binario adiacenti mediante organi di giunzione (ganacce e chiavarde) che permettono loro un movimento relativo, di allontanamento e di avvicinamento. Anche nelle reti di distribuzione di fluidi soggetti a forti variazioni di temperatura si utilizzano dei sistemi per contrastare l'effetto della dilatazione termica, come i *compensatori di dilatazione*, elementi flessibili che, deformandosi, contrastano l'effetto della dilatazione termica subita dalle tubazioni. Alcuni esempi sono i compensatori a lira (o a omega) utilizzati negli oleodotti.



Giunto di dilatazione di un ponte metallico



Giunto di dilatazione di una rotaia



Compensatore di dilatazione a omega

PLUS



Fisica e... materiali: Le lamine bimetalliche

tabella 2 Coefficienti di dilatazione termica volumica

Sostanza	β (K^{-1})
Etere	$1,51 \cdot 10^{-3}$
Alcol	$1,01 \cdot 10^{-3}$
Benzina	$0,95 \cdot 10^{-3}$
Olio d'oliva	$0,68 \cdot 10^{-3}$
Acqua	$0,21 \cdot 10^{-3}$
Mercurio	$0,18 \cdot 10^{-3}$

La dilatazione volumica

Poiché la lunghezza di un oggetto varia con la temperatura, anche l'area e il volume dell'oggetto varieranno con la temperatura. Consideriamo in particolare la dilatazione termica dei volumi.

La dilatazione volumica segue una legge simile a quella della dilatazione lineare: la variazione del volume ΔV è direttamente proporzionale al volume iniziale V_0 e alla variazione di temperatura ΔT . La costante di proporzionalità, che indichiamo con β , è detta **coefficiente di dilatazione volumica**.

Legge della dilatazione termica volumica

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

Nel SI il coefficiente di dilatazione volumica β si misura in K^{-1} .

Nella tabella 2 sono riportati i valori di β per alcune sostanze.

Il coefficiente di dilatazione lineare α e il coefficiente di dilatazione volumica β sono legati dalla relazione $\beta = 3\alpha$.

Problem solving 1



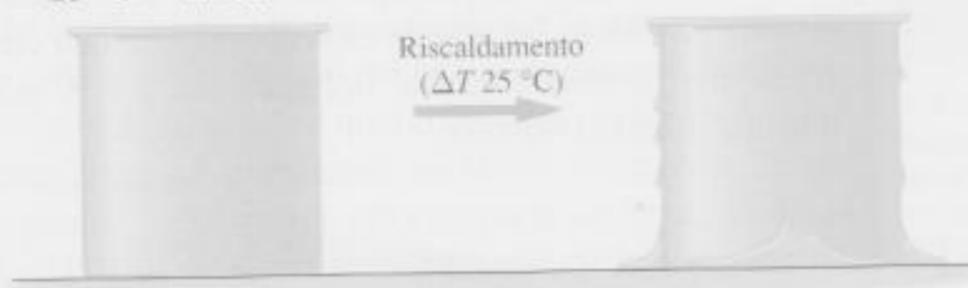
Non riempirlo troppo!

Un contenitore di rame con un volume di 150 cm^3 è riempito fino al bordo di olio di oliva. Se la temperatura del sistema (contenitore + olio) aumenta da 6°C a 31°C , quanto olio fuoriesce dal contenitore?

Descrizione del problema

La figura mostra il contenitore inizialmente pieno fino all'orlo e il contenitore con l'olio che fuoriesce quando viene riscaldato.

Osserviamo che, poiché i gradi hanno la stessa ampiezza nella scala Celsius e nella scala Kelvin, possiamo scrivere $\Delta T = 25^\circ\text{C} = 25 \text{ K}$.



Strategia

Quando riscaldiamo il sistema, sia il contenitore sia l'olio d'oliva si dilatano. Iniziamo perciò calcolando la dilatazione dell'olio e del contenitore separatamente.

Dalle tabelle 1 e 2 possiamo dedurre che l'olio d'oliva si dilata più del rame; è proprio la differenza nella dilatazione termica che determina la fuoriuscita dell'olio. Per il rame leggiamo il valore di α nella tabella 1, da cui ricaviamo β mediante la relazione $\beta = 3\alpha$.

Soluzione

Calcoliamo la variazione di volume dell'olio d'oliva ($\beta = 0,68 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$):

$$\Delta V_{\text{olio}} = \beta V_0 \Delta T = (0,68 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1})(150 \text{ cm}^3)(25 \text{ K}) = 2,6 \text{ cm}^3$$

Calcoliamo la variazione di volume del contenitore ($\alpha = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$):

$$\Delta V_{\text{cont}} = 3\alpha V_0 \Delta T = 3(1,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1})(150 \text{ cm}^3)(25 \text{ K}) = 0,19 \text{ cm}^3$$

Calcoliamo la differenza tra le due espansioni, che corrisponde al volume dell'olio che fuoriesce:

$$\Delta V_{\text{olio}} - \Delta V_{\text{cont}} = 2,6 \text{ cm}^3 - 0,19 \text{ cm}^3 = 2,4 \text{ cm}^3$$

Osservazioni



REAL PHYSICS

- Perché quando fai benzina l'erogatore si blocca prima che il serbatoio sia completamente pieno?



Questo problema spiega il motivo per cui i serbatoi delle automobili sono progettati per arrestare il riempimento prima che il carburante raggiunga il bordo; se non fosse così, in una giornata calda il carburante potrebbe traboccare.

Prova tu

Supponi che il contenitore di rame sia inizialmente riempito fino all'orlo di benzina, invece che di olio d'oliva. Facendo riferimento alla tabella 2, ti aspetti che la quantità di liquido che fuoriesce con la stessa variazione di temperatura sia maggiore, minore o uguale a quella calcolata per l'olio d'oliva? Calcola il volume di benzina che trabocca per un aumento di temperatura di 25°C .

[trabocca più liquido; $\Delta V = 3,4 \text{ cm}^3$]



↑ Gli iceberg galleggiano perché il ghiaccio è meno denso dell'acqua.

Il comportamento dell'acqua

Come abbiamo detto, l'acqua presenta un comportamento molto diverso da quello di tutte le altre sostanze. Abbiamo già visto che la forma solida dell'acqua (ghiaccio) è meno densa della sua forma liquida. È per questo motivo che gli iceberg galleggiano. Soffermiamoci ora sul comportamento *termico* dell'acqua.

Nella figura 4a è riportato un grafico che mostra come varia la densità dell'acqua al variare della temperatura. Osserviamo che, come per le altre sostanze, la densità diminuisce al crescere della temperatura, poiché il volume aumenta.

In realtà, se ingrandiamo il primo tratto dal grafico, come mostrato nella figura 4b, vediamo che l'acqua, in questo intervallo di temperatura, si comporta in modo diverso. Infatti la densità aumenta quando l'acqua viene riscaldata da 0 °C a 4 °C; la massima densità dell'acqua si ha a una temperatura prossima a 4 °C.

Perciò, se *riscaldiamo* l'acqua da 0 °C a 4 °C, essa si *contrae* invece di espandersi e diventa *più densa*, perché le molecole dell'acqua che a 0 °C erano parte della struttura cristallina "piuttosto aperta" del ghiaccio, a 4 °C possono impacchettarsi più vicine le une alle altre nel liquido.

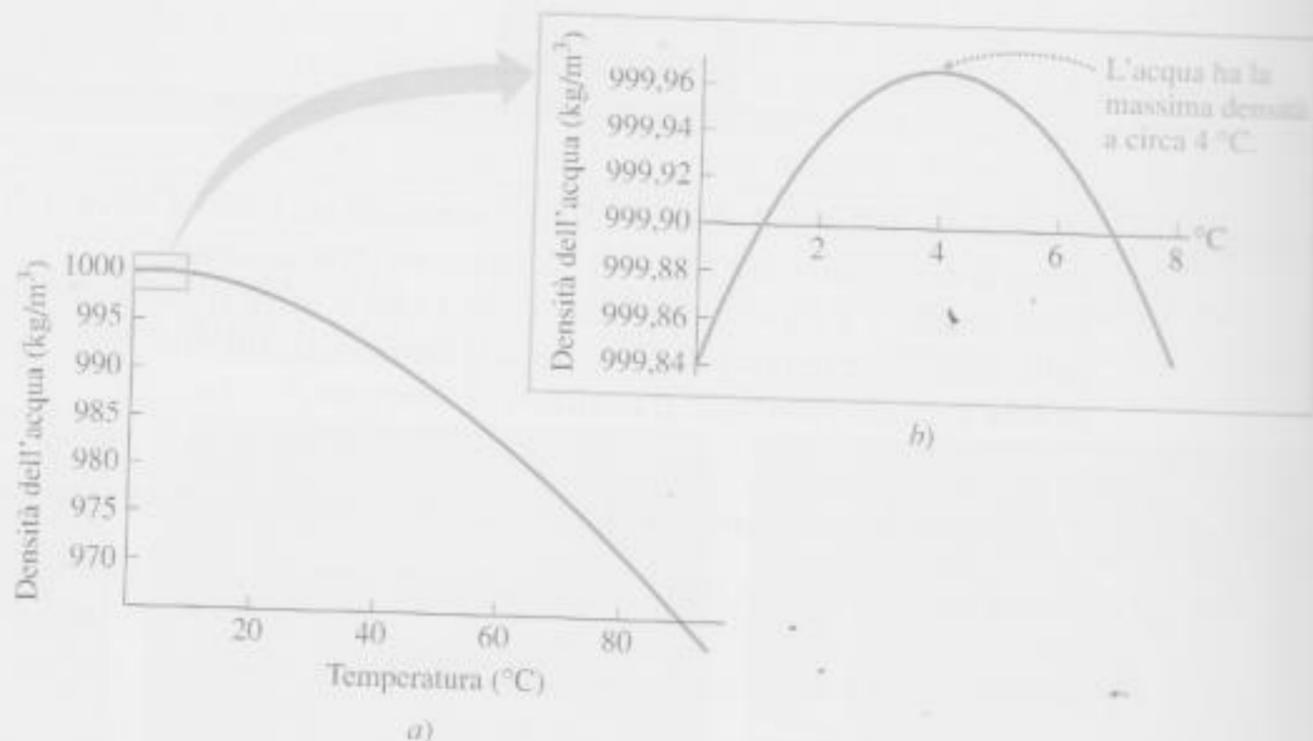


figura 4

Il comportamento termico particolare dell'acqua



REAL PHYSICS

- Perché l'acqua di un lago congela prima in superficie?

Questo comportamento particolare dell'acqua ha conseguenze significative per l'ecologia dei laghi alle latitudini settentrionali: quando in inverno le temperature si abbassano, le acque superficiali di un lago si raffreddano più rapidamente di quelle sottostanti e vanno a fondo, consentendo all'acqua più calda di salire alla superficie per essere a sua volta raffreddata. Alla fine del processo, nel lago tutta l'acqua sarà a 4 °C. Un ulteriore abbassamento della temperatura comporta un raffreddamento dell'acqua meno densa vicino alla superficie, che galleggia fino al congelamento. Perciò, l'acqua dei laghi congela prima sulla superficie superiore, lasciando l'acqua sul fondo alla temperatura relativamente calda di 4 °C. Inoltre, il ghiaccio e la neve sulla superficie del lago agiscono come isolante termico, rallentando la formazione ulteriore di ghiaccio.



REAL PHYSICS

- Perché le tubazioni dell'acqua possono rompersi a causa del gelo?



Lo stesso fenomeno fisico è responsabile del danneggiamento delle tubazioni dell'acqua in inverno: anche se un tubo è fatto di acciaio, spesso non è abbastanza forte da resistere quando il ghiaccio che si forma al suo interno si espande a causa di un forte abbassamento della temperatura.

4. Calore e lavoro meccanico

Sappiamo che il calore è l'energia trasferita da un oggetto a un altro. Dobbiamo quindi tenere conto di questa forma di energia quando applichiamo la *legge di conservazione dell'energia totale*. Ad esempio, sfregando una carta vetrata su un pezzo di legno, compiamo un lavoro al quale è associata una certa energia; tale energia non viene persa, ma produce un aumento di temperatura. Se teniamo conto dell'energia associata alla variazione di temperatura, possiamo verificare che nel processo l'energia si è effettivamente conservata. In effetti, nessun esperimento ha mai scoperto situazioni nelle quali l'energia non sia conservata.

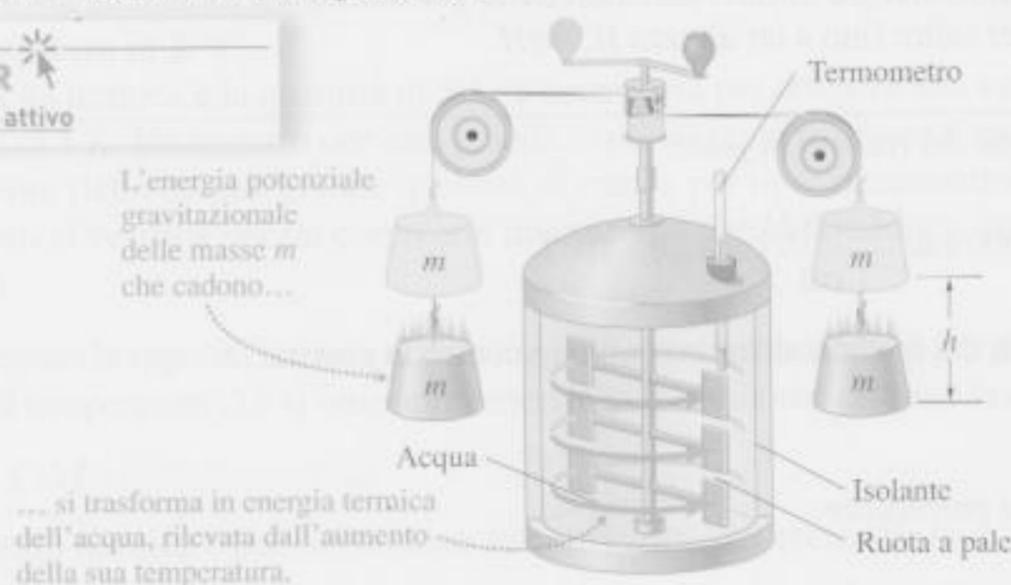


↑ Sfregando la carta vetrata sul legno si compie lavoro; l'energia prodotta non viene persa, ma si trasforma in calore che produce un aumento di temperatura.

Equivalenza tra lavoro e calore

L'equivalenza tra lavoro e calore fu esplorata quantitativamente per la prima volta dal fisico inglese James Prescott Joule (1818-1889). In uno dei suoi esperimenti, Joule studiò l'aumento di temperatura in uno strumento simile a quello mostrato in figura 5, dove una massa totale $2m$ cade da una certa altezza h , compiendo un lavoro meccanico $2mgh$. Mentre cade, la massa fa girare le palette nell'acqua e ciò comporta un lieve riscaldamento di quest'ultima. Misurando il lavoro meccanico e l'aumento della temperatura dell'acqua ΔT , Joule poté dimostrare che l'energia effettivamente si conservava: l'energia potenziale gravitazionale era convertita in aumento dell'energia dell'acqua, come indicato dall'aumento di temperatura.

TUTOR
Disegno attivo



PLUS
Laboratorio - Equivalenza tra calore e lavoro: il mulinello di Joule

figura 5

L'equivalente meccanico del calore
Un dispositivo di questo genere fu utilizzato da James Joule per misurare l'equivalente meccanico del calore.

Prima del lavoro di Joule, il calore era misurato con un'unità chiamata **caloria (cal)**. Una caloria è definita come la quantità di calore necessario per innalzare la temperatura di un grammo d'acqua da $14,5\text{ }^\circ\text{C}$ a $15,5\text{ }^\circ\text{C}$. Con i suoi esperimenti, Joule riuscì a dimostrare che 1 cal è equivalente a 4,186 J di lavoro meccanico. Questo valore è noto come **equivalente meccanico del calore**:

Equivalente meccanico del calore

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

Se leggiamo le indicazioni nutrizionali sulle etichette degli alimenti, possiamo osservare che sono spesso utilizzate le *kilocalorie*, kcal ($1 \text{ kcal} = 1 \text{ Cal} = 10^3 \text{ cal}$). Il fabbisogno energetico medio di una persona adulta è in genere indicato intorno a 1800 - 2000 kcal.

D'ora in poi, utilizzeremo il simbolo Q per indicare il calore, quindi:

Calore Q

Q = Energia trasferita a causa di una differenza di temperatura

Nel SI il calore si misura in joule (J).

Utilizzando l'equivalente meccanico del calore come fattore di conversione, potremo esprimere il calore sia in joule sia in calorie.

5. Capacità termica e calore specifico

Nel paragrafo precedente abbiamo detto che sono necessari 4,186 J di calore per aumentare di 1 °C la temperatura di 1 g di acqua. È importante precisare che si tratta di acqua, perché la quantità di calore richiesta varia considerevolmente da una sostanza all'altra. Ad esempio, occorrono solo 0,128 J di calore per aumentare di 1 °C la temperatura di 1 g di piombo.

La relazione tra la quantità di calore fornita a un corpo e la sua variazione di temperatura coinvolge due grandezze, la **capacità termica** e il **calore specifico**.

La capacità termica

Supponiamo di fornire il calore Q a un dato oggetto e supponiamo che conseguentemente la sua temperatura aumenti di ΔT . La **capacità termica** C dell'oggetto è definita nel seguente modo:

Capacità termica, C

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Nel SI la capacità termica si misura in joule/kelvin (J/K).

Poiché la variazione di temperatura è la stessa in K o °C, la capacità termica può anche essere espressa in J/°C.

La capacità termica è la quantità di calore necessaria per ottenere una variazione di temperatura di 1 K. Un oggetto con una grande capacità termica, come l'acqua contenuta in un secchio, richiede una grande quantità di calore per ogni incremento di temperatura. L'opposto si verifica per un corpo con una piccola capacità termica, come un pezzo di piombo.

Se si conosce la capacità termica C di un oggetto, il calore necessario per produrre un incremento di temperatura ΔT si ottiene invertendo la formula che esprime la capacità termica:

$$Q = C\Delta T$$

La capacità termica è per definizione *sempre positiva*. Perciò (fig.6):

- Q è **positivo** se ΔT è positivo, cioè se *si fornisce calore al sistema*;
- Q è **negativo** se ΔT è negativo, cioè se *il sistema cede calore*.

ESERCIZIO

3. La capacità termica di 1 kg d'acqua è 4186 J/K. Calcola la variazione di temperatura dell'acqua se:

- a) vengono forniti al sistema 505 J di calore;
- b) vengono sottratti al sistema 1010 J di calore.

Dalla relazione $Q = C\Delta T$ ricaviamo la variazione della temperatura $\Delta T = \frac{Q}{C}$.
Applicando questa formula, otteniamo:

$$a) \Delta T = \frac{Q}{C} = \frac{505 \text{ J}}{4186 \text{ J/K}} = 0,121 \text{ K}$$

$$b) \Delta T = \frac{Q}{C} = \frac{-1010 \text{ J}}{4186 \text{ J/K}} = -0,241 \text{ K}$$

Osserviamo che, in questo caso, il calore è ceduto, quindi ha segno negativo.

PLUS
Laboratorio Il calore specifico di diverse sostanze



figura 6
Convenzione per il segno del calore

tabella 3 Calori specifici a temperatura atmosferica

Sostanza	c (J/(kg · K))
Acqua	4186
Ghiaccio	2090
Vapore	2010
Berillio	1820
Aria	1004
Alluminio	900
Vetro	837
Silicio	703
Ferro	448
Rame	387
Argento	234
Oro	129
Piombo	128

Il calore specifico

Poiché sono necessari 4186 J per aumentare di 1 °C la temperatura di 1 kg d'acqua, ce ne vorrà il doppio per aumentare di 1 °C la temperatura di 2 kg d'acqua, e così via. La capacità termica dipende dunque non solo dal tipo di sostanza, ma anche della sua massa. Conviene allora definire una nuova grandezza, il **calore specifico** c , che è la capacità termica di una sostanza per unità di massa:

Calore specifico, c

$$c = \frac{C}{m}$$

Nel SI il calore specifico si misura in joule/(kilogrammi · kelvin), (J/(kg · K)).

Il calore specifico *dipende solo dal tipo di sostanza* e non dalla sua massa.

Ad esempio, il calore specifico dell'acqua è $c_{\text{acqua}} = 4186 \text{ J/(kg · K)}$.

Nella tabella 3 sono riportati i calori specifici di alcune sostanze.

La legge fondamentale della termologia

Combinando la relazione $Q = C\Delta T$ e la definizione di calore specifico $c = \frac{C}{m}$ otteniamo:

$$Q = C\Delta T = mc\Delta T$$

e possiamo scrivere la cosiddetta **legge fondamentale della termologia**:

Legge fondamentale della termologia

Il calore Q necessario per far aumentare la temperatura di un corpo è direttamente proporzionale alla variazione di temperatura ΔT , alla massa m del corpo e al calore specifico c della sostanza di cui è fatto il corpo:

$$Q = mc\Delta T$$

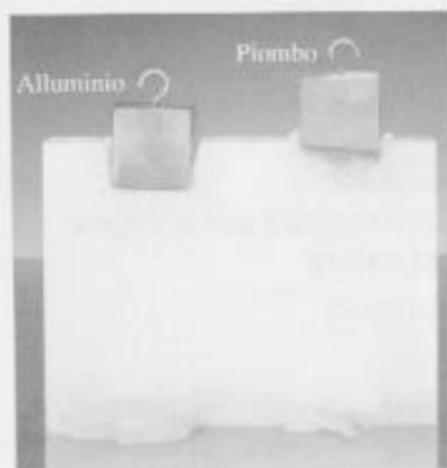


figura 7
Calore ceduto da due blocchi di metallo

Maggiore è il calore specifico, maggiore è la quantità di calore che dobbiamo fornire all'unità di massa di una certa sostanza per produrre un dato aumento di temperatura. Consideriamo ad esempio l'esperienza mostrata in figura 7. I due blocchi di metallo, alluminio e piombo, hanno lo stesso volume e sono stati riscaldati alla stessa temperatura, prima di essere posti su un blocco di paraffina. Osserviamo che l'alluminio scioglie una quantità maggiore di paraffina, poiché cede una quantità di calore maggiore di quella ceduta dal blocco di piombo, anche se quest'ultimo è quattro volte più pesante di quello di alluminio. La ragione di questo comportamento sta nel fatto che il piombo ha un calore specifico circa sette volte inferiore a quello dell'alluminio.

Osservando la tabella 3, notiamo che il calore specifico dell'acqua è di gran lunga superiore a quello di qualsiasi altra sostanza comune. Avendo un così grande calore specifico, l'acqua può cedere o acquistare calore cambiando di poco la propria temperatura. È questa la ragione per cui, se prendiamo un pezzo di torta appena sfornata, è più facile che ci bruciamo la lingua con la frutta di cui essa è farcita (che ha un contenuto d'acqua maggiore), piuttosto che con la crosta che è più asciutta.

✈ L'elevato calore specifico dell'acqua è anche responsabile dei climi moderati che si hanno nelle regioni vicine a grandi bacini d'acqua: l'enorme massa e il grande calore specifico di un oceano concorrono a mantenere quasi costante la temperatura dell'acqua, che a sua volta agisce per mantenere temperato il clima delle aree costiere circostanti. Così le regioni costiere godono dell'effetto moderatore del mare, grazie alle brezze che soffiano verso terra, mentre nelle regioni continentali le variazioni di temperatura sono normalmente più marcate, perché la terra (che ha un calore specifico relativamente piccolo) si scalda velocemente d'estate e si raffredda velocemente d'inverno. ✈

REAL PHYSICS
Perché i grandi bacini d'acqua influiscono sul clima delle zone circostanti?

Calorimetria

Utilizziamo ora la legge fondamentale della termologia per risolvere un problema pratico. Supponiamo che un blocco di massa m_b , calore specifico c_b e temperatura iniziale T_b venga inserito in un **calorimetro**, cioè in un contenitore isolato riempito con acqua. L'acqua ha massa m_a , calore specifico c_a e temperatura iniziale T_a . Supponiamo, inoltre, che la massa del calorimetro sia trascurabile e che non ci siano trasferimenti di calore dal calorimetro verso l'esterno.

Vogliamo determinare la temperatura finale del sistema blocco + acqua.

La soluzione di questo problema si basa su due principi:

- la temperatura finale del blocco e dell'acqua sono uguali, poiché il sistema raggiunge l'equilibrio termico;
- l'energia totale del sistema si conserva, cioè la quantità di calore ceduta dal blocco è uguale a quella acquistata dall'acqua, o viceversa, se la temperatura iniziale dell'acqua è più alta.

Usando la legge della termologia e indicando con T_{eq} la temperatura finale, possiamo scrivere la quantità di calore Q_{acqua} acquistata dall'acqua (*positiva*):

$$Q_{acqua} = m_a c_a (T_{eq} - T_a)$$

e la quantità di calore Q_{blocco} ceduta dal blocco (*negativa*):

$$Q_{blocco} = m_b c_b (T_{eq} - T_b)$$

Uguagliando la quantità di calore assorbita e ceduta:

$$Q_{acqua} = -Q_{blocco} \rightarrow m_a c_a (T_{eq} - T_a) = m_b c_b (T_b - T_{eq})$$

si può calcolare la temperatura di equilibrio T_{eq} del sistema acqua + blocco.

ESERCIZIO

4. Poni un blocco di metallo di 500 g con una temperatura iniziale di 54,5 °C in un recipiente contenente 1100 g di acqua alla temperatura di 20,0 °C. Se la temperatura finale del sistema blocco + acqua è di 21,4 °C, qual è il calore specifico del metallo? Supponi che il recipiente possa essere ignorato e che non ci sia scambio di calore con l'ambiente circostante.

Scriviamo l'espressione relativa al flusso di calore uscente dal blocco:

$$Q_{blocco} = m_b c_b (T_{eq} - T_b) \quad Q_{blocco} \text{ è negativo, poiché } T_{eq} < T_b$$

Scriviamo l'espressione relativa al flusso di calore entrante nell'acqua:

$$Q_{acqua} = m_a c_a (T_{eq} - T_a) \quad Q_{acqua} \text{ è positivo, poiché } T_{eq} > T_a$$

Poniamo $Q_{blocco} = -Q_{acqua}$:

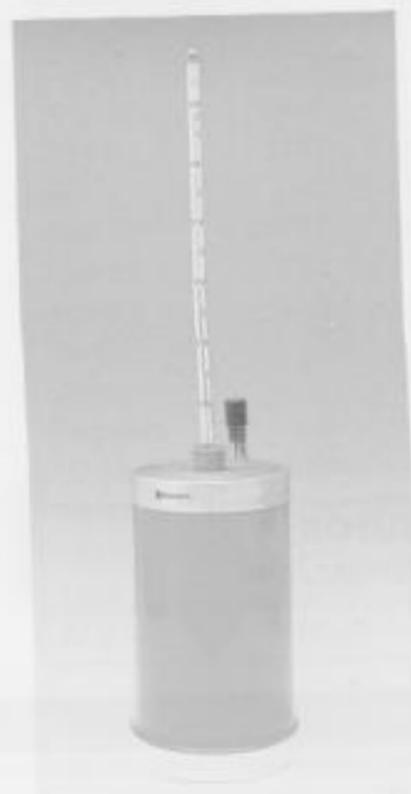
$$m_b c_b (T_{eq} - T_b) = -m_a c_a (T_{eq} - T_a)$$

Risolviamo rispetto al calore specifico c_b del blocco:

$$c_b = \frac{m_a c_a (T_{eq} - T_a)}{m_b (T_{eq} - T_b)} = \frac{m_a c_a (T_{eq} - T_a)}{m_b (T_b - T_{eq})}$$

Sostituiamo i valori numerici:

$$c_b = \frac{(1,100 \text{ kg})[4186 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})](21,4 \text{ °C} - 20,0 \text{ °C})}{(0,500 \text{ kg})(54,5 \text{ °C} - 21,4 \text{ °C})} = 390 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$



↑ Il calorimetro è uno strumento che misura la quantità di calore che si scambia tra corpi. È un contenitore isolato, riempito d'acqua, in cui è inserito un termometro.



6. La propagazione del calore

Il calore può essere scambiato in vari modi. Il Sole, ad esempio, riscalda la Terra da 150 milioni di chilometri di distanza, attraverso uno spazio vuoto, con un processo noto come **irraggiamento**. Quando la luce del Sole colpisce il suolo e fa aumentare la sua temperatura, l'aria a contatto con il suolo diventa più calda e comincia a salire, producendo un ulteriore scambio di calore attraverso un processo noto come **convezione**. Infine, se cammini a piedi nudi sul suolo senti sui piedi l'effetto del calore che entra nel tuo corpo attraverso il processo della **conduzione** (fig. 8).

In questo paragrafo affronteremo in dettaglio ognuno di questi tre meccanismi di trasmissione del calore.



TUTOR
Disegno attivo

Figura 8

Meccanismi di trasmissione del calore

Conduzione

Una delle forme più familiari di scambio di calore è la **conduzione**, ovvero il flusso di calore che avviene direttamente attraverso un materiale.

Se teniamo in mano l'estremità di una sbarra metallica e poniamo l'altra estremità sul fuoco, ci accorgiamo che dopo poco tempo inizia a riscaldarsi anche l'estremità che abbiamo in mano. Il calore che percepiamo viene trasportato lungo la sbarra per conduzione.

Se ripetiamo l'esperimento con una sbarra di legno, l'estremità calda della sbarra probabilmente prenderà fuoco, ma l'estremità che teniamo in mano rimarrà abbastanza fresca. La conduzione dipende dunque dal tipo di materiale coinvolto: alcuni materiali conducono bene il calore, mentre altri sono cattivi conduttori e sono chiamati *isolanti*.

In quale misura il calore viene trasmesso per effetto della conduzione?

Per rispondere a questa domanda consideriamo il semplice sistema mostrato nella figura 9, in cui una sbarra di lunghezza L e sezione di area A ha un estremo alla temperatura T_1 e l'altro alla temperatura $T_2 > T_1$.

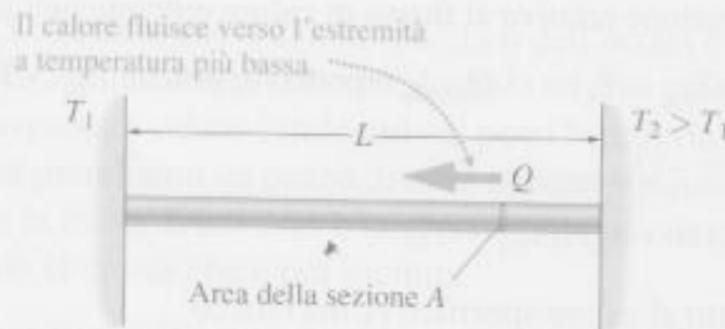


Figura 9

Conduzione di calore attraverso una sbarra

La quantità di calore che attraversa nell'unità di tempo una sbarra di lunghezza L e sezione A è direttamente proporzionale a ΔT e ad A e inversamente proporzionale a L .

Sperimentalmente si dimostra che la quantità di calore Q che fluisce attraverso la sbarra:

- *aumenta* proporzionalmente all'area A della sezione della sbarra;
- *aumenta* proporzionalmente alla differenza delle temperature fra le due estremità $\Delta T = T_2 - T_1$;
- *aumenta* costantemente con il tempo t ;
- *diminuisce* con la lunghezza della sbarra L .

Combinando queste osservazioni, otteniamo la **legge della conduzione termica**, che prende il nome dal matematico francese Joseph Fourier (1768-1830):

Legge di Fourier della conduzione termica

$$Q = kA \left(\frac{\Delta T}{L} \right) t$$

La costante k è detta **conduttività** (o **conducibilità**) **termica** della sbarra e nel SI si misura in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, dove $1 \text{ W} = 1 \text{ J}/1 \text{ s}$. La conduttività termica varia da materiale a materiale, come indicato nella tabella 4.

Dalla tabella possiamo osservare che i valori più alti di conduttività sono quelli dell'argento e del rame; tutti i metalli, in genere, sono buoni conduttori di calore.

tabella 4 Conduttività termica

Sostanza	k [W/(m · K)]
Argento	417
Rame	395
Oro	291
Alluminio	217
Piombo	34,2
Acciaio	16,3
inox	
Ghiaccio	1,5
Cemento	1,3
Vetro	0,84
Acqua	0,60
Legno	0,10
Lana	0,040
Aria	0,0234

Problem solving 3



Quanto isola il vetro?

La finestra di una casa ha la forma di un quadrato di lato 1,0 m. Il vetro della finestra ha spessore 0,50 cm. Quanto calore viene dissipato attraverso la finestra in un giorno, se la temperatura interna della casa è 21,0 °C e quella esterna 0,0 °C?

Descrizione del problema

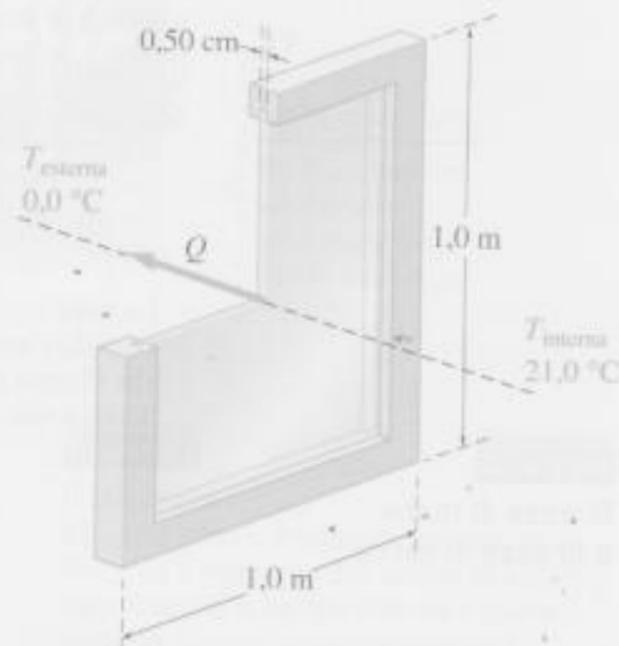
Nella figura è mostrata una sezione della finestra con le dimensioni e i valori delle temperature interne e esterne. Il calore si trasferisce dalla zona a 21,0 °C a quella a 0,0 °C.

Strategia

Il flusso di calore è dato dalla relazione $Q = kA \left(\frac{\Delta T}{L} \right) t$.

Osserviamo che l'area della superficie attraversata dal calore è $(1,0 \text{ m})^2$ e che la lunghezza del percorso fatto dal calore è lo spessore del vetro, $L = 0,0050 \text{ m}$.

La differenza tra le temperature è $21 \text{ °C} = 21 \text{ K}$ e la conduttività del vetro (vedi tabella 4) è $0,84 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ricordiamo che $1 \text{ W} = 1 \text{ J}/1 \text{ s}$.



Soluzione

Calcoliamo il flusso di calore per un dato tempo t :

$$Q = kA \left(\frac{\Delta T}{L} \right) t = [0,84 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})](1,0 \text{ m})^2 \left(\frac{21 \text{ K}}{0,0050 \text{ m}} \right) t = (3,5 \cdot 10^3 \text{ W})t$$

Sostituiamo a t il numero di secondi in un giorno, cioè 86400:

$$Q = (3500 \text{ W})t = (3,5 \cdot 10^3 \text{ W})(86400 \text{ s}) = 3,0 \cdot 10^8 \text{ J}$$

Osservazioni

Il valore che abbiamo determinato per Q rappresenta una considerevole quantità di calore, equivalente circa all'energia sviluppata bruciando 3,5 litri di benzina. Si possono ridurre le perdite di calore utilizzando i doppi vetri, costituiti da due vetri affiancati e separati da uno strato di aria isolante.

Prova tu

Supponi di sostituire la finestra con un pannello di argento. Quale spessore dovrebbe avere il pannello per avere lo stesso flusso di calore giornaliero del vetro?

[$L = 2,5 \text{ m}$]

REAL PHYSICS

- La convezione è alla base del fenomeno delle brezze che si formano nelle zone costiere

TUTOR

Disegno attivo

Convezione

Supponiamo di voler riscaldare una piccola stanza con una stufetta elettrica. Quando la resistenza elettrica diventa incandescente, riscalda l'aria nelle sue vicinanze e, a mano a mano che l'aria si scalda, si espande e diventa meno densa. A causa di questa minore densità, l'aria calda sale ed è rimpiazzata dall'aria fredda più densa che si trovava più in alto. Si mette così in moto un flusso circolare di aria che trasporta calore dalla resistenza della stufa all'aria dell'intera stanza. Uno scambio di calore di questo tipo viene chiamato **convezione**.

La convezione è la modalità di propagazione del calore *tipica dei fluidi*, cioè dei liquidi e dei gas. Quando un fluido viene mescolato in esso si determinano dei *flussi convettivi*, cioè movimenti fisici di materia che trasportano calore attraverso il sistema.

Il fenomeno della convezione avviene su un ampio intervallo di scale. La formazione, nelle zone costiere, della brezza di mare durante il giorno e della brezza di terra durante la notte ne è un esempio. Questo effetto è illustrato nella figura 10.

La terra ha un calore specifico più basso di quello dell'acqua, perciò si scalda più rapidamente durante il giorno e si raffredda più rapidamente di notte. La differenza di temperatura determina quindi flussi convettivi di aria (le brezze) che hanno direzioni diverse.

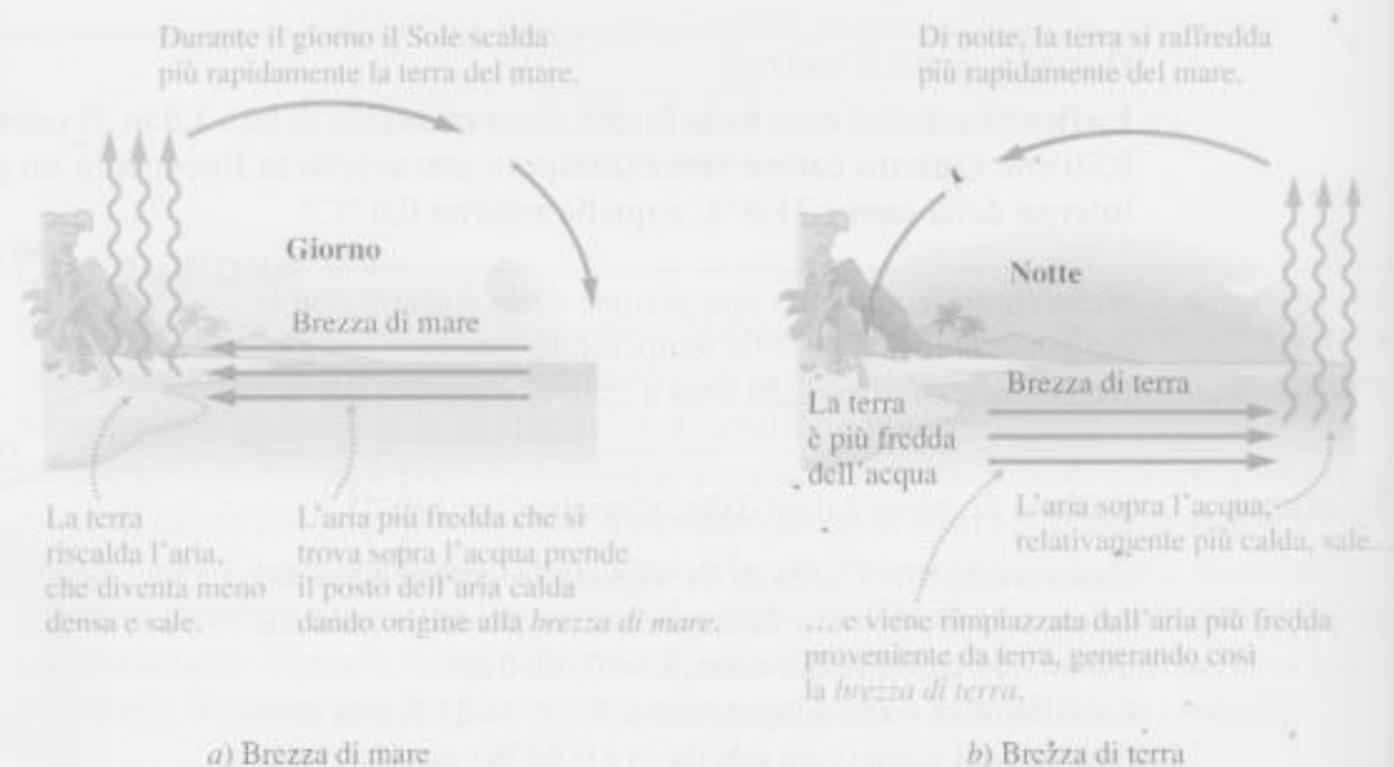


figura 10

Brezze di mare
e brezze di terra

↑ La lava vulcanica rosso incandescente è abbastanza calda (circa 1000 °C) da irradiare nel campo visibile, ma anche quando si raffredda continua a emettere energia sotto forma di radiazione infrarossa invisibile.

Irraggiamento

Sebbene la conduzione e la convezione siano le principali modalità di trasmissione del calore in situazioni specifiche, *tutti* i corpi emettono una certa quantità di energia per **irraggiamento**. L'energia è irradiata da un corpo sotto forma di *onde elettromagnetiche*, che comprendono sia la luce visibile sia la radiazione ultravioletta e infrarossa.

Diversamente dalla conduzione e dalla convezione, l'irraggiamento non ha bisogno di un mezzo fisico per la trasmissione dell'energia, poiché *le onde elettromagnetiche si possono propagare nel vuoto*. Pertanto, il calore che sentiamo provenire da un camino caldo ci raggiungerebbe anche se improvvisamente venisse tolta l'aria, proprio come l'energia radiante proveniente dal Sole raggiunge la Terra attraverso 150 milioni di chilometri di spazio vuoto!

Sperimentalmente si può verificare che l'energia irradiata nell'unità di tempo da un corpo, cioè la **potenza irradiata** P , è proporzionale all'area A della superficie dalla quale è emessa e dipende dalla quarta potenza della temperatura T^4 , dove T è la temperatura misurata in kelvin.

Questo comportamento è riassunto nella **legge di Stefan-Boltzmann**:

Legge di Stefan-Boltzmann per la potenza irradiata, P

$$P = e\sigma AT^4$$

La costante σ in questa espressione è una *costante fisica fondamentale*, nota come **costante di Stefan-Boltzmann**; il suo valore è:

Costante di Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

L'altra costante che compare nella legge di Stefan-Boltzmann è il **coefficiente di emissione**, o **emittività**, e .

L'emittività è una costante adimensionale che può assumere valori tra 0 e 1 e indica l'efficienza del corpo nell'irradiare energia. Un valore $e = 1$ significa che il corpo è un *radiatore perfetto*. In generale, un oggetto molto scuro ha un'emittività vicina a 1, mentre un corpo molto chiaro ha un'emittività vicina a 0.

Lo stesso valore di emittività e vale sia per l'*emissione* sia per l'*assorbimento di energia*. Perciò un emettitore perfetto ($e = 1$) è anche un assorbitore perfetto. Un corpo di questo tipo viene chiamato **corpo nero**.

Un corpo riflettente ideale non assorbe alcuna radiazione (e quindi ha $e = 0$) e non emette nemmeno energia. Questo è il motivo per cui l'interno di un thermos è altamente riflettente: essendo un riflettente quasi ideale, l'interno del thermos irradia molto poco l'energia contenuta nel liquido caldo. In un thermos c'è anche uno spazio vuoto tra la parete interna e quella esterna, come mostrato in figura 11. Ciò limita il flusso di calore al solo irraggiamento, poiché la convezione e la conduzione non possono avvenire nel vuoto.



figura 11

Il thermos

Il liquido caldo o freddo conservato in un thermos è separato dall'ambiente esterno dal vuoto tra la parete interna e quella esterna. Inoltre, la parete interna è argentata ed è quindi un buon riflettente e, di conseguenza, un cattivo emettitore.



↑ Vestire di nero nel deserto? Effettivamente aiuta, perché un abito nero irradia in maniera più efficiente il calore lontano dal corpo della persona che lo indossa.

REAL PHYSICS
 Perché il thermos mantiene la temperatura del liquido contenuto?

ESERCIZIO

5. Calcola la potenza irradiata da un corpo nero sferico di raggio 5 cm a una temperatura di 355 K.

L'area della sfera è:

$$A = 4\pi r^2 = 3,14 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

L'emittività di un corpo nero è $e = 1$. La potenza irradiata è data dalla formula di Stefan-Boltzmann:

$$P = e\sigma AT^4 = 1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)(3,14 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2)(355 \text{ K})^4 = 28,3 \text{ W}$$