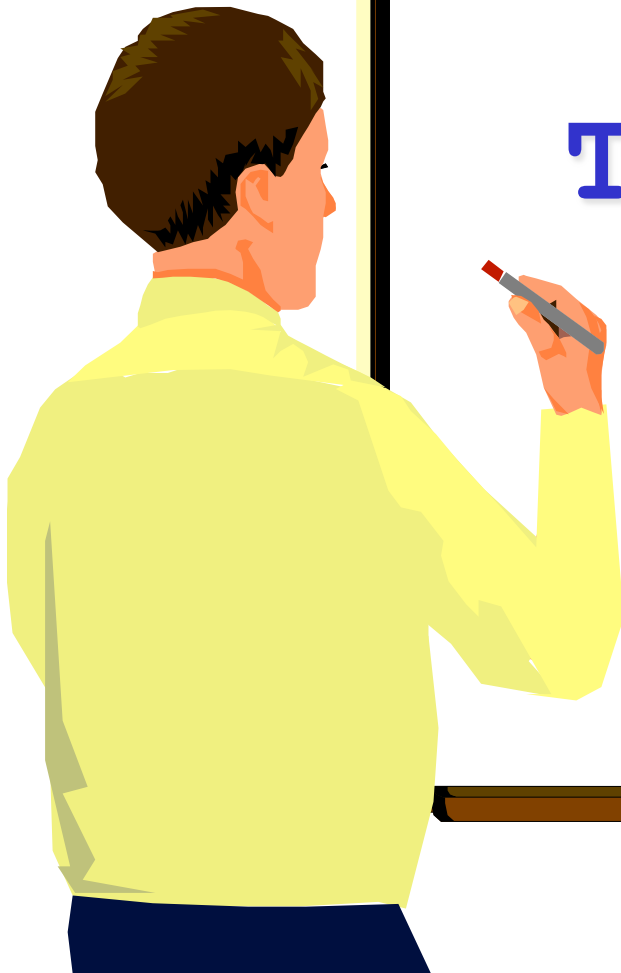


FISICA

Termodinamica

TERMOLOGIA



*Autore: prof. Pappalardo Vincenzo
docente di Matematica e Fisica*

TEMPERATURA ED EQUILIBRIO TERMICO

Tutti i fenomeni termici, come per esempio la dilatazione dei corpi quando sono riscaldati, o anche la liquefazione delle sostanze solide e l'ebollizione dei liquidi conseguente al riscaldamento, derivano dalle proprietà microscopiche della materia: composizione e struttura dei corpi, stato di moto delle molecole che li costituiscono, dalle variazioni di questo stato dovute a scambi energetici con l'ambiente circostante.

Il punto di vista microscopico ci permette di comprendere i meccanismi fondamentali che sono alla base dei fenomeni termici.

I fenomeni termici possono comunque essere descritti in maniera molto soddisfacente introducendo opportune grandezze macroscopiche, fra cui la temperatura.

Definizione

Lo stato termico di un corpo indica se la sostanza ci dà la sensazione fisica di caldo o di freddo.

Definizione

La temperatura è una grandezza fisica scalare associata allo stato termico di un corpo.

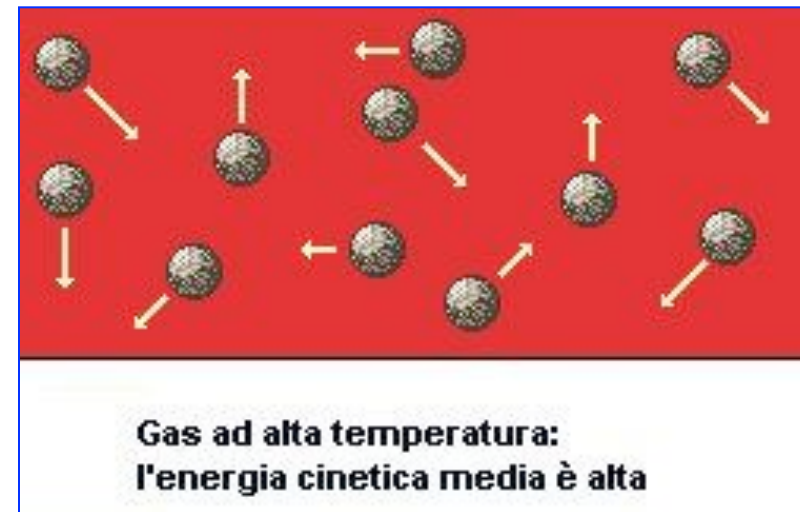
Definizione

Il termometro è uno strumento tarato che serve per misurare, non direttamente, ma attraverso la variazione di certe proprietà fisiche del corpo, la temperatura di un corpo.

La teoria cinetica dei gas (che studieremo in seguito) ci permette di interpretare il concetto di temperatura da un punto di vista microscopico.

La temperatura è la manifestazione macroscopica del moto di agitazione termica delle molecole.

L'energia cinetica delle molecole di un gas è direttamente proporzionale alla temperatura assoluta del gas.



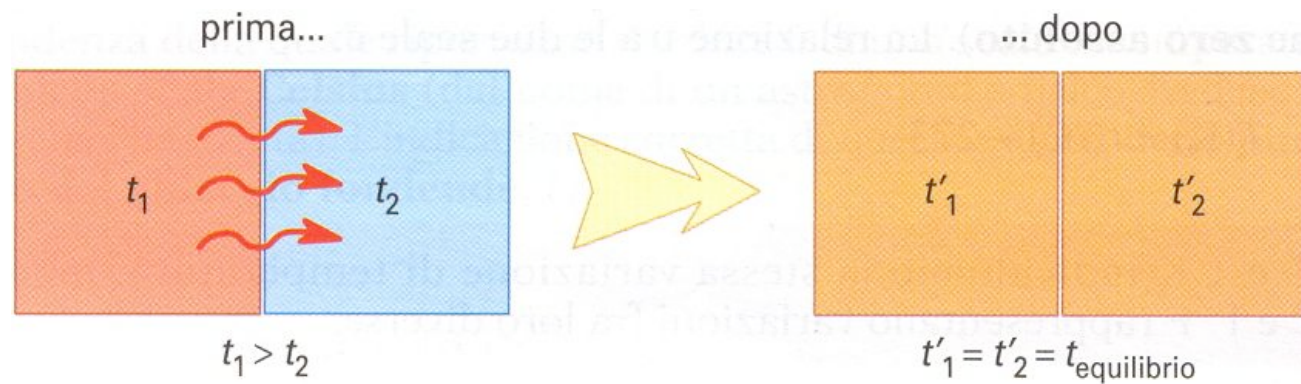
Un termometro non misura mai direttamente la temperatura, ma la variazione di una determinata proprietà fisica della sostanza (*sostanza termometrica*) o del sistema da cui è costituito.

Si sfrutta il principio che, quando cambia la temperatura cambia anche qualche altra proprietà fisica: il volume per un liquido, la pressione (a volume costante) per un gas, la resistenza elettrica di un materiale conduttore, la lunghezza di una sbarra, il colore della luce emessa da un corpo incandescente, ecc.

Le variazioni di tutte queste grandezze possono essere sfruttate per realizzare vari tipi di termometri.

DEFINIZIONE

Due corpi si dicono in *equilibrio termico* quando si trovano nello stato termico, cioè quando hanno la stessa temperatura.



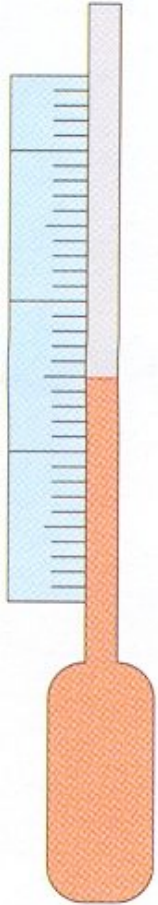
Si osserva sperimentalmente che due corpi qualsiasi, se posti a contatto termico fra loro (scambio energetico), raggiungono, dopo un certo intervallo di tempo, uno stato di equilibrio, detto **equilibrio termico**, nel quale non c'è più passaggio netto di energia dall'uno all'altro.

Allora, possiamo definire operativamente la temperatura come:

La **temperatura** di un corpo è quella grandezza scalare che si misura con un termometro, quando quest'ultimo raggiunge l'equilibrio termico con il corpo.



MISURA DELLA TEMPERATURA



Nel termometro a mercurio, è l'altezza della colonna di mercurio, in seguito alla dilatazione, che varia in funzione della temperatura.

Per misurare la temperatura, dobbiamo conoscere la relazione matematica tra la sostanza termometrica (colonna di mercurio) e la temperatura.

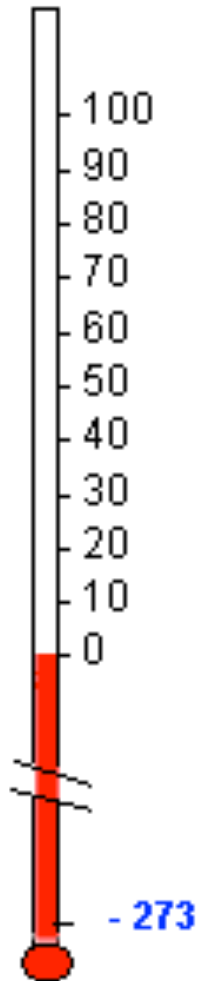
La temperatura e l'altezza della colonna liquida sono direttamente proporzionali.

Ma come si tara un termometro? Ossia, come si associa alla colonna di mercurio una determinata temperatura (scala termometrica)?

Si stabiliscono **due temperature fisse di riferimento**, cioè assegnando valori arbitrari a due temperature facilmente riproducibili: per convenzione sono quelle del **ghiaccio fondente** e dei vapori di **acqua bollente**, entrambe alla pressione di 1 atm.



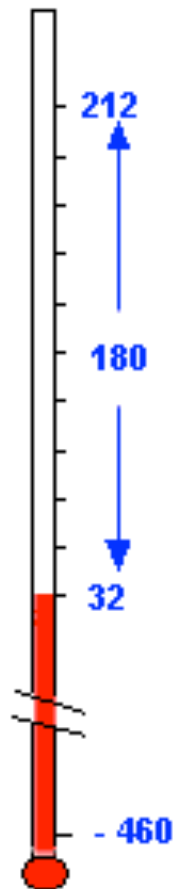
Celsius



Nella **scala Celsius** (proposta dallo svedese *Celsius nel 1742*) si assegna il valore $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alla temperatura del ghiaccio fondente e $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ alla temperatura di ebollizione dell'acqua. L'intervallo fra i due livelli viene poi suddiviso in 100 parti uguali, ciascuna pari 1°C .

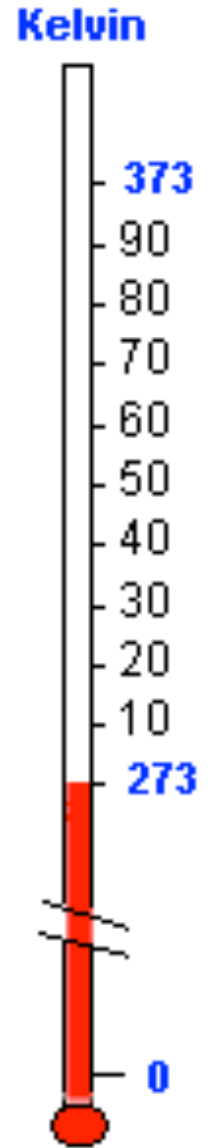
Nella **scala Fahrenheit** si assegna il valore di $32\text{ }^{\circ}\text{F}$ alla temperatura del ghiaccio fondente e quello di $212\text{ }^{\circ}\text{F}$ a quella dei vapori di acqua bollente, in modo da dividere l'intervallo fra i punti fissi in 180 parti uguali.

Fahrenheit



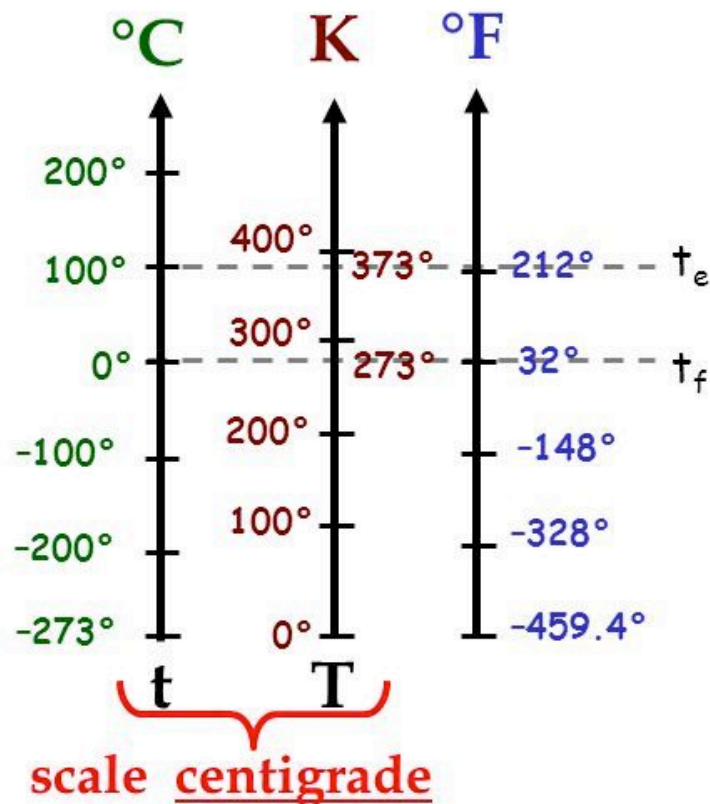
Nel SI, si usa la **scala assoluta**, nella quale l'intervallo di temperatura unitario, il grado kelvin (K), è uguale a un grado Celsius, ma come punto di fusione del ghiaccio viene assunto il valore 273,15 K. Il punto zero della scala assoluta, corrispondente a $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ è chiamato **zero assoluto**, e rappresenta la più bassa temperatura raggiungibile.

La temperatura misurata nella scala assoluta è detta **temperatura assoluta** e si indica con T .



Correlazione tra le scale di temperatura

$$\frac{t(^{\circ}\text{C})}{100} = \frac{t(^{\circ}\text{F}) - 32}{180} = \frac{T(\text{K}) - 273}{100}$$



Scala normale o Celsius °C

0° $\Leftrightarrow$ 100° **H₂O**

Scala Fahrenheit °F

$$t(^{\circ}\text{F}) = 32^{\circ} + \frac{9}{5} t(^{\circ}\text{C})$$

Scala assoluta o Kelvin K

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

Unità di misura del S.I.



$$\Delta T(\text{K}) = \Delta t(^{\circ}\text{C})$$

I termometri fin qui descritti presentano l'inconveniente di dare risultati che dipendono dalla natura del liquido termometrico. *Termometri con sostanze diverse forniscono valori delle temperature che possono avere scarti anche di diversi gradi Celsius.*

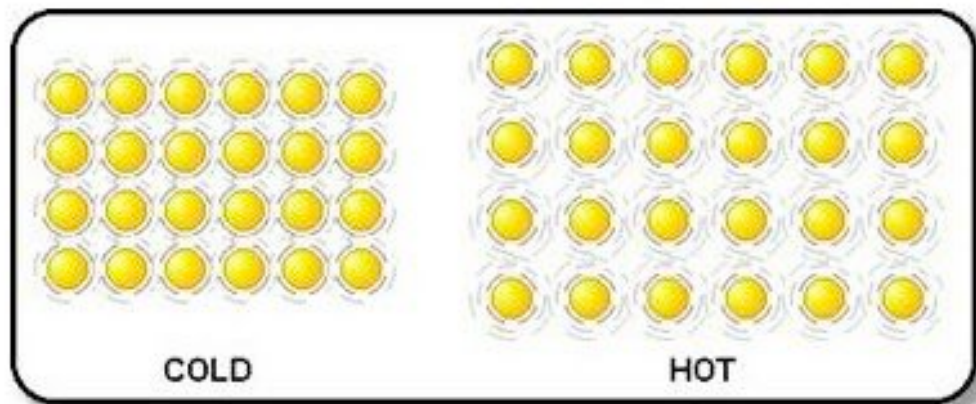
Si può in parte eliminare questo problema, scegliendo come fluido termometrico **i gas perfetti**, che, a differenza dei solidi e dei liquidi, sotto certe condizioni si comportano, con buona approssimazione, in modo identico per variazioni della temperatura.

Pertanto la migliore determinazione operativa della temperatura è quella fornita dal **termometro a gas**, che costituisce uno strumento di riferimento per confrontare, e quindi tarare, tutti gli altri tipi di termometri.

DILATAZIONE TERMICA DEI SOLIDI

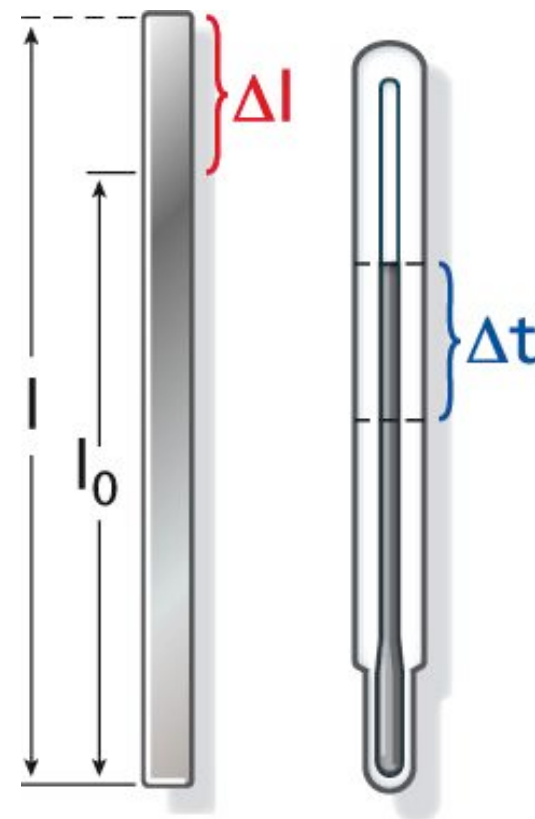
Fra i molti effetti prodotti nella materia da un aumento di temperatura, uno dei principali è rappresentato dal fenomeno della dilatazione termica.

SPIEGAZIONE DEL FENOMENO - Per comprendere qualitativamente il fenomeno della dilatazione termica facciamo riferimento alla struttura della materia. Consideriamo, per esempio, un solido cristallino: ogni innalzamento di temperatura accentua l'ampiezza delle oscillazioni degli atomi intorno alle configurazioni di equilibrio, di conseguenza cresce la distanza media fra le molecole e quindi aumentano anche le dimensioni geometriche del corpo considerato.



Con l'aumentare della temperatura cresce la distanza media fra le molecole e quindi le dimensioni geometriche

Se in una sbarretta metallica la lunghezza è preponderante rispetto alle altre due, l'allungamento provocato dall'aumento di temperatura prende il nome di **dilatazione lineare**.



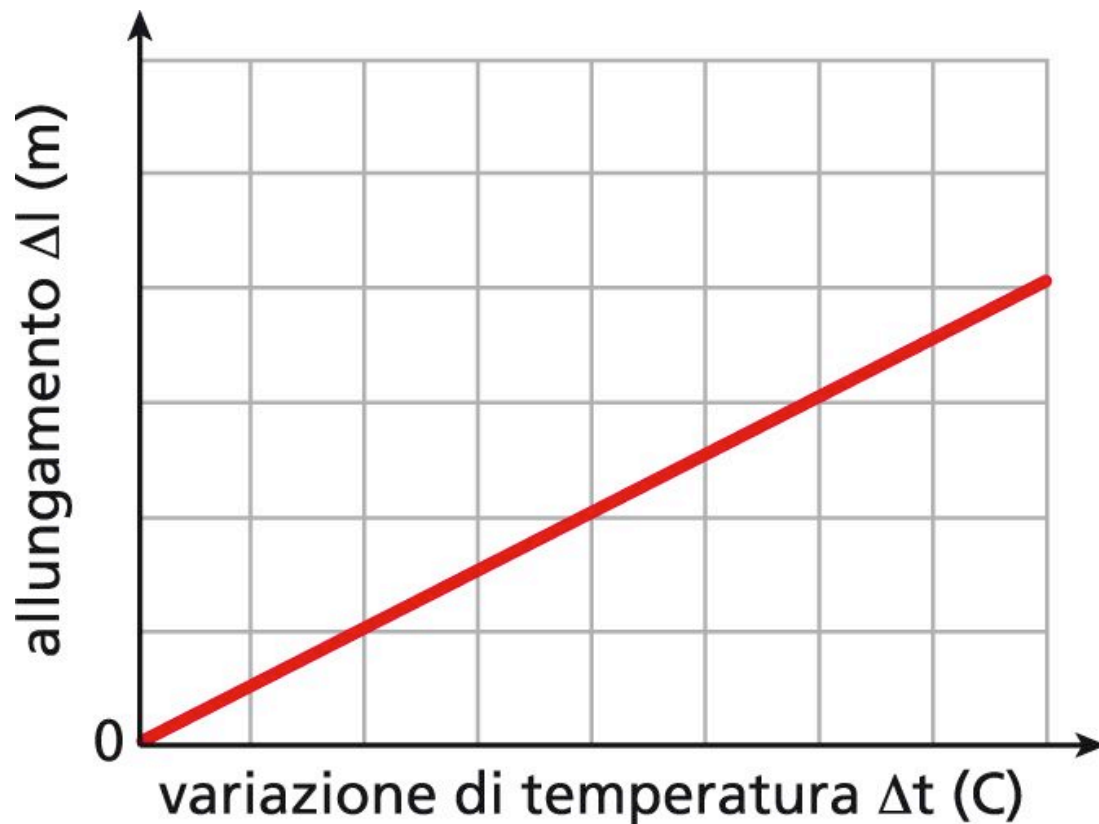
La variazione di lunghezza con la temperatura è espressa con buona approssimazione, se l'incremento di temperatura non è molto ampio, da una relazione lineare:

$$\underbrace{l - l_0}_{\Delta l} = l_0 \lambda \Delta t$$

allungamento (m) ————— lunghezza iniziale (m)
coefficiente di dilatazione lineare ($^{\circ}\text{C}^{-1}$ o K^{-1})
variazione di temperatura ($^{\circ}\text{C}$ o K)

Pertanto, questa legge graficamente sarà rappresentata da una retta di coefficiente angolare $m=l_0\lambda$:

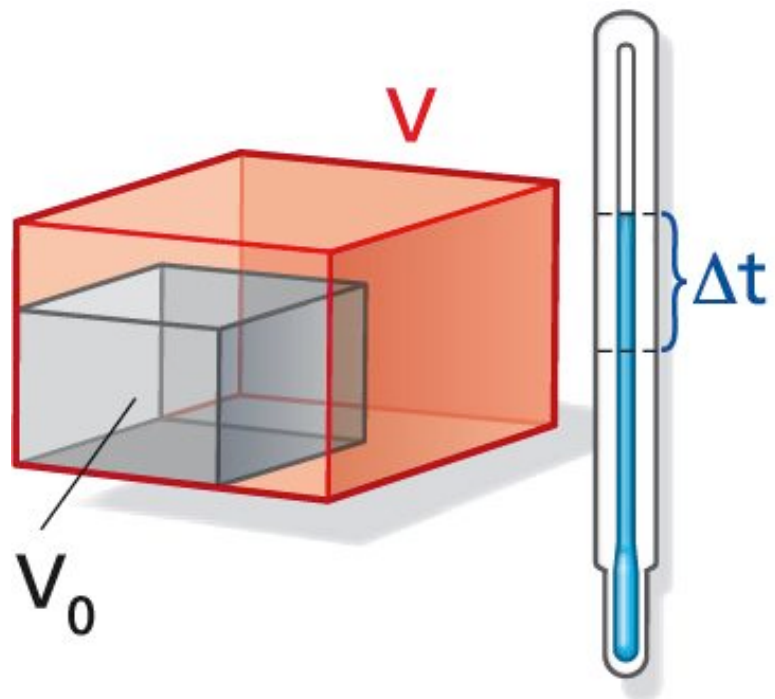
$$y = mx \xrightarrow[\substack{y=\Delta l \quad x=\Delta t \\ m=l_0\lambda}]{} \Delta l = l_0\lambda\Delta t$$



$$y = mx \xrightarrow[m=l_0\lambda]{y=\Delta l \quad x=\Delta t} \Delta l = l_0 \lambda \Delta t$$

Sostanza	λ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
ferro	$12 \cdot 10^{-6}$
rame	$17 \cdot 10^{-6}$
platino	$9 \cdot 10^{-6}$
zinco	$31 \cdot 10^{-6}$
alluminio	$24 \cdot 10^{-6}$
bronzo	$18 \cdot 10^{-6}$
vetro pirex	$3 \cdot 10^{-6}$
argento	$19 \cdot 10^{-6}$
oro	$14 \cdot 10^{-6}$
piombo	$30 \cdot 10^{-6}$
cobalto	$12 \cdot 10^{-6}$
antimonio	$11 \cdot 10^{-6}$
nichel	$13 \cdot 10^{-6}$
wolframio (tungsteno)	$5 \cdot 10^{-6}$
costantana	$15 \cdot 10^{-6}$
invar	$2 \cdot 10^{-6}$

Tabella Coefficienti di dilatazione lineare medi, fra 0°C e 100°C , di alcuni solidi.



La **dilatazione volumica** dei solidi, valida qualunque sia la forma del corpo considerato, nell'ipotesi che esso si espanda in modo uniforme in tutte le direzioni, segue anche essa una legge di tipo lineare:

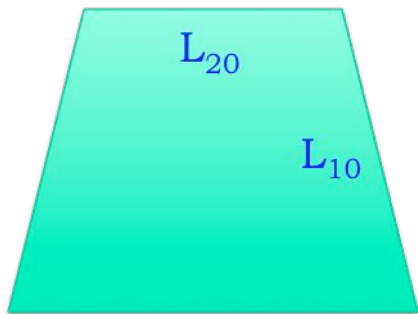
$$V = V_0(1 + \alpha \Delta t)$$

volume finale (m^3) — V
 volume iniziale (m^3) — V_0
 coefficiente di dilatazione volumica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$ o K^{-1}) — α
 $\alpha \approx 3\lambda$
 variazione di temperatura ($^{\circ}\text{C}$ o K) — Δt



Nella progettazione delle rotaie e dei ponti in ferro è necessario tener conto della dilatazione termica.

Esercizio. Un trapezio isoscele ha i lati obliqui e la base maggiore costituite da tre sbarre di ferro ($\lambda_1 = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) che alla temperatura $t_0 = 0^\circ\text{C}$ hanno tutte la stessa lunghezza $L_{10} = 100 \text{ cm}$. La base minore è costituita da una sbarra di rame ($\lambda_2 = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) che alla temperatura t_0 ha una lunghezza $L_{20} = 99,85 \text{ cm}$. A quale temperatura il trapezio diviene un quadrato?



Un trapezio isoscele diviene un quadrato quando la base maggiore L_1 e la base minore L_2 hanno la stessa lunghezza, per cui la temperatura t richiesta, affinché ciò avvenga, sarà quella per cui:

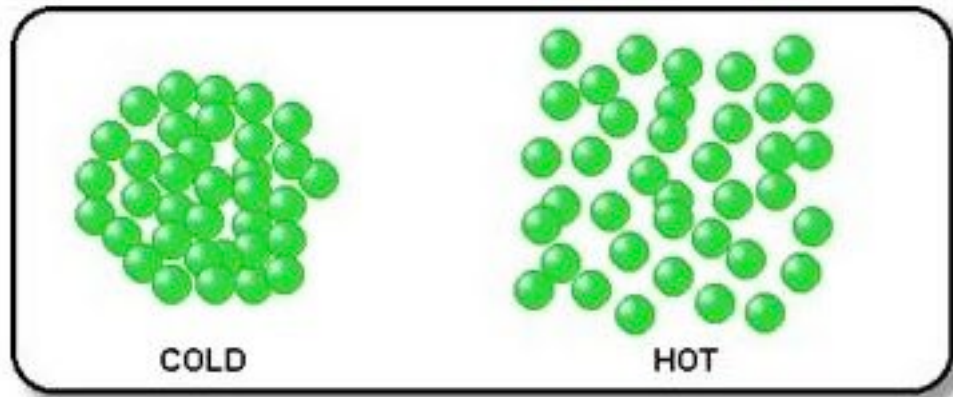
$$L_1 = L_2 \Rightarrow L_{10} \cdot (1 + \lambda_1 t) = L_{20} \cdot (1 + \lambda_2 t)$$

Esplicitando rispetto a t si ottiene:

$$L_{10} + L_{10} \lambda_1 t = L_{20} + L_{20} \lambda_2 t \Rightarrow (L_{10} \lambda_1 - L_{20} \lambda_2) t = L_{20} - L_{10}$$

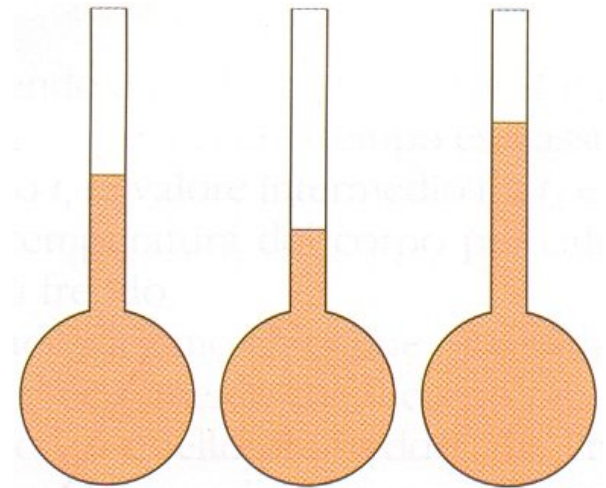
$$t = \frac{L_{20} - L_{10}}{L_{10} \lambda_1 - L_{20} \lambda_2} = \frac{99,85 - 100}{100 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} - 99,85 \cdot 1,7 \cdot 10^{-5}} = 300^\circ\text{C}$$

DILATAZIONE TERMICA DEI LIQUIDI



Come i solidi, i liquidi si dilatano con l'aumentare della temperatura.

Lo studio del loro comportamento è un po' più complicato per il fatto che contemporaneamente anche i loro recipienti possono subire dilatazioni volumiche consistenti.



Liquido	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
alcool etilico	$11 \cdot 10^{-4}$
mercurio	$1,8 \cdot 10^{-4}$
etere	$16 \cdot 10^{-4}$
glicerina	$5 \cdot 10^{-4}$
petrolio	$9,2 \cdot 10^{-4}$
acetone	$14,3 \cdot 10^{-4}$
trementina	$9,6 \cdot 10^{-4}$
acido acetico	$10,7 \cdot 10^{-4}$
carbonio	$11,9 \cdot 10^{-4}$
benzolo	$12,1 \cdot 10^{-4}$

Tabella Coefficienti di dilatazione volumica di alcuni liquidi.

La legge della **dilatazione volumica** di un liquido è la stessa, da un punto di vista matematico, di quella dei solidi:

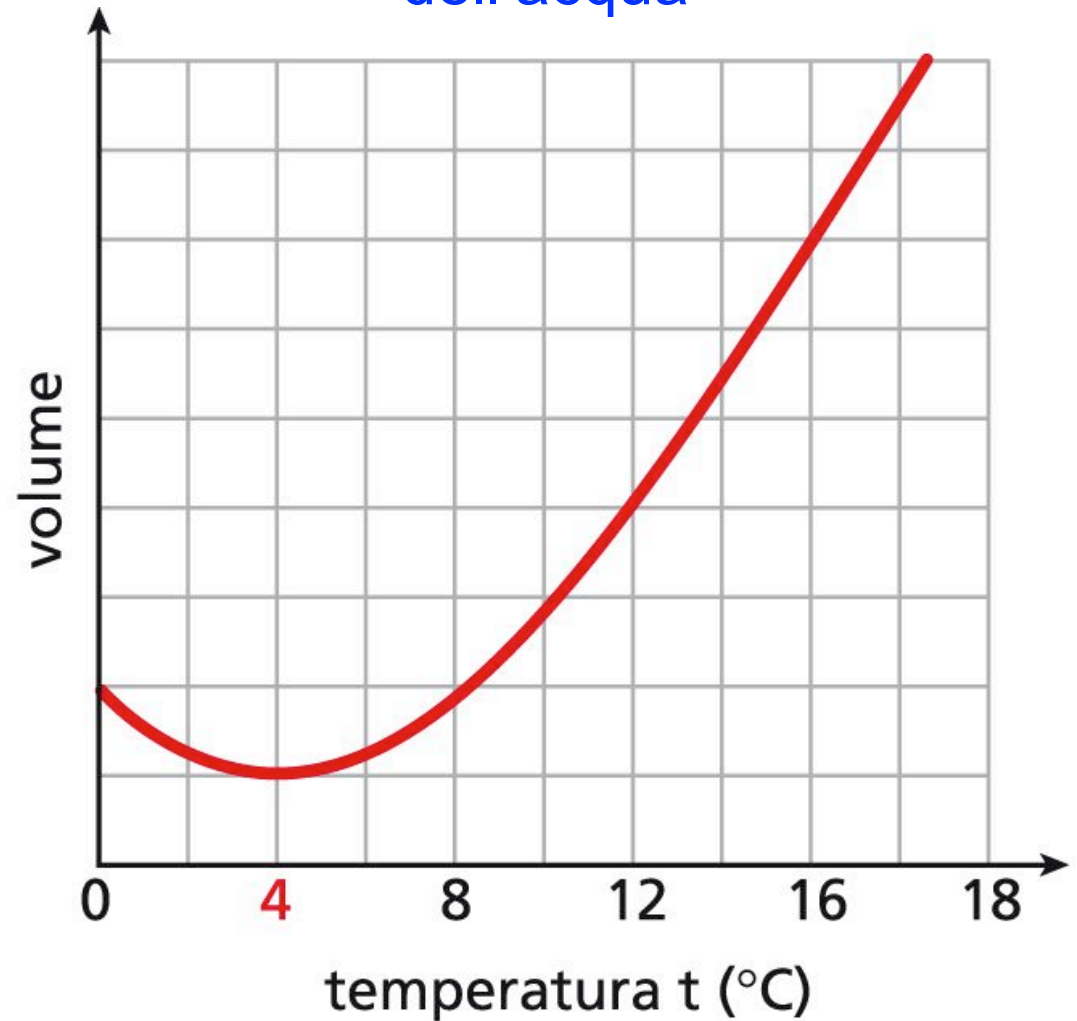
$$V - V_0 = \Delta V = \alpha V_0 \Delta t$$

$$V = V_0 (1 + \alpha \Delta t)$$

α = coefficiente di dilatazione volumica del liquido

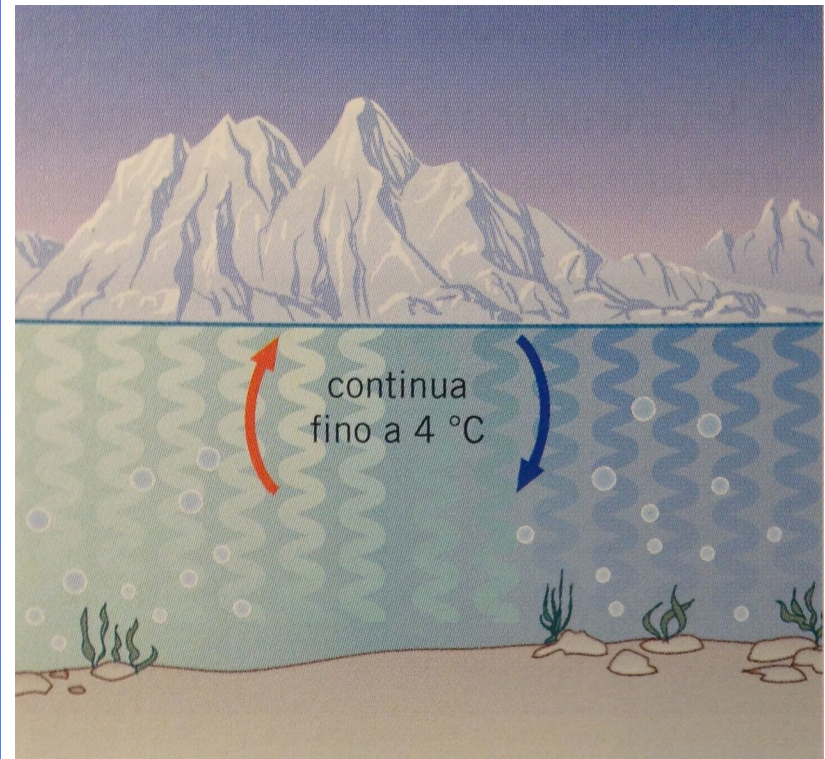
L'acqua ha un comportamento anomalo: con l'aumentare della temperatura da 0°C a 4°C subisce una diminuzione di volume, mentre al di sopra di 4°C si dilata come gli altri liquidi.

Il comportamento anomalo dell'acqua

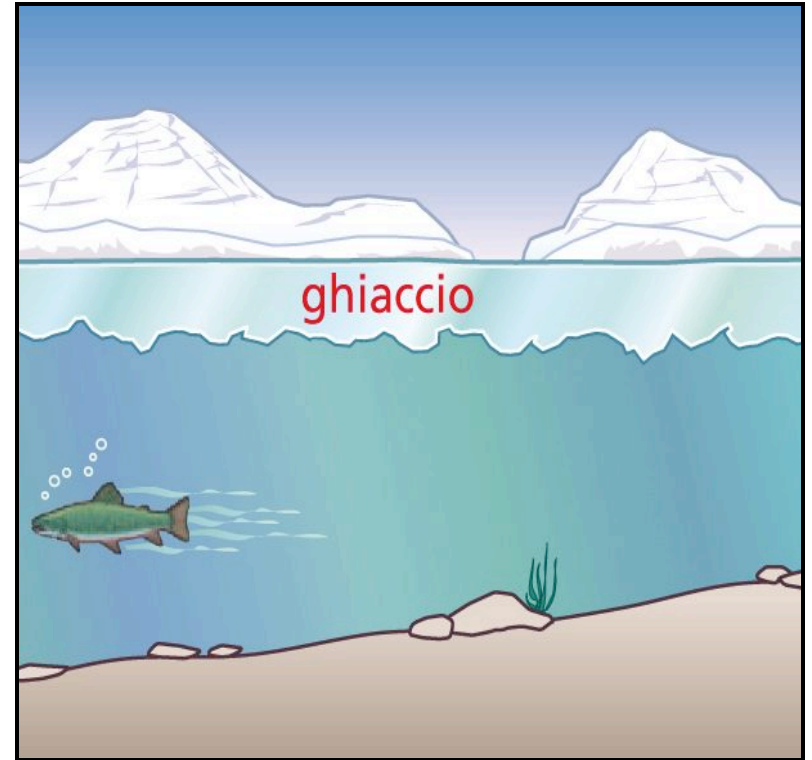


Lo strano comportamento dell'acqua ha importanti conseguenze in natura: l'acqua del mare, dei laghi e dei fiumi gela solo in superficie permettendo così la vita sul fondo.

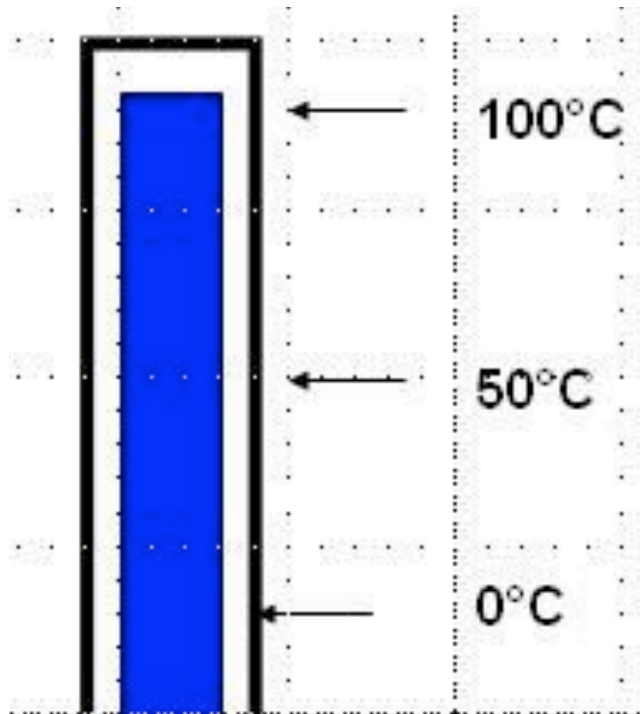
Spiegazione – Quando la temperatura si abbassa, l'acqua in superficie comincia a raffreddarsi. Il volume dello strato superficiale diminuisce e la densità aumenta. Per la legge di Archimede, lo strato superficiale più denso scende verso il fondo, e dal basso sale l'acqua più calda (meno densa). Il processo continua fino a 4 °C.



Se la temperatura continua a diminuire, questa volta il volume dello strato superficiale aumenta e la densità diminuisce, per cui l'acqua, adesso, è meno densa di quella sotto. Per la legge di Archimede lo strato superficiale non scende e continua a raffreddarsi fino a diventare ghiaccio.



Esercizio. Un contenitore cilindrico di vetro con diametro di 8,0cm e altezza 25,0cm, chiuso ermeticamente e senza aria all'interno, è riempito di mercurio fino a un'altezza di 24,7cm alla temperatura di 0°C. Ipotizzando che la temperatura salga a un valore di 45°C, stabilire se il contenitore di vetro, di cui si può trascurare la dilatazione, rischia di rompersi oppure no.



La risposta va trovata nel confronto tra il volume del contenitore cilindrico di vetro e quello del mercurio alla temperatura alla temperatura di 45 °C.

Calcolo del volume del contenitore cilindrico di vetro:

$$V_{cil} = \pi \cdot R^2 \cdot h_{cil} = \pi \cdot 4^2 \cdot 25 = 1256 \text{ cm}^3$$

Volume del mercurio alla temperatura di 45 °C:

$$V_{mer} = V_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) = 1241 \cdot (1 + 1,82 \cdot 10^{-4} \cdot 45) = 1251 \text{ cm}^3$$

dove:

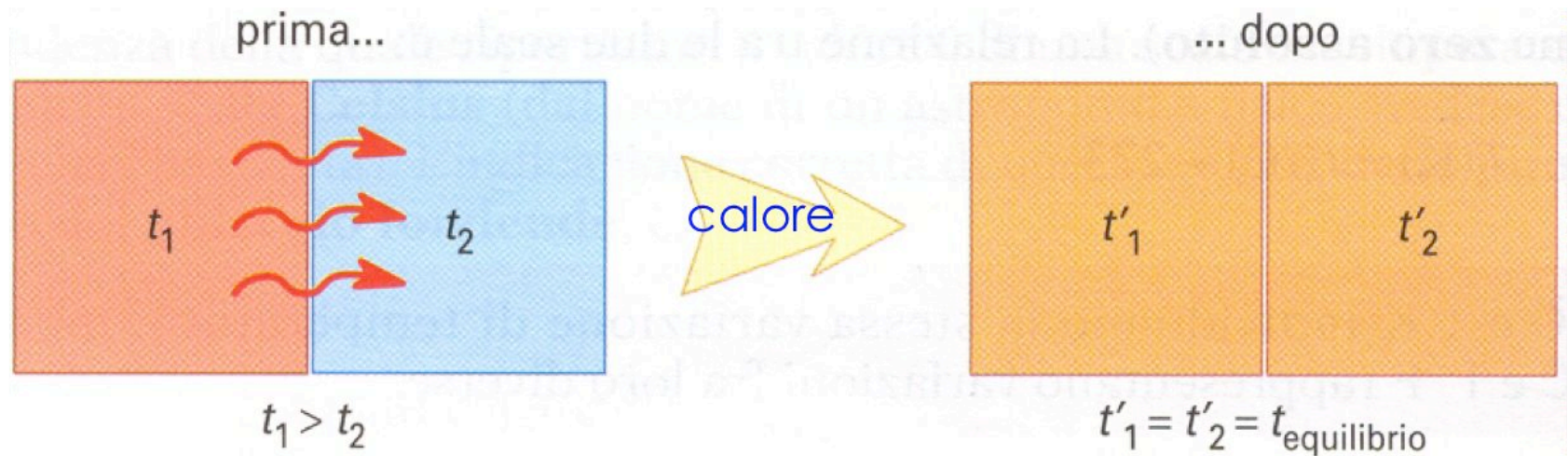
$$V_0 = \pi \cdot R^2 \cdot h_{mer} = \pi \cdot 4^2 \cdot 24,7 = 1241 \text{ cm}^3$$

Conclusione - Il contenitore di vetro non si rompe in quanto il suo volume è superiore al volume dilatato del mercurio:

$$V_{cil} > V_{mer} \rightarrow \text{Il contenitore di vetro non si rompe}$$

Ponendo a contatto due corpi A e B, di temperatura t_A e t_B , dopo un certo tempo essi assumono la stessa temperatura di equilibrio t .

Quando ciò accade significa che i due corpi hanno scambiato una quantità di calore e precisamente che il corpo più caldo ha ceduto una certa quantità di calore a quello più freddo, che l'ha assorbita.

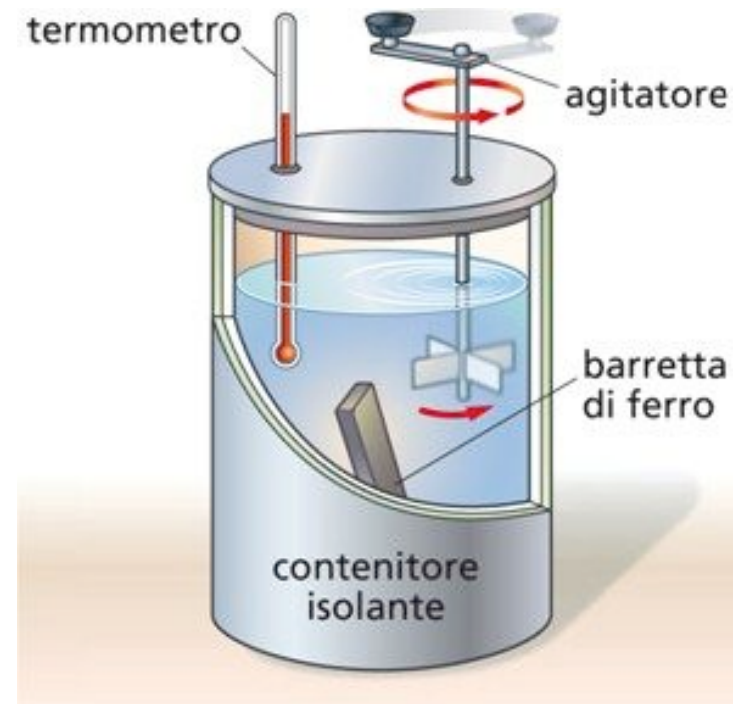


DEFINIZIONE

Il **calore** rappresenta **un trasferimento di energia**, che avviene spontaneamente dal corpo più caldo a quello più freddo, a causa di una differenza di temperatura. In altri termini il calore è una quantità di "**energia in transito**".

- Unità di misura del calore: la **caloria** (cal), definita come *la quantità di calore che si deve fornire alla massa di 1 g di acqua per elevare la sua temperatura da 14,5°C a 15,5°C.*
- Unità di misura del calore: poiché il calore rappresenta una variazione di energia, o meglio, una quantità di energia trasferita, la sua unità di misura, nel SI è il **joule**:
$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

Per misurare il calore ceduto o assorbito da un corpo ci si avvale di opportuni dispositivi detti **calorimetri**.



Sperimentalmente si è trovato che la quantità di calore necessaria per far variare la temperatura di un corpo è proporzionale alla massa del corpo e alla variazione della temperatura e dipende, inoltre, dalla sostanza di cui è costituito il corpo.

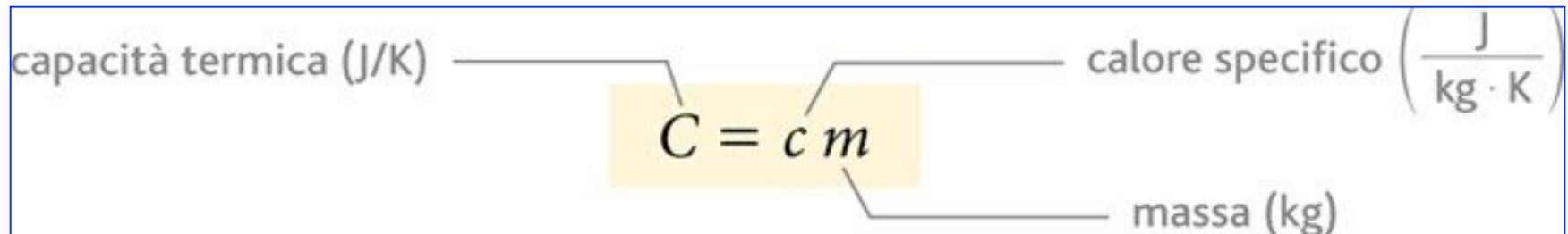
LEGGE FONDAMENTALE DELLA CALORIMETRIA

Il calore Q che deve assorbire o cedere una sostanza di massa m perché la sua temperatura subisca la variazione di temperatura Δt è dato da:

$$Q = mc\Delta t \quad \Delta t = t_f - t_i$$

c =calore specifico è una costante caratteristica della sostanza

Capacità termica del corpo



capacità termica (J/K) — $C = c m$ — calore specifico $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)$
— massa (kg)

Sostanza	Calore specifico (cal g ⁻¹ °C ⁻¹)	Calore specifico (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Sostanza	Calore specifico (cal g ⁻¹ °C ⁻¹)	Calore specifico (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
rame	0,0920	385	ottone	0,0908	380
alluminio	0,214	896	acqua (0 °C)	1,008	4218
zinco	0,0929	389	acqua (15 °C)	1,000	4186
oro	0,0308	129	acqua di mare	0,939	3930
argento	0,0571	239	glicerina	0,571	2390
piombo	0,0308	129	alcool etilico	0,581	2430
ferro	0,108	452	benzina	0,535	2240
stagno	0,0571	239	mercurio	0,0332	139
carbone	0,287	1200	olio	0,442	1850
zolfo	0,175	733	petrolio	0,454	1900
silicio	0,162	678	idrogeno	3,411	14280
vetro	0,191	800	ossigeno	0,219	917
ghiaccio (0 °C)	0,487	2040	azoto	0,248	1038
ghiaccio (-20 °C)	0,466	1950	anidride carbonica	0,200	837
bronzo	0,0908	380	vapore d'acqua (100 °C)	0,463	1940
invar	0,110	460			

L'acqua rappresenta una specie di serbatoio termico, cioè un elemento equilibratore che tende a far variare molto lentamente la temperatura dell'ambiente in cui è presente in notevole quantità.

In generale, si definiscono due calori specifici, c_p e c_v , rispettivamente a pressione e a volume costante. Questi valori sono diversi fra loro nel caso dei gas, mentre nei solidi e nei liquidi sono circa uguali. Per sostanze allo stato solido o liquido, poiché in generale le variazioni di temperatura avvengono alla pressione atmosferica, ci si riferisce normalmente al calore specifico a pressione costante.

La legge fondamentale della calorimetria ci permette di determinare i calori specifici delle sostanze, oppure la temperatura di equilibrio.

Questa tecnica si basa essenzialmente sul principio della conservazione dell'energia e sulle proprietà dell'equilibrio termico.

Se il sistema è *completamente isolato* (l'energia non può fluire dentro o fuori di esso né sotto forma di lavoro meccanico né sotto forma di calore), il principio di conservazione dell'energia impone che *il calore ceduto da un corpo sia uguale al calore assorbito dall'altro*.

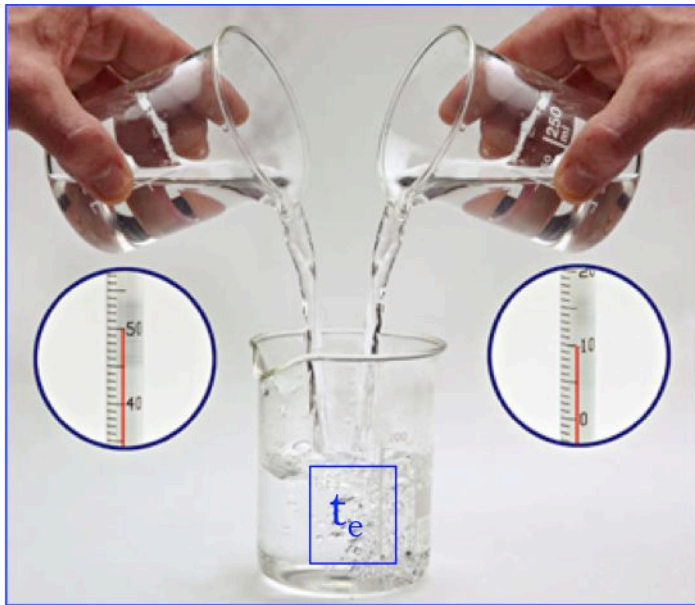
$$Q_{\text{ceduto}} = Q_{\text{assorbito}} \Rightarrow m_1 c_1 (t_{i1} - t_e) = m_2 c_2 (t_e - t_{i2})$$

Osservazione per gli esercizi

La seguente equazione (così come è stata scritta), va applicata nei casi in cui non ci siano cambiamenti di stato durante il raggiungimento dell'equilibrio termico:

$$Q_{\text{ceduto}} = Q_{\text{assorbito}} \Rightarrow m_1 c_1 (t_{i1} - t_e) = m_2 c_2 (t_e - t_{i2})$$

Esercizio. In un recipiente termicamente isolato vengono mescolati 0,2 litri di acqua alla temperatura di 50 °C con 100 g di acqua alla temperatura di 10 °C. Determinare la temperatura di equilibrio, supponendo che la quantità di calore ceduta dall'acqua più calda sia interamente assorbita dall'acqua più fredda



Nell'ipotesi che la quantità di calore ceduta dall'acqua più calda sia interamente assorbita dall'acqua più fredda (acqua calda + acqua fredda = sistema isolato), deve essere:

$$Q_{\text{assorbito}} = Q_{\text{ceduto}}$$

Sostituiamo alle quantità di calore scambiate le loro espressioni matematiche (le variazioni di temperatura Δt vanno prese positive) e dall'equazione ottenuta ricaviamo la temperatura di equilibrio:

$$m_1 c_1 (t_{1i} - t_{eq}) = m_2 c_2 (t_{eq} - t_{2i})$$

$$t_{eq} = \frac{m_1 c_1 t_{1i} + m_2 c_2 t_{2i}}{m_1 c_1 + m_2 c_2} \xrightarrow{c_1=c_2} t_e = \frac{m_1 t_{1i} + m_2 t_{2i}}{m_1 + m_2} =$$
$$\frac{0,2 \cdot 50 + 0,1 \cdot 10}{0,2 + 0,1} = 36,7^\circ\text{C}$$

Osservazione. In generale, la temperatura di equilibrio non è la media aritmetica delle singole temperature.

Che succede se durante il raggiungimento dell'equilibrio termico si ha un cambiamento di stato (liquefazione o solidificazione, vaporizzazione o condensazione)?

Il calore Q che deve essere fornito o sottratto per produrre una transizione di fase completa di una massa m di una sostanza, mantenuta a pressione costante e portata alla temperatura caratteristica della transizione, è:

$$Q = mL$$

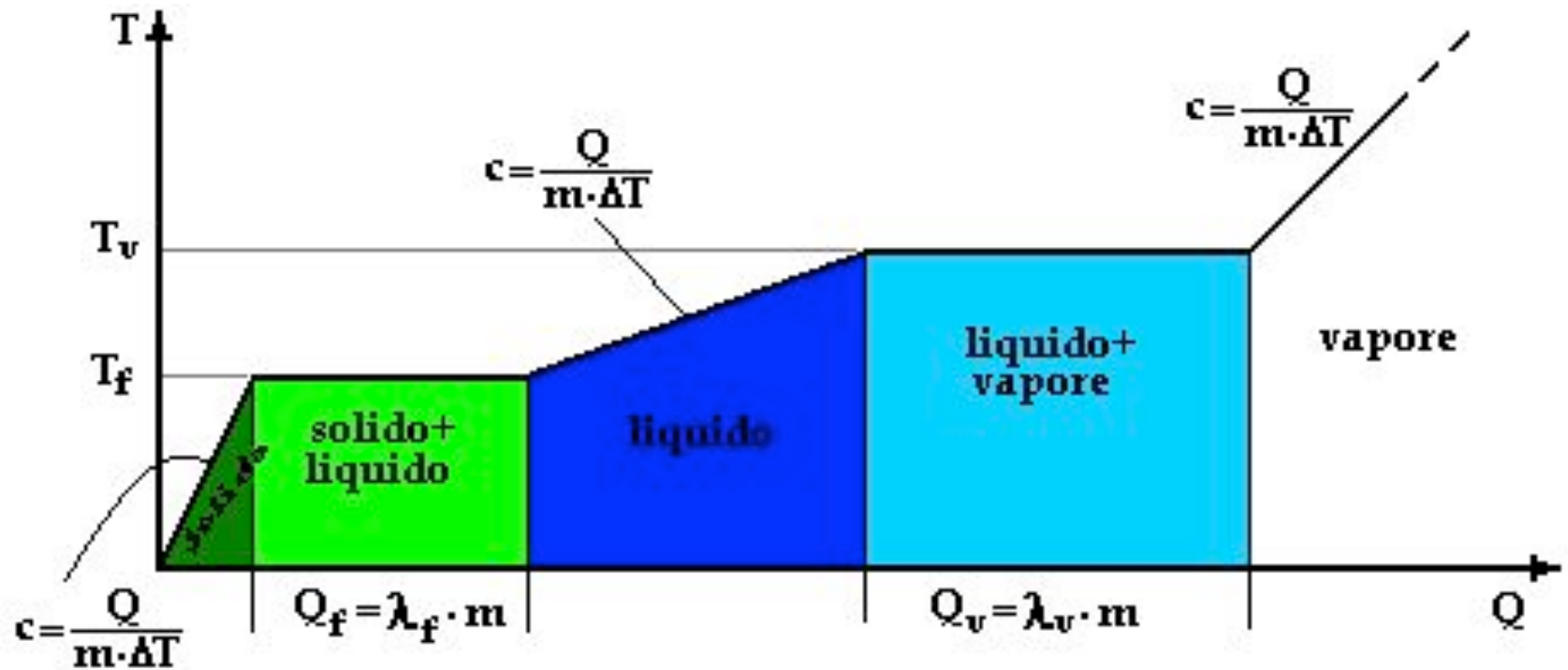
dove L è il calore latente di fusione (solidificazione) o di vaporizzazione (condensazione), i cui valori sono in tabella.

Questo argomento sarà approfondito in un prossimo modulo.

Sostanza	Temperatura di fusione	Calore latente di fusione (kcal/kg)	Sostanza	Temperatura di fusione	Calore latente di fusione (kcal/kg)
mercurio	-39	2,80	tungsteno	3380	46
piombo	327	6,0	iridio	2447	65,8
rame	1083	50,6	zolfo	183	9,35
ferro	1539	64	ossigeno	-219	3,3
argento	960	21,1	idrogeno	-259	1,6
oro	1063	16,1	azoto	-210	6,2
nicel	1455	71,8	elio	-269,7	1,25
platino	1774	27	naftalina	80	35,7
zinco	419	24,1	paraffina	54	36
alluminio	660	94,6	etere	-116	23,2
stagno	232	14	ghiaccio	0	79,7

Sostanza	Temperatura di ebollizione (°C)	Calore latente di vaporizzazione (kcal/kg)
acqua	100	537
acetone	56	124
acido solforico	332	122
acido acetico	118	97
alcool	78	210
anilina	184	108
metanolo	65	263
mercurio	357	69
benzolo	80	95
cloroformio	61	60
etere	34	85
ammoniaca liquida	-10	386

Esercizio - Un blocco di 12 kg di ghiaccio si trova alla temperatura di $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Quanto calore dobbiamo fornirgli per portarlo a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$? (calore specifico ghiaccio= $2090\text{ J/kg}\cdot\text{K}$; calore specifico acqua= $4186\text{ J/kg}\cdot\text{K}$; calore specifico vapore= $1940\text{ J/kg}\cdot\text{K}$; calore latente fusione ghiaccio= $332\times 10^3\text{ J/kg}$; calore latente vaporizzazione acqua= $2256\times 10^3\text{ J/kg}$)



Il ghiaccio deve passare attraverso le seguenti fasi:

1. Dalla temperatura di $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ alla temperatura di fusione di $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta t = 12 \cdot 2090 \cdot 15 = 37 \cdot 10^4 \text{ J}$$

2. Cambiamento di stato solido-liquido a temperatura costante di $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$Q_2 = m \cdot L_f = 12 \cdot 332,4 \cdot 10^3 = 399 \cdot 10^4 \text{ J}$$

3. L'acqua, ottenuta dalla fusione del ghiaccio, dalla temperatura di $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alla temperatura di ebollizione di $100\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$Q_3 = m \cdot c \cdot \Delta t = 12 \cdot 4186 \cdot 100 = 502 \cdot 10^4 \text{ J}$$

4. Cambiamento di stato liquido-vapore a temperatura costante di 100 °C:

$$Q_4 = m \cdot L_V = 12 \cdot 2256 \cdot 10^3 = 2707 \cdot 10^4 J$$

5. Il vapore (vaporizzazione dell'acqua), dalla temperatura di 100 °C alla temperatura di 200 °C:

$$Q_5 = m \cdot c \cdot \Delta t = 12 \cdot 1940 \cdot 100 = 233 \cdot 10^4 J$$

Per portare il ghiaccio da -15 °C a 200 °C dobbiamo somministrare una quantità di calore pari alla somma delle quantità di calore assorbite durante le cinque fasi descritte:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = (37 + 399 + 502 + 2707 + 233) \cdot 10^4 = 3878 \cdot 10^4 J$$

Esercizio - Un blocco di 250 g di ghiaccio è posto in un recipiente contenente 300 g di acqua a 300 K. Supponendo che il contenitore sia perfettamente isolante, riuscirà il ghiaccio a sciogliersi completamente? (calore specifico acqua=4186 J/kg·K; calore latente fusione ghiaccio= 334×10^3 J/kg)

■ MODELLO FISICO

Nell'ipotesi che il contenitore sia isolato dall'esterno, gli scambi di calore avvengono esclusivamente tra il ghiaccio alla temperatura di 273 K e l'acqua a 300 K. Per il principio zero della termodinamica, il corpo a temperatura più alta cede calore al corpo a temperatura più bassa, fino a raggiungere l'equilibrio termico, ossia la stessa temperatura. Il ghiaccio e l'acqua si trovano in stati di aggregazione differenti; parte del calore ceduto dall'acqua è utilizzato per sciogliere parzialmente o totalmente la massa di ghiaccio, mantenendo costante la temperatura. Solo dopo la fusione di tutta la massa di ghiaccio, l'eventuale calore residuo è disponibile per elevare la temperatura dell'acqua ottenuta dalla fusione del ghiaccio.

■ LEGGI ED EQUAZIONI

L'equazione degli scambi di calore prevede che il calore ceduto da un corpo sia uguale al calore assorbito dall'altro corpo. Indicando con Q_c il calore ceduto dall'acqua a 300 K, Q_f il calore latente di fusione del ghiaccio e Q_a il calore assorbito dall'acqua ottenuta dalla fusione completa del ghiaccio, si può scrivere:

$$Q_{\text{ceduto}} = Q_{\text{latente}} + Q_{\text{assorbito}}$$

dove:

$$Q_c = m_a c_a (300 - T^*) \quad Q_f = m_g L_f \quad Q_a = m_g c_a (T^* - 273)$$

con m_g massa del ghiaccio, m_a massa dell'acqua, c_a calore specifico dell'acqua, L_f calore latente di fusione e T^* temperatura finale di equilibrio. Inoltre, è bene ricordare che la massa dell'acqua è esprimibile come prodotto della densità per il volume: $m_a = \rho_a V$.

■ SOLUZIONE ALGEBRICA

Sostituendo le rispettive espressioni del calore ceduto e assorbito si ottiene:

$$m_a c_a (300 - T^*) = m_g L_f + m_g c_a (T^* - 273)$$

RisolviAMO l'equazione rispetto alla temperatura finale T^* :

$$T^* = \frac{m_a c_a \cdot 300 + m_g c_a \cdot 273 - m_g L_f}{(m_a + m_g) c_a}$$

■ SOLUZIONE NUMERICA

Tenendo conto che 1 litro d'acqua è equivalente alla massa di 1 kg, possiamo calcolare la temperatura finale:

$$T^* = \frac{0,30 \text{ kg} \cdot 4186 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 300 \text{ K} + 0,25 \text{ kg} \cdot 4186 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 273 \text{ K} - 0,25 \text{ kg} \cdot 3,34 \cdot 10^5 \text{ J/kg}}{(0,25 + 0,30) \text{ kg} \cdot 4186 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})} \cong 251,5 \text{ K}$$

La temperatura trovata è numericamente inferiore a quella del ghiaccio e quindi inaccettabile: **fisicamente significa che il calore ceduto dall'acqua non è sufficiente a fondere completamente il ghiaccio.**

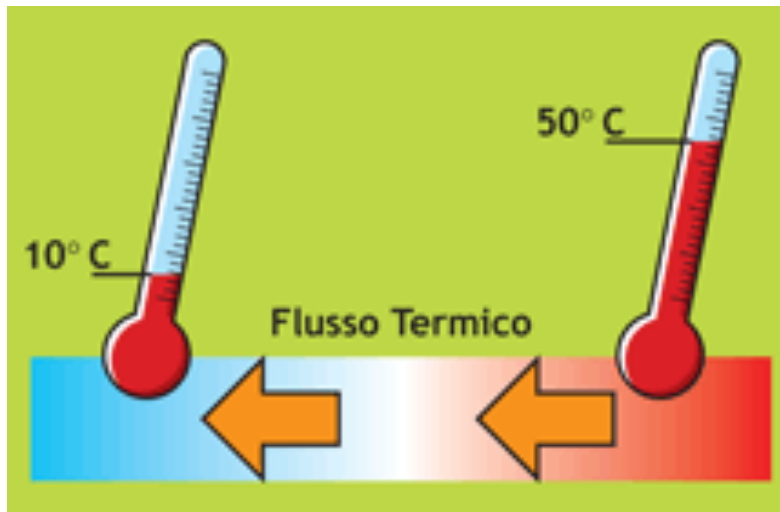
Si può quindi solo calcolare la massa d'acqua ottenuta dalla fusione parziale del ghiaccio con un cambiamento di fase che avviene alla temperatura costante di 273 K. La massa d'acqua m_a cede quindi calore diminuendo la propria temperatura da 300 a 273 K, fondendo la massa incognita m_x di ghiaccio; m_x si può calcolare facilmente impostando la seguente equazione:

$$m_a c_a (300 - 273) = m_x L_f$$

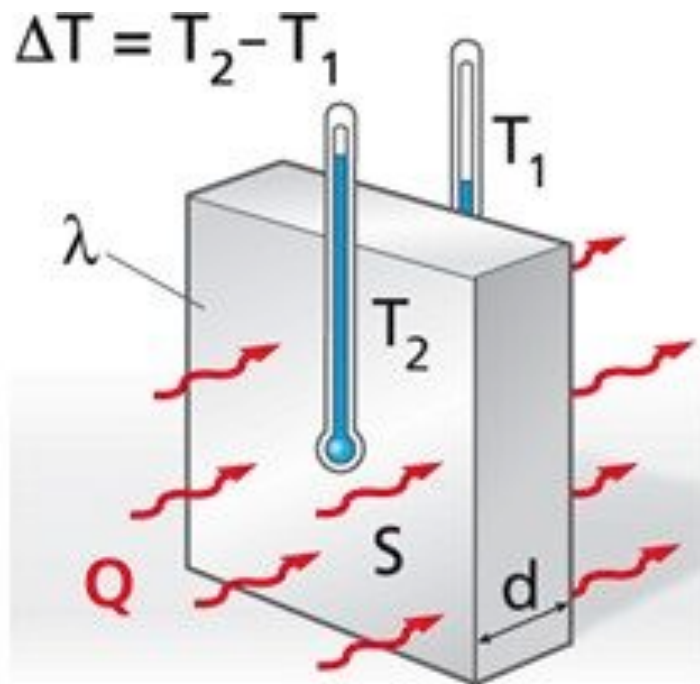
$$m_x = \frac{m_a c_a \cdot 27}{L_f} = \frac{0,3 \text{ kg} \cdot 4186 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 27 \text{ K}}{3,34 \cdot 10^5 \text{ J/kg}} = 0,101 \text{ kg}$$

PROPAGAZIONE DEL CALORE

La propagazione del calore o meglio dell'energia termica fra due corpi a diverse temperature può avvenire secondo tre processi: *conduzione*; *convezione*; *irraggiamento termico*.



Il processo di **conduzione**, caratteristico dei corpi solidi, si verifica quando il calore passa da un corpo a temperatura maggiore a un altro a temperatura minore, senza che vi sia spostamento di materia o alterazione macroscopica del solido.



LEGGE DELLA CONDUZIONE TERMICA

In regime stazionario, la quantità di calore condotta nel tempo t attraverso una lastra omogenea di lunghezza d a facce piane e parallele di area S è:

$$\frac{Q}{\Delta t} = \lambda_c S \frac{\Delta T}{d}$$

calore trasferito (J) —————

intervallo di tempo (s) —————

area (m²) —————

differenza di temperatura (K) —————

spessore (m) —————

conducibilità termica (W/(m · K)) —————

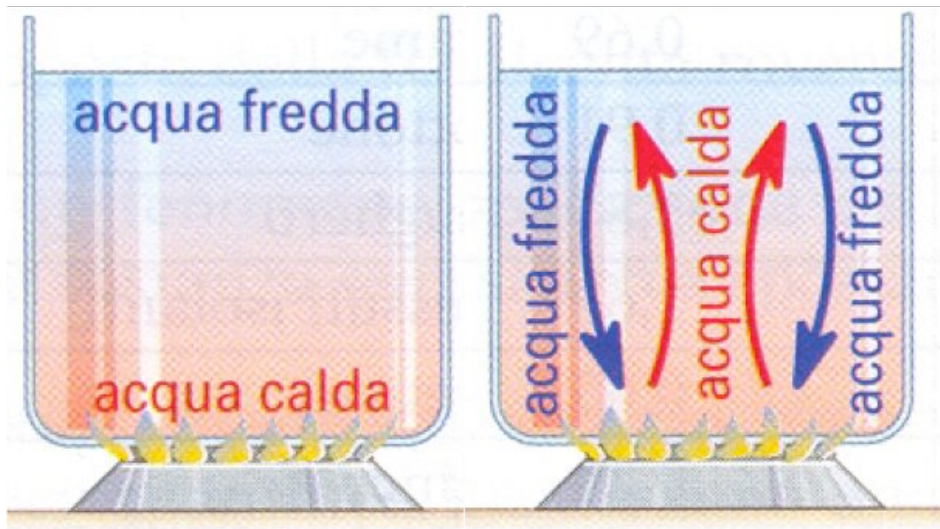
regime stazionario: la temperatura in ogni punto della lastra è costante nel tempo e attraverso ogni sezione parallela alle due facce passa, nell'unità di tempo, la stessa quantità di calore.

Materiale	Coefficiente h $\text{kcal h}^{-1} \text{m}^{-1} \text{°C}^{-1}$	Materiale	Coefficiente h $\text{kcal h}^{-1} \text{m}^{-1} \text{°C}^{-1}$
cartone	0,15	polistirolo espanso	0,023
aria secca (1 atm)	0,021	amianto	0,22
rame	330	ghiaccio	1,6
alluminio	178	zinco	0,5
acqua	0,55	legno	0,07
oro	258	mattoni	0,3-0,7
marmo	30	piombo	30
vetro	0,5	sughero	0,045
gesso	0,35	lana	0,041
sale da cucina	0,048	cemento	0,8
ferro	60	calcestruzzo	1,0
argento	360	muratura in pietra	2,5

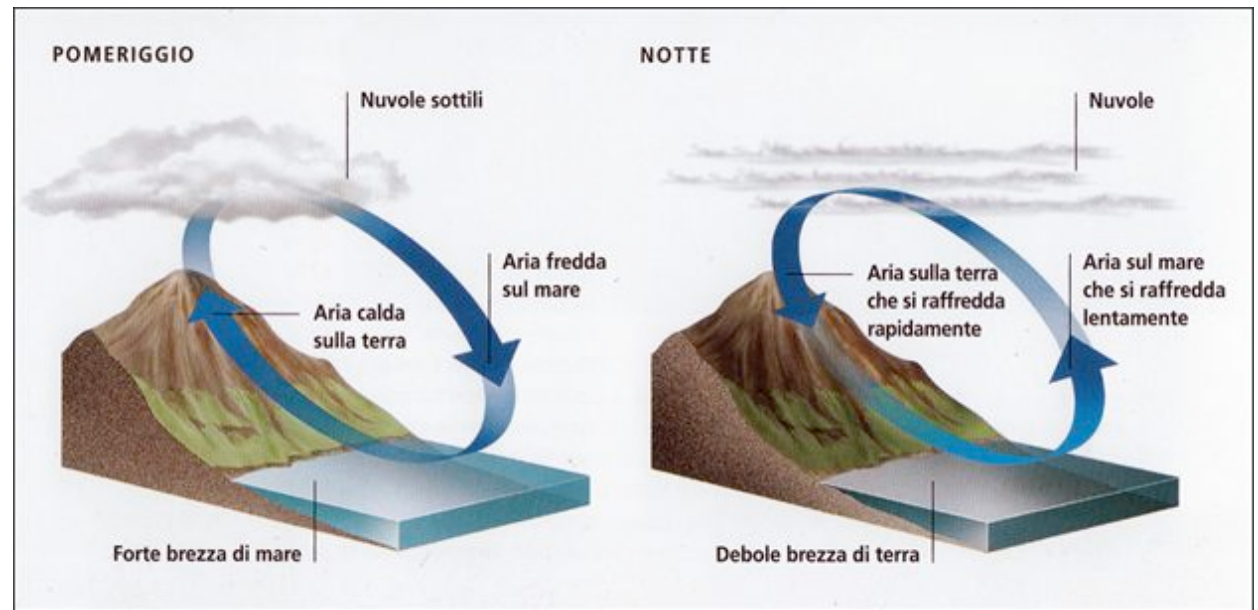
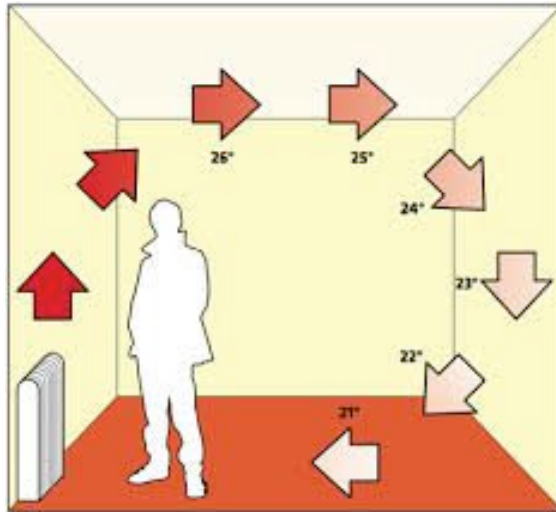
Anche se non esiste una netta separazione, i materiali vengono distinti in *buoni conduttori* (quelli con h piuttosto grande) e *cattivi conduttori* o **isolanti** (con piccolo h).

Il processo di **convezione** consiste nello spostamento di fluido dalle zone a temperatura maggiore a quelle a temperatura minore e viceversa.

Il fluido caldo, meno denso di quello freddo, tende a salire verso l'alto, essendo così rimpiazzato da quello freddo.



La propagazione del calore per convezione è dunque accompagnata da trasporto di materia e per questo può avvenire solo nei fluidi.



Il processo di convezione ha un ruolo fondamentale in alcuni fenomeni atmosferici, come la formazione dei venti, e nelle correnti marine. Esso trova applicazione nella costruzione degli impianti di riscaldamento a termosifoni, nei quali sia la circolazione dell'acqua all'interno dei tubi, sia la trasmissione del calore all'ambiente è regolata da moti convettivi.

La convezione è un fenomeno fisico piuttosto complesso. Consideriamo il caso semplice in cui un oggetto caldo è immerso in un fluido in quiete.

Convezione

In regime stazionario, la quantità di calore Q che l'oggetto caldo, delimitato dalla superficie S alla temperatura T , cede nell'intervallo di tempo Δt al fluido, la cui temperatura, misurata in un punto distante dalla superficie del corpo, è T_0 , è data dalla relazione:

$$\frac{Q}{\Delta t} = \lambda_e S (T - T_0)$$

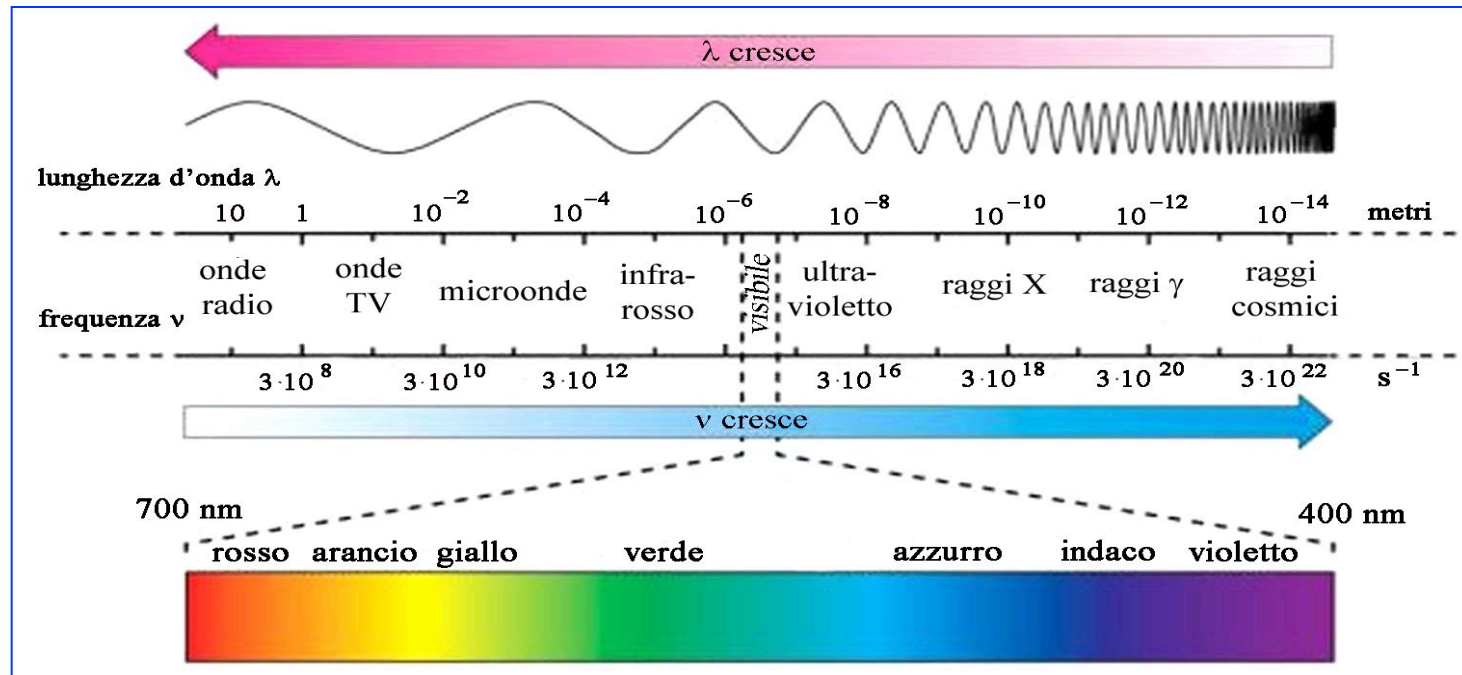
dove la costante di proporzionalità λ_e è il *coefficiente di conduttività termica esterna* e dipende sia dal corpo sia dal fluido.

Irraggiamento termico

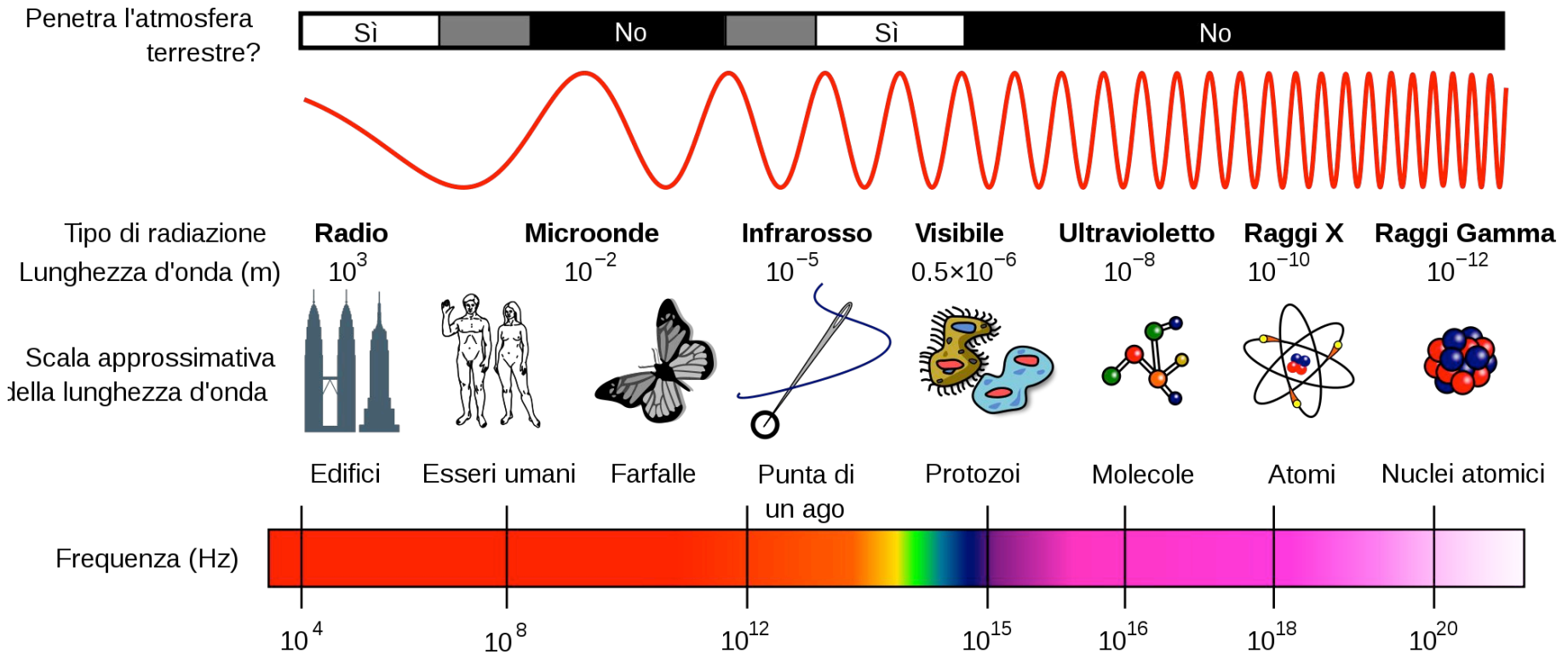
E' un fenomeno di propagazione di energia che avviene anche nel vuoto per mezzo di onde elettromagnetiche. Si manifesta come calore solo nella fase di assorbimento delle radiazioni da parte dei corpi.

Spettro elettromagnetico

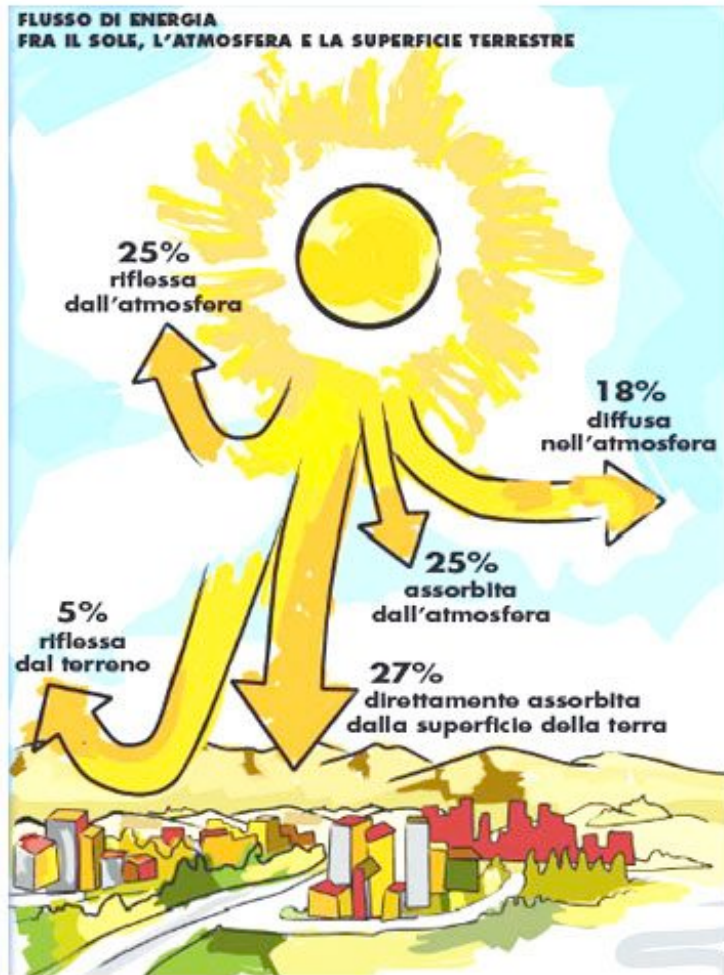
$$E_{\text{fotone}} = hf = h \frac{c}{\lambda}$$



Spettro elettromagnetico

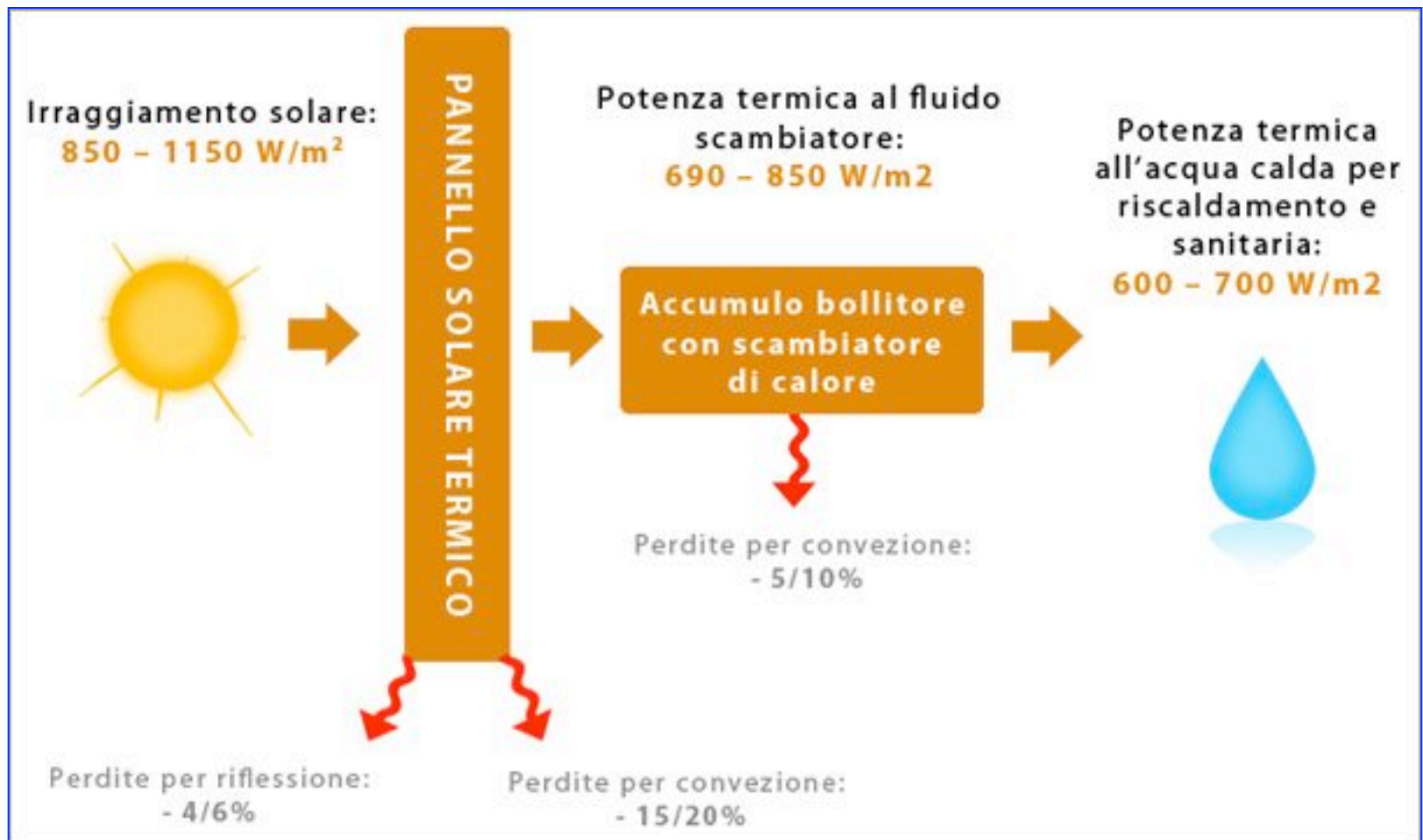


A temperatura ambiente, le radiazioni responsabili in massima parte degli scambi di calore sono quelle infrarosse (dette anche *termiche*).



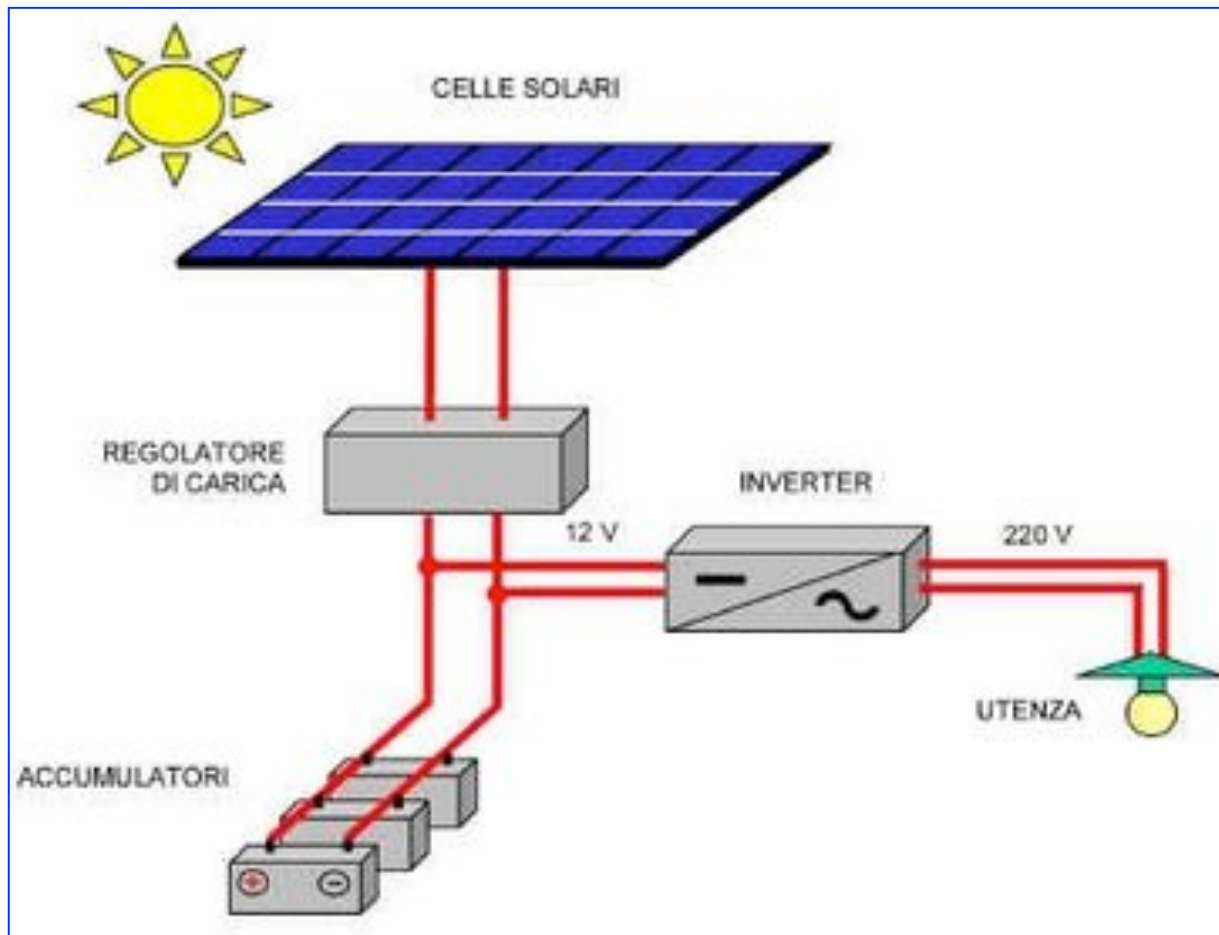
Distribuzione dell'energia che arriva dal sole

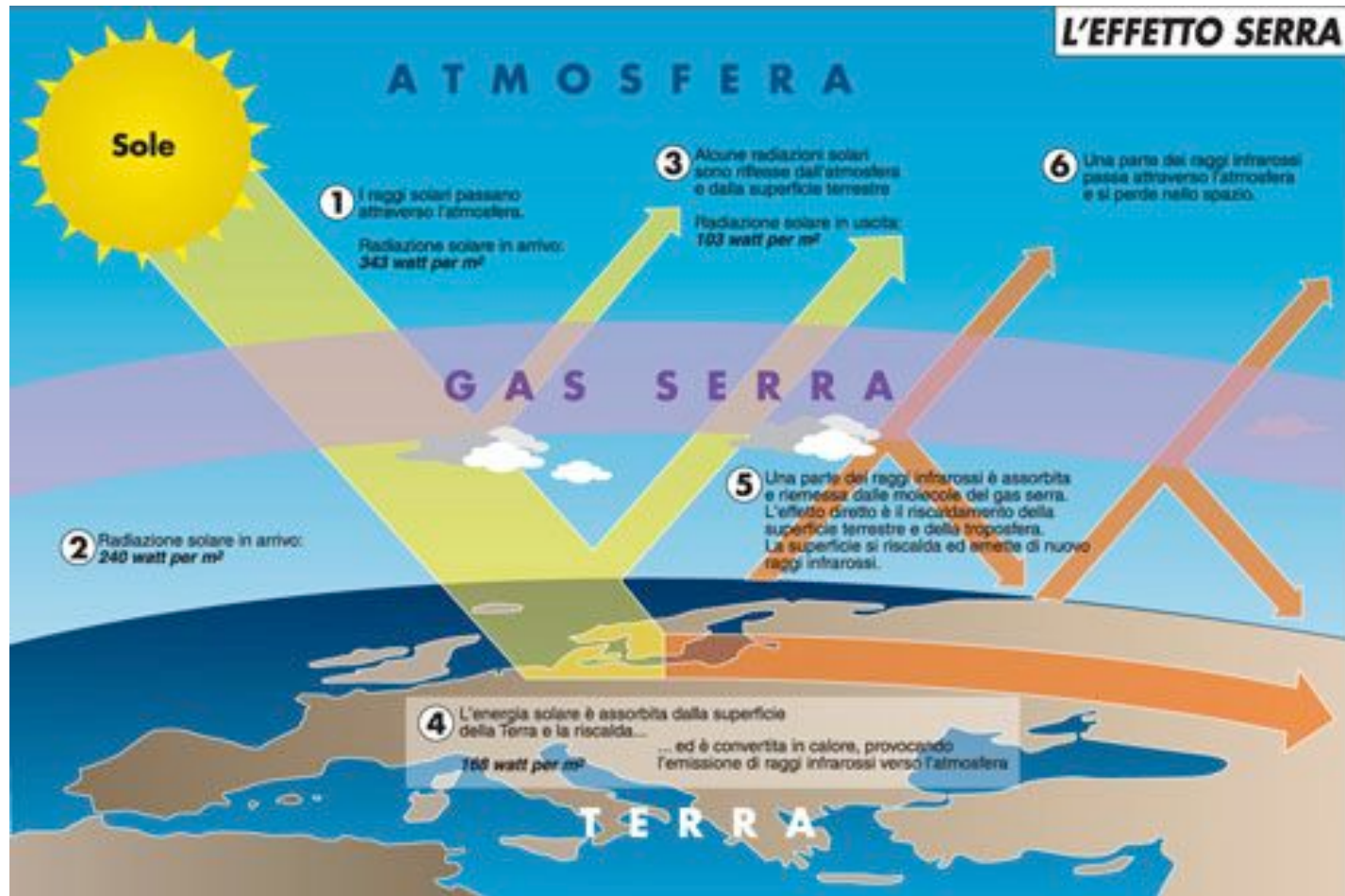
Mentre nella conduzione e nella convezione il calore si propaga solo attraverso la materia, grazie all'irraggiamento esso può propagarsi anche nel vuoto (esempio: l'energia irraggiata dal Sole attraverso gli spazi interplanetari).



Il *pannello solare termico* è un dispositivo che converte la radiazione solare in energia termica.

Pannello solare
fotovoltaico converte
l'energia solare in
energia elettrica.



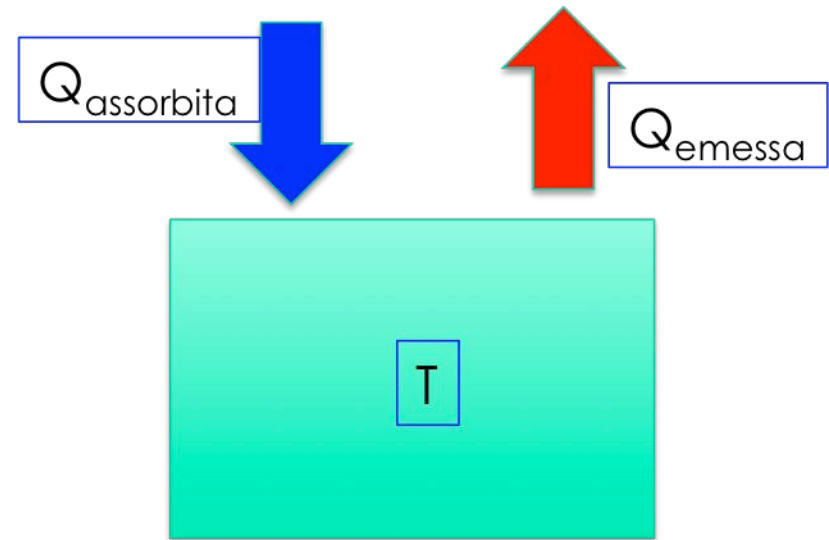


Effetto serra: riscaldamento dell'atmosfera dovuto all'assorbimento di energia solare da parte dell'anidride carbonica e degli altri gas serra.

Un corpo che irraggia energia elettromagnetica deve anche assorbirne. Se ciò non avvenisse, tutta la sua energia andrebbe perduta e la sua temperatura raggiungerebbe lo zero assoluto.

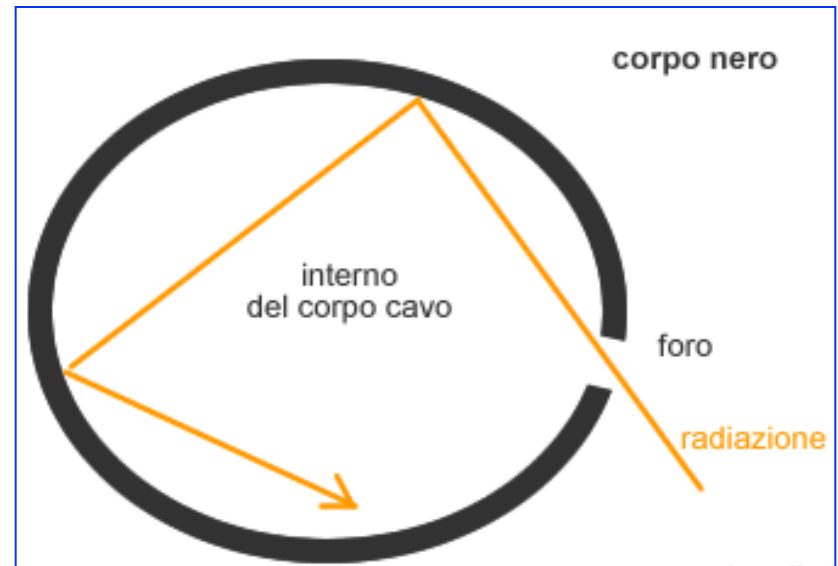
La capacità di emettere radiazione elettromagnetica è tanto maggiore quanto più un corpo è assorbente.

Un buon emettitore di radiazione è anche un buon assorbitore.



Un corpo che possa assorbire completamente tutte le radiazioni che lo colpiscono, qualunque sia la loro frequenza, non esiste in natura.

Si può realizzare, con ottima approssimazione, un sistema ad esso equivalente mediante una cavità annerita munita di un piccolo *foro*.



Una radiazione, che attraverso il *foro* penetra nella cavità, ha una probabilità molto piccola di uscire nuovamente, poiché per successive riflessioni è assorbita dalle pareti interne del corpo. Questo sistema prende il nome di **corpo nero**.

Un **corpo nero** è un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente (e quindi non ne riflette). Il corpo nero, per la conservazione dell'energia, irradia tutta la quantità di energia assorbita.

LEGGE DI STEFAN-BOLTZMANN

La quantità di energia emessa dal corpo nero per unità di tempo è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta e alla superficie S del corpo:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \sigma S T^4$$

dove $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ è la costante di proporzionalità, chiamata costante di Stefan-Boltzmann

Se, anziché considerare la radiazione di un corpo nero, prendiamo in esame quella emessa da un corpo qualsiasi, troviamo che, a parità di condizioni, la potenza irradiata rappresenta solo una frazione di quella espressa dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$e=1$ - Corpo nero (emettitore e assorbitore ideale)

$e=0$ - Il corpo riflette tutta l'energia che incide su di esso

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma ST^4$$

e = c o s t a n t e
adimensionale detta
emissività.

Materiale	e
nero fumo	0,97
vernici nere	0,98
carbonio	0,92
ossido di rame annerito	0,90
ferro	0,40
rame	0,30
ossido di zinco (bianco)	0,15
alluminio	0,10
argento	0,05

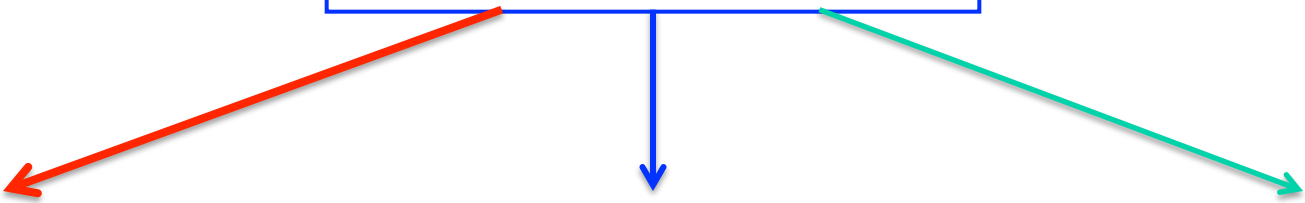
L'energia che un corpo assorbe proviene dall'ambiente circostante, cioè dagli altri corpi che irradiano. Se un corpo si trova a una certa temperatura, differente da quella dell'ambiente, il bilancio netto dell'energia che esso emette per irraggiamento ogni secondo è:

LEGGE DELL' IRRAGGIAMENTO

Un corpo di superficie S a temperatura T , in un ambiente a temperatura T_0 irradia verso l'ambiente la potenza:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma S(T^4 - T_0^4)$$

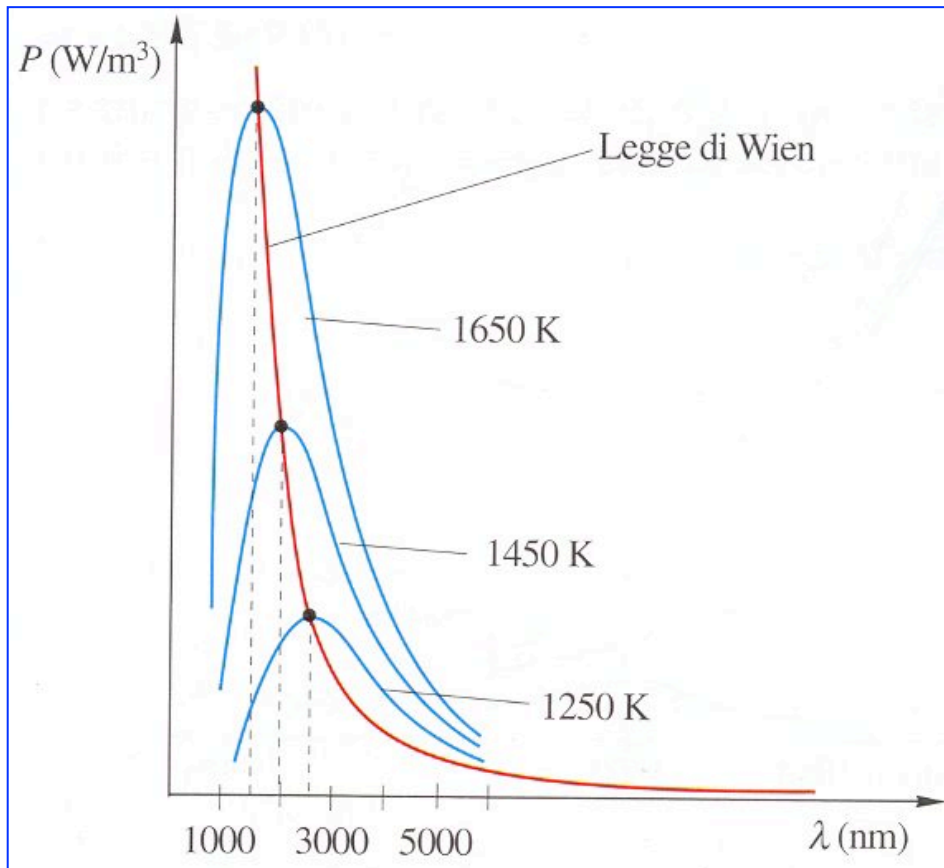
dove e è l' emissività del corpo e σ la costante di Stefan-Boltzmann.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma S(T^4 - T_0^4)$$


Se $T > T_0$ si ha un trasferimento netto di energia dal corpo all'ambiente, in conseguenza del quale il corpo si raffredda.

Se $T < T_0$ il corpo riceve energia dall'ambiente e si riscalda.

Se $T = T_0$ (equilibrio termico) nonostante l'energia continui ad essere trasferita nelle due direzioni, l'energia emessa e quella assorbita si bilanciano.

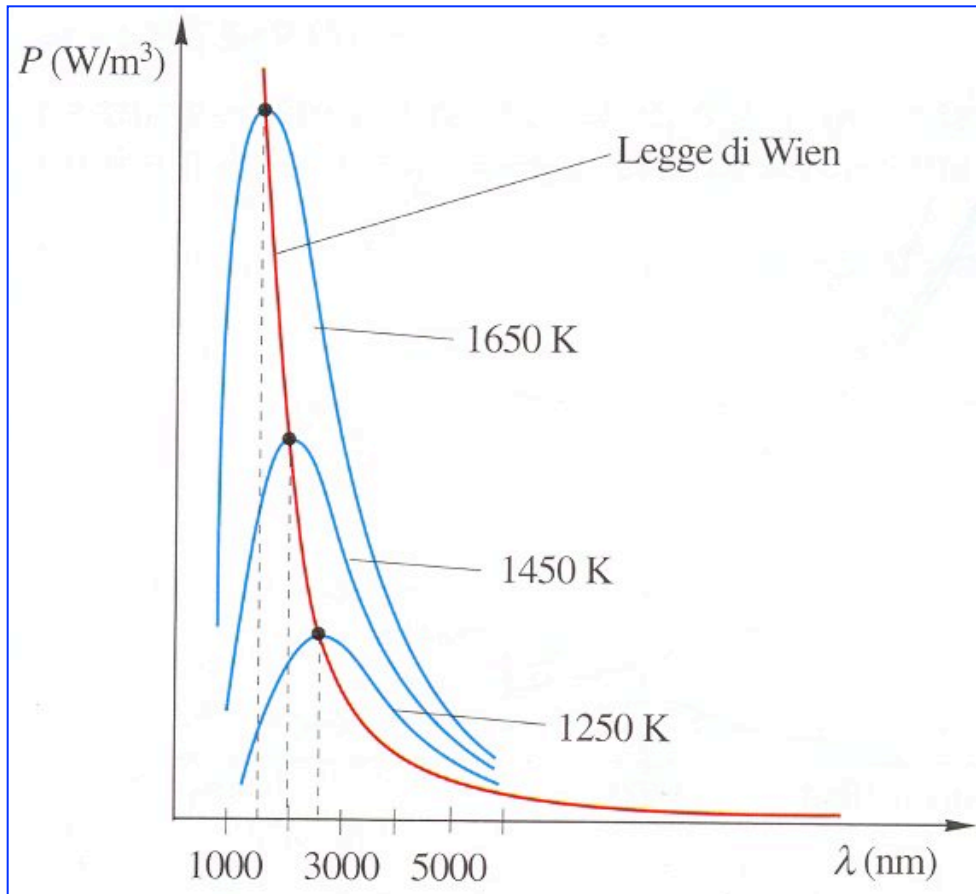


LEGGE DELLO SPOSTAMENTO

Il valore massimo della potenza emessa da un corpo nero si sposta, all'aumentare della temperatura, verso lunghezze d'onda minori:

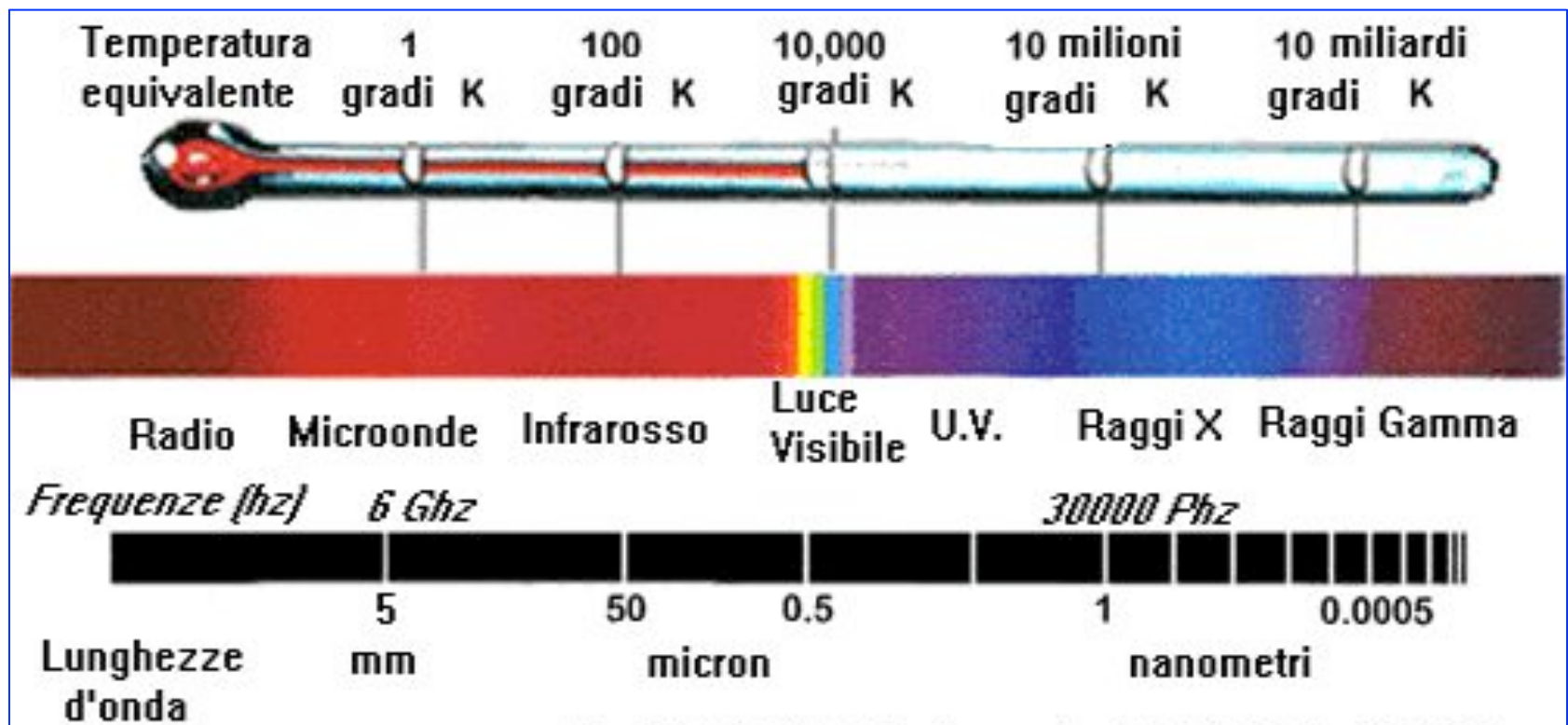
$$\lambda_{\text{max}} T = b$$

λ_{max} = lunghezza d'onda per la quale l'emissione è massima;
 T = temperatura assoluta della sorgente; $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$.

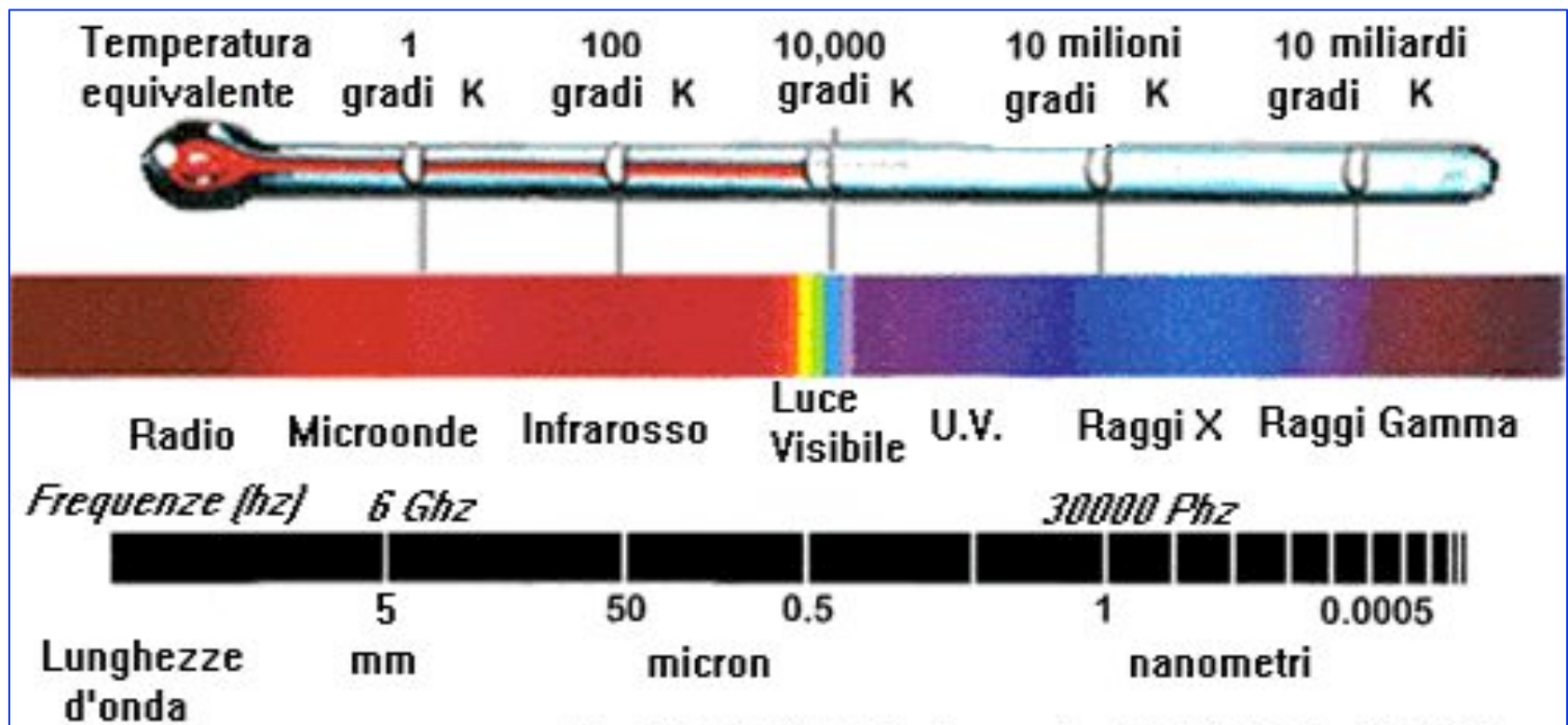


Al crescere della temperatura le onde elettromagnetiche emesse da una sorgente a temperatura T , tendono, nel loro complesso, ad assumere lunghezze d'onda sempre più basse (frequenze più alte).

Il corpo emittente acquista un colore sempre più chiaro.



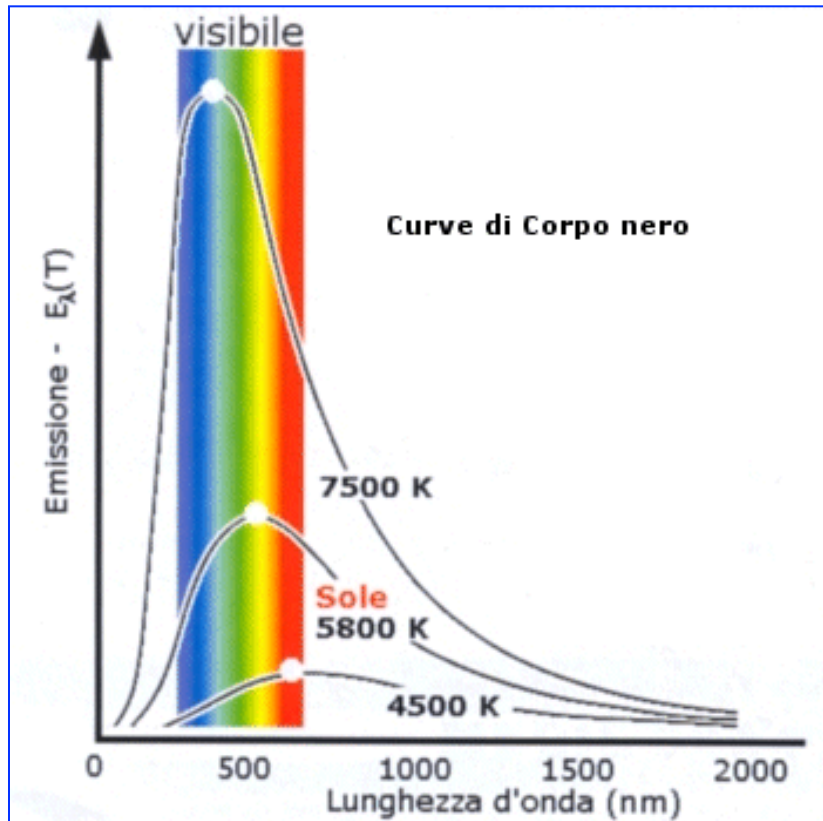
Le radiazioni, dapprima invisibili all'occhio, all'aumentare di T (diminuzione di λ) si spostano verso il visibile, fino a che il corpo assume il colore bianco intorno ai $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ai $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ per un corpo metallico). A questo punto nelle onde elettromagnetiche emesse dalla sorgente sono presenti tutte le frequenze (colori) dello spettro visibile.



Aumentando ancora la temperatura, il corpo tende a diventare quasi invisibile, perché nell'emissione predominano le radiazioni ultraviolette, non rilevabili dall'occhio umano.

La correlazione fra la lunghezza d'onda corrispondente al massimo dell'intensità della radiazione e la temperatura assoluta trova un'applicazione pratica in astrofisica per la misura delle temperature stellari e in genere ogni volta che si vuole conoscere, attraverso le radiazioni emesse, la temperatura di un ambiente assimilabile a un corpo nero.

Esercizio. Determinare la temperatura superficiale del Sole, nell'ipotesi di corpo nero, considerando che si registra un massimo di intensità di emissione di radiazioni alla lunghezza d'onda di 500 nm.



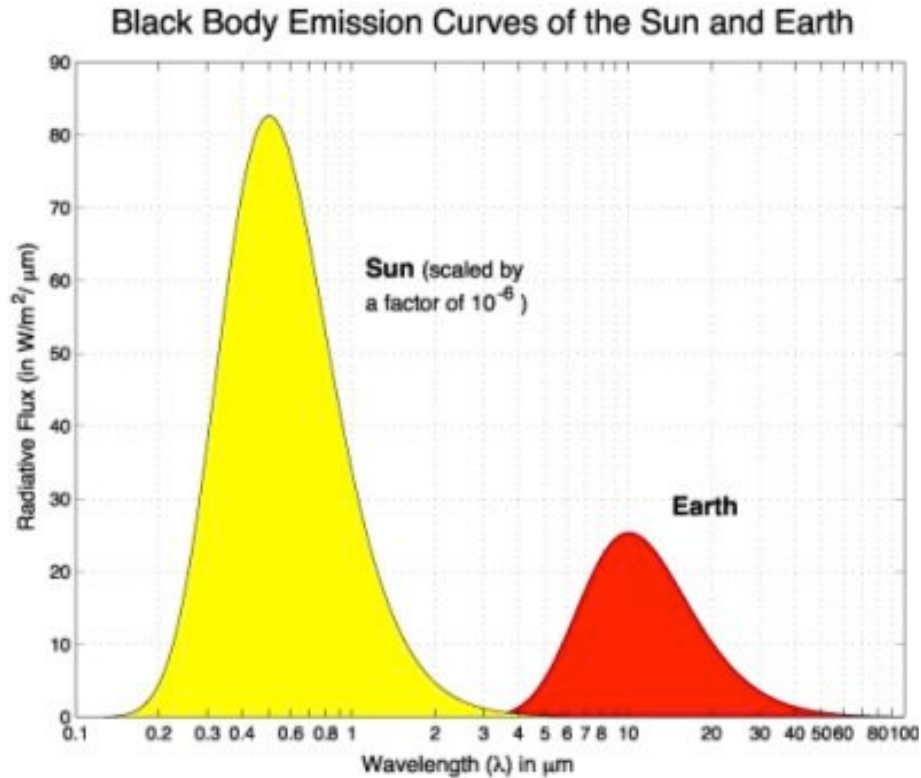
Il massimo della curva è dato dalla legge di Wien:

$$\lambda_{\max} T = b$$

da cui:

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{500 \cdot 10^{-9}} = 5796 \text{ K}$$

Cosa si ottiene per la Terra?



Dal grafico si osserva che il massimo di intensità di emissione di radiazioni si ha alla lunghezza d'onda di circa $10 \mu\text{m}$ (nell'infrarosso).

Quindi:

$$T = \frac{b}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} \cong 290\text{K} \cong 17^\circ\text{C}$$