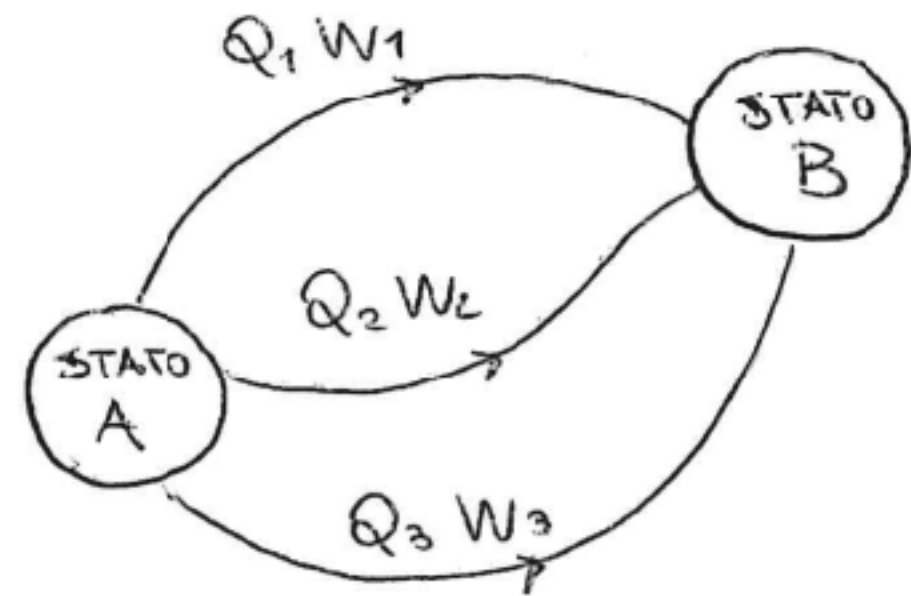


Recap

• I° principio della Termodinamica:

Dato un sistema che compie una trasformazione generica dallo stato A allo stato B, scambiando lavoro e calore con l'ambiente, la quantità $(Q-W)$ risulta indipendente dalla trasformazione:

$$2) \quad Q-W = \Delta U, \quad Q = \Delta U + W$$



$$Q_1 - W_1 = Q_2 - W_2 = Q_3 - W_3 = U_B - U_A$$

Recap

Calorimetria:

• Calore scambiato da una quantità m di una sostanza che passa da T_i a T_f :

$$i) \quad Q = mc(T_{\text{fin}} - T_{\text{in}}) \quad dQ = mc dT$$

$$c: \text{Calore specifico; u.d.m. } [J/kgK] \quad c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}$$

↳ È una grandezza caratteristica della sostanza che in genere può dipendere dalla temperatura.

• $C = cm$: CAPACITÀ TERMICA; u.d.m. $[J/K]$

↳ Dipende dal tipo di sostanza (tramite c (e quindi può dipendere dalla temperatura) - e dalla massa della sostanza.

Calore specifico molare:

$$c = \frac{1}{n} \frac{dQ}{dT}$$

Recap

Cambiamenti di fase:

Sono processi Termodinamici ISOTERMI ($T = \text{cost}$) in cui una sostanza passa da una fase (o stato) all'altra. - solido \leftrightarrow liquido \leftrightarrow vapore \leftrightarrow solido.

Il calore richiesto per il cambiamento di fase di una sostanza è:

$$Q = m \lambda$$

λ : Calore Latente; u.d.m. [J/kg] \rightarrow quantità di calore per unità di massa necessario per avere un cambiamento di fase.

Esempio: Energia, Lavoro, Calore e cambio di fase

Si consideri una massa d'acqua allo stato liquido confinata in un contenitore adiabatico a contatto con una sorgente di calore che mantiene costante la temperatura a $T=100^\circ\text{C}$. L'acqua passa dallo stato liquido a quello di vapore espandendosi a pressione costante.

i) Lavoro compiuto nella trasformazione

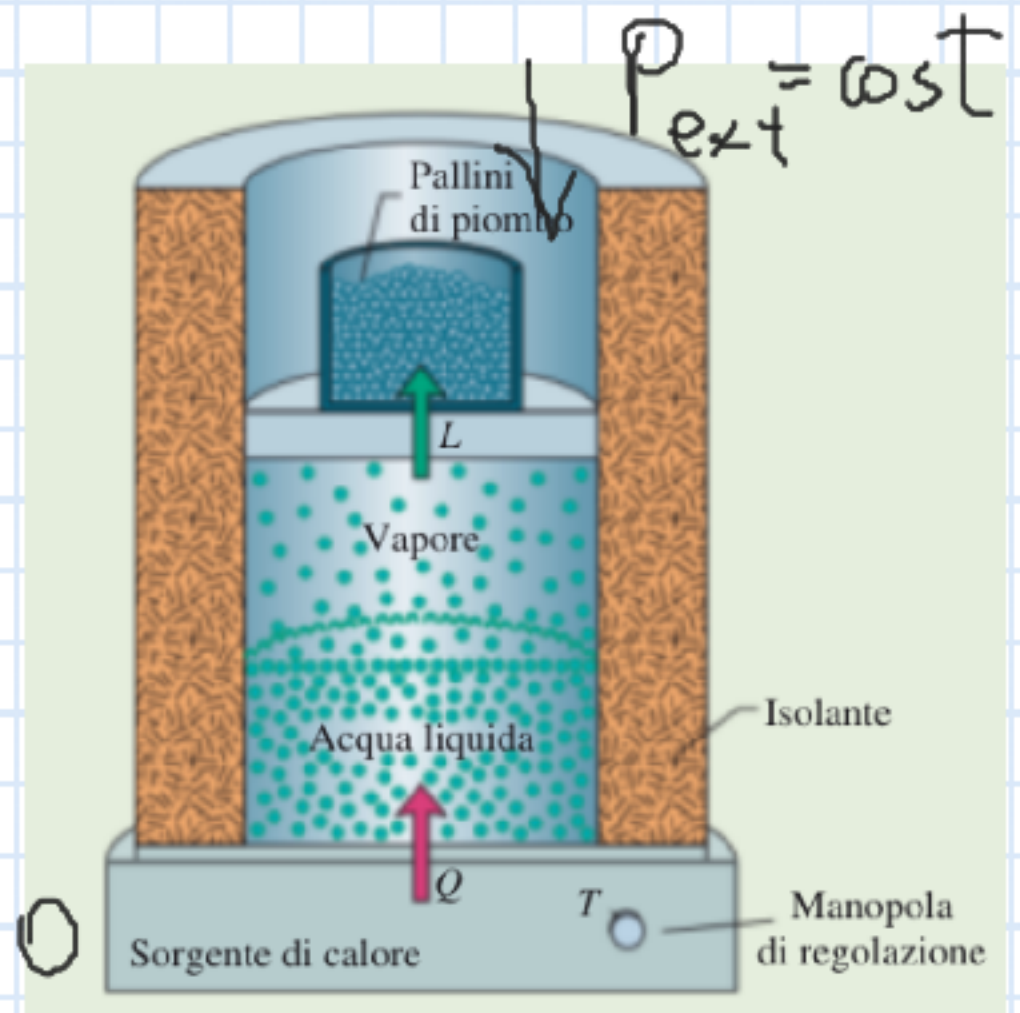
$$W = \int_{V_i}^{V_f} dV p(V) = p_{\text{ext}} \int_{V_i}^{V_{f,m}} dV = p_{\text{ext}} (V_f - V_i) > 0$$

ii) Calore fornito dalla sorgente al sistema

$$T = \text{cost}$$

$$Q = m_{\text{H}_2\text{O}} \lambda^{\text{ev}}$$

$$\lambda^{\text{ev}}_{\text{H}_2\text{O}} = 2256 \text{ [kJ/kg]}$$

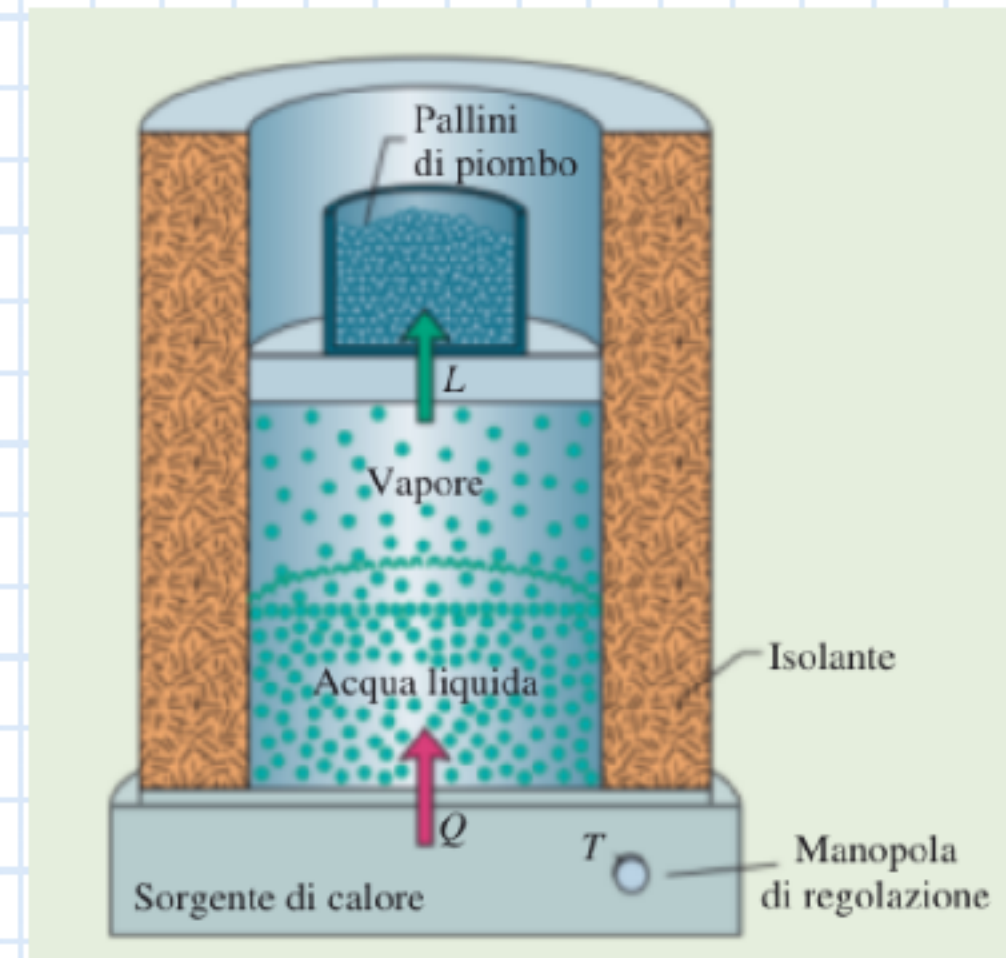


Esempio: Energia, Lavoro, Calore e cambio di fase

Si consideri una massa d'acqua allo stato liquido confinata in un contenitore adiabatico a contatto con una sorgente di calore che mantiene costante la temperatura a $T=100^{\circ}\text{C}$. L'acqua passa dallo stato liquido a quello di vapore espandendosi a pressione costante.

(ii) Variazione Energia Interna

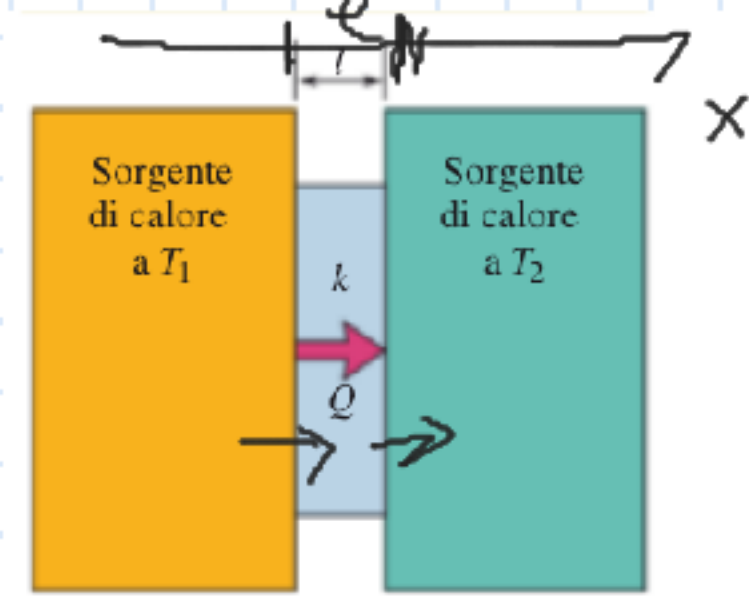
$$\Delta U = Q - W = m_{\text{H}_2\text{O}} \lambda - P_{\text{ext}} (V_f - V_i)$$



Trasmissione del calore:

Esistono 3 distinti meccanismi di trasmissione del calore:

CONDUZIONE, CONVEZIONE e IRRAGGIAMENTO. I 3 meccanismi operano SEMPRE in presenza di una differenza di temperatura



$$T_1 > T_2$$

Figura 18.18 Conduzione termica. Il calore viene trasferito da un serbatoio a temperatura T_1 a un serbatoio più freddo a temperatura T_2 attraverso una lastra di conduzione di spessore l e conducibilità termica k .

Conduzione:

$$T_{eq}(x) = \text{cost} \quad (\text{Regime Stazionario})$$

$$Q = k \frac{T_1 - T_2}{e} S t \rightarrow \text{INTERVALLO DI TEMPO}$$

Condobilità termica: $\text{W/m} \left[\frac{\text{J}}{\text{msK}} \right]$

METALLI: $k \sim 10 - 10^2$

GAS / DIELETRICI $k \sim 10^{-1} / 10^{-2}$

TABELLA 18.6 Valori di conducibilità termica* di alcune sostanze

Sostanza	k (W/m · K)
<i>Metalli</i>	
Acciaio inossidabile	14
Piombo	35
Alluminio	235
Rame	401
Argento	428
<i>Gas</i>	
Aria (secca)	0,026
Elio	0,15
Idrogeno	0,18
<i>Materiali edili</i>	
Poliuretano espanso	0,024
Lana di roccia	0,043
Lana di vetro	0,048
Legno di pino bianco	0,11
Vetro per finestra	1,0

* La conducibilità cambia leggermente con la temperatura. I valori dati sono per temperatura ambiente.

Conduzione:

$$c) P = \frac{Q}{t} = \frac{k_1 S (T_1 - T_x)}{e_1} = \frac{k_2 S (T_x - T_2)}{e_2}$$

$$ii) T_x = \frac{k_1 e_2 T_2 + k_2 e_1 T_1}{k_1 e_2 + k_2 e_1}$$

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{S (T_1 - T_2)}{e_1/k_1 + e_2/k_2} \quad \text{per } N \text{ lastre} \Rightarrow P = \frac{S (T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^N (e_i/k_i)}$$

$$= \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \dots + \frac{e_N}{k_N}$$

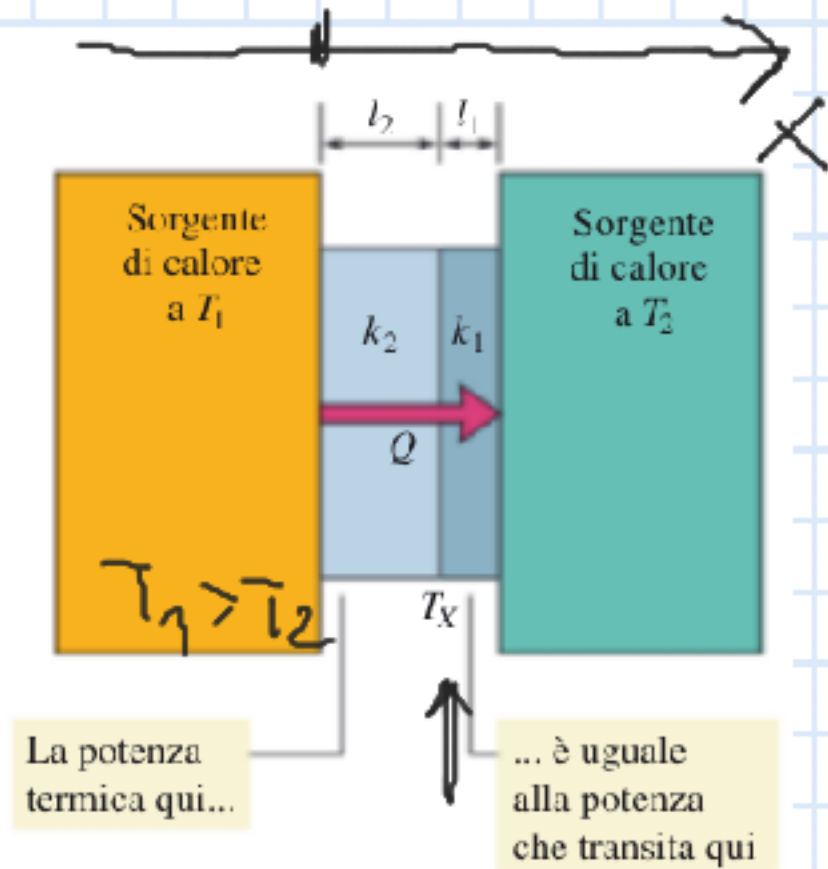
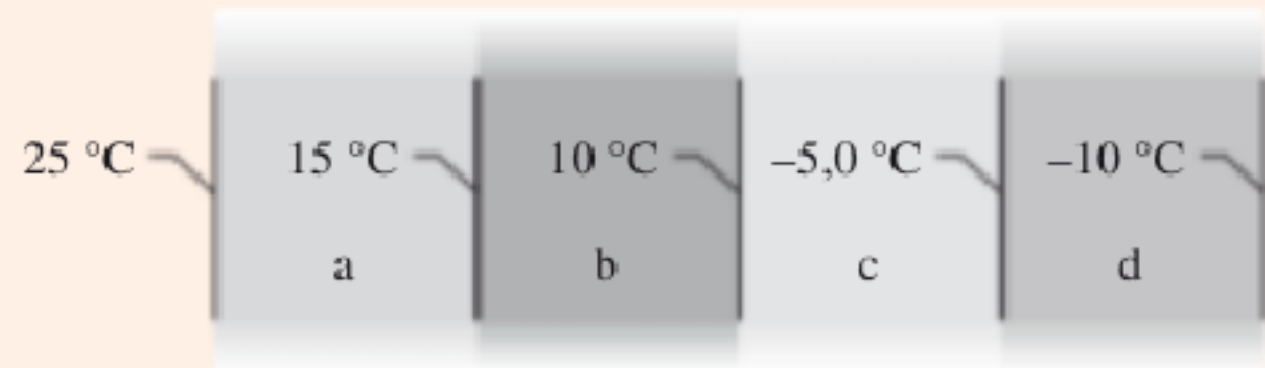


Figura 18.19 Il calore viene trasferito attraverso una lastra composta da due diversi materiali di spessore differente e diversa conducibilità termica. La temperatura all'interfaccia dei due materiali è T_x .

Esempio:

Nella figura sono indicate le temperature alle interfacce di una serie di strati composta da quattro materiali di identico spessore attraverso cui il trasferimento termico è stazionario. Ordinate i materiali secondo i valori decrescenti di conducibilità termica.



$$P = \frac{K}{e} (T_{sx} - T_{dx}) S \Rightarrow P_a = P_b = P_c = P_d$$

motore $S_a = S_b = S_c = S_d$ & $e_a = e_b = e_c = e_d$

$$K_a \underset{\substack{\text{"} \\ 10^\circ\text{C}}}{\Delta T_a} = \left[K_b \underset{\substack{\text{"} \\ 5^\circ\text{C}}}{\Delta T_b} \right] = \left[K_c \underset{\substack{\text{"} \\ 15^\circ\text{C}}}{\Delta T_c} \right] = \left[K_d \underset{\substack{\text{"} \\ 5^\circ\text{C}}}{\Delta T_d} \right]$$

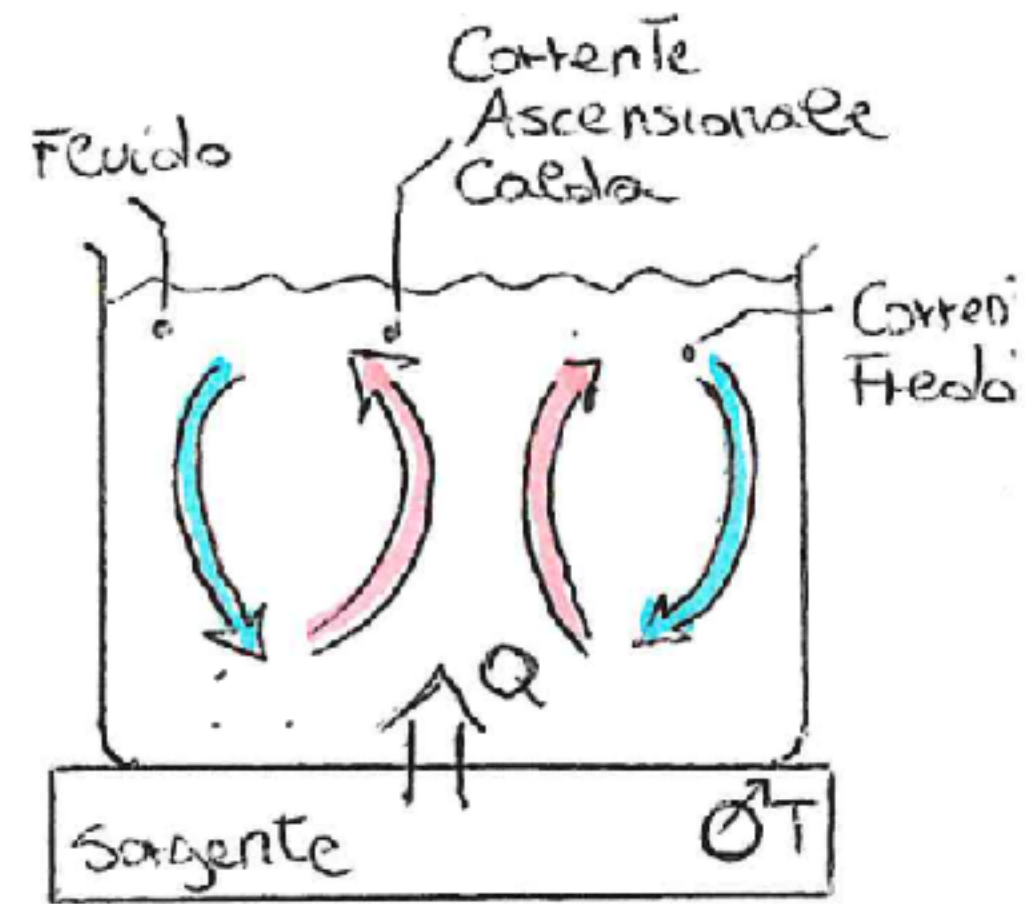
$$K_d = K_d > K_a > K_c$$

Trasmissione del calore:

Convezione

Un fluido (liquido o gas) a contatto con una sorgente a temperatura più alta

=> il passaggio di calore avviene con spostamenti di materia



Trasmissione del calore:

Irraggiamento

→ Un corpo a temperatura T emette energia sotto forma di onde elettromagnetiche che si propagano anche nel vuoto

→ la potenza emessa per irraggiamento

$$P = \sigma \epsilon A T^4$$

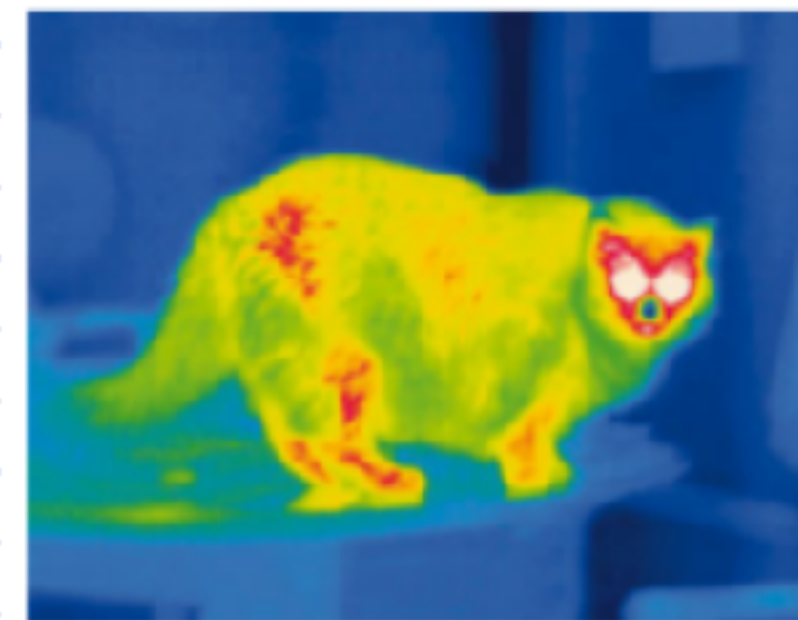
legge di Stefan Boltzmann

$$5.6703 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{s K}^4}$$

Superficie
Emissiva

Temperatura del corpo

$$\epsilon = [0, 1] \text{ Emissività } (\epsilon = 1 \text{ Corpo Nero})$$



Edward Kineman/Photo Researchers, Inc.

Figura 18.20 Una termografia in falsi colori rivela la potenza termica irraggiata da un gatto. Le potenze, dalla maggiore alla minore, sono codificate con i colori come segue: bianco, rosso, rosa, blu e nero. Si capisce come il naso sia la parte più fredda.

Trasmissione del calore:

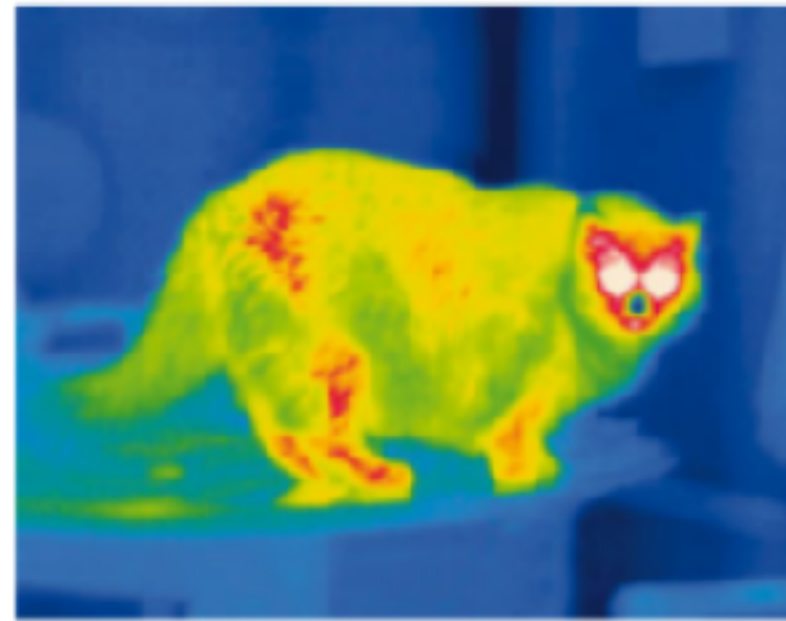
Irraggiamento

Il corpo non solo emette radiazione ma può anche assorbirla!

$$P_{\text{assorb}} = \sigma \epsilon A T_{\text{amb}}^4$$

⇒ Dal bilancio energetico della $P_{\text{em}} e P_{\text{ass}}$ dipenderà se la temperatura del corpo aumenta o diminuisce

$$P_{\text{net}} = P_{\text{assorb}} - P_{\text{emessa}} = \sigma \epsilon A (T_{\text{amb}}^4 - T_{\text{corp}}^4)$$

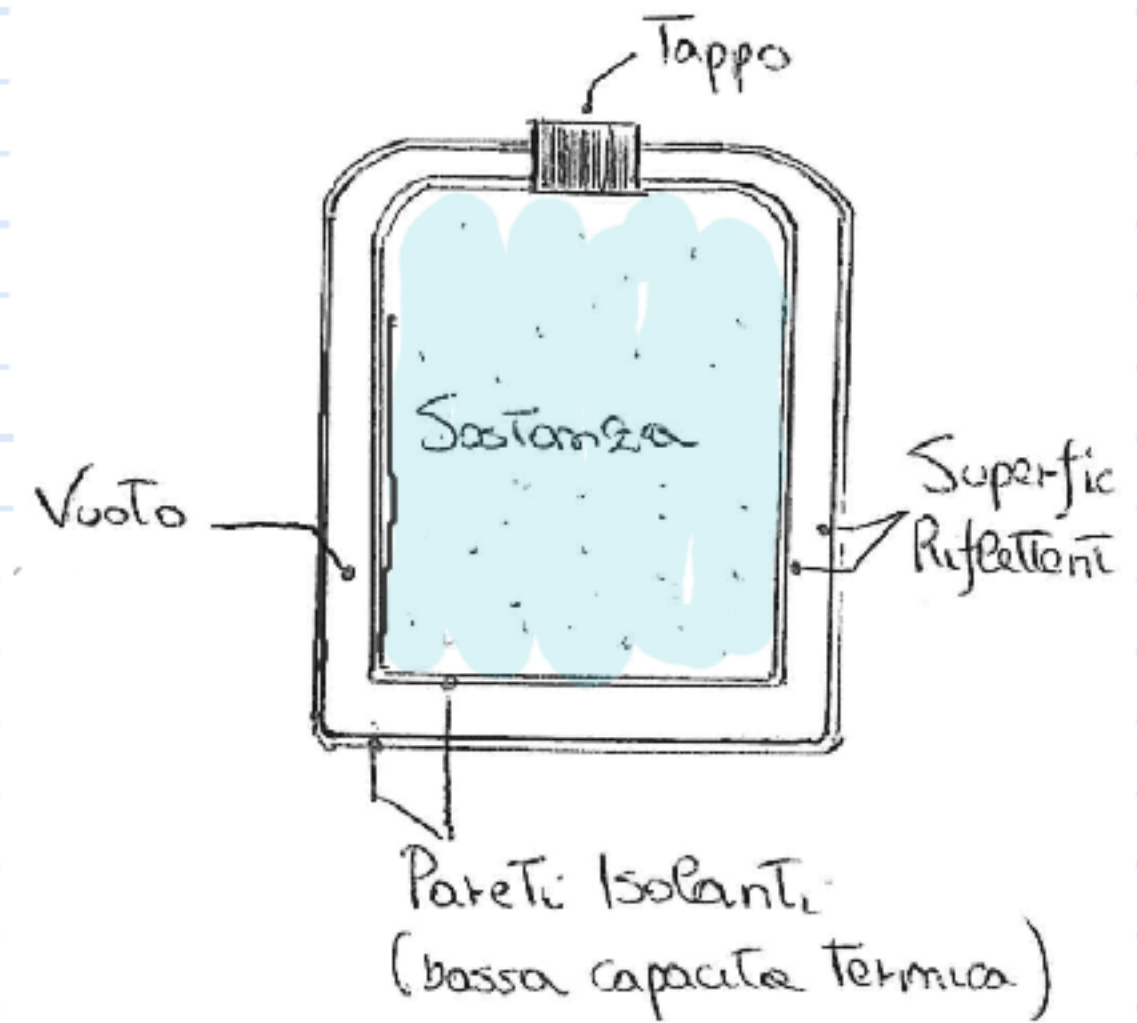


Edward Kineman/Photo Researchers, Inc.

Figura 18.20 Una termografia in falsi colori rivela la potenza termica irradiata da un gatto. Le potenze, dalla maggiore alla minore, sono codificate con i colori come segue: bianco, rosso, rosa, blu e nero. Si capisce come il naso sia la parte più fredda.

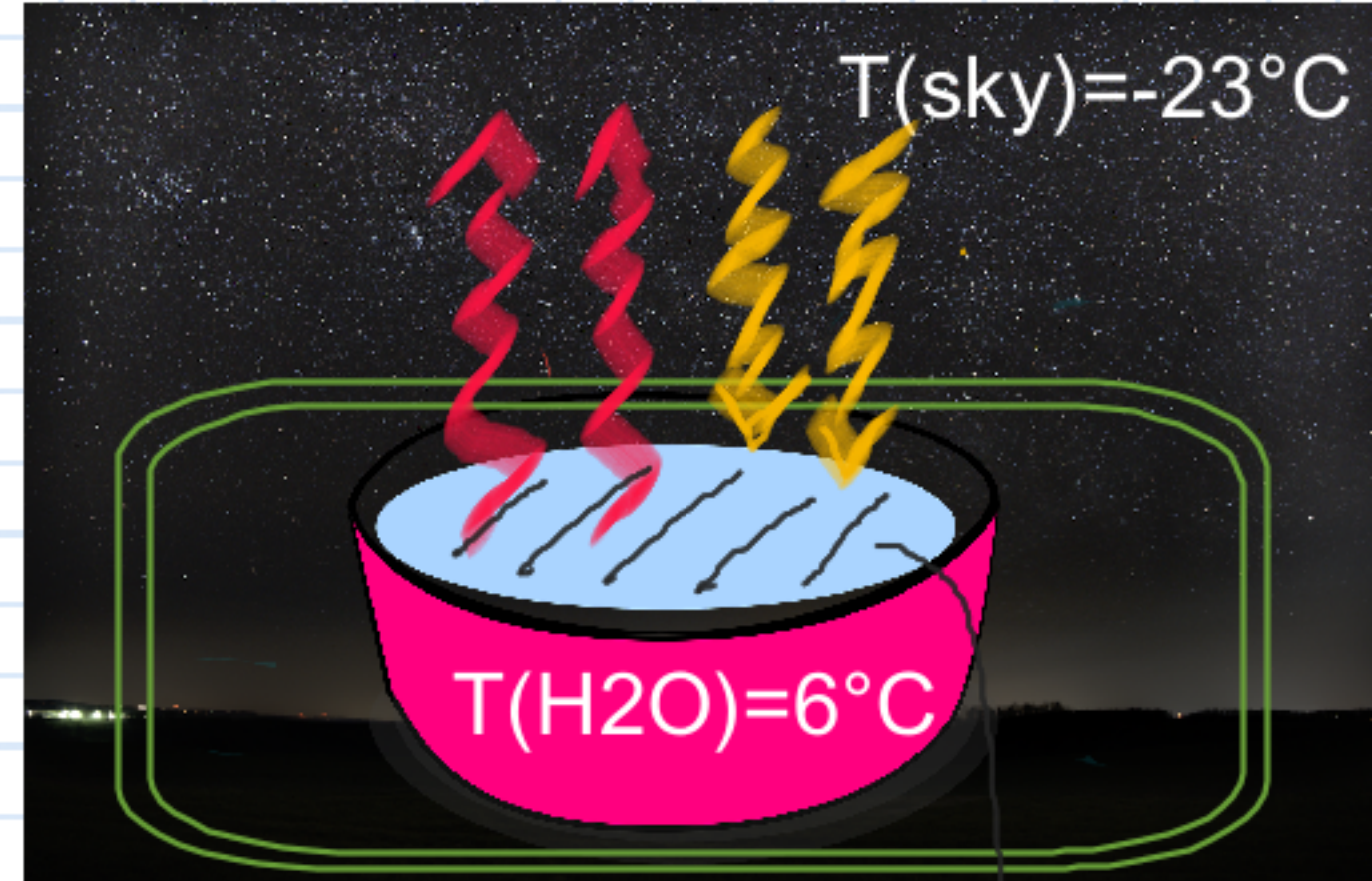
Esempio recipiente adiabatico: Vaso Dewar

- Conduttività \Rightarrow pareti con bassa conduttività termica
- Vuoto per evitare conduzione di calore per conduzione o convezione
- Superfici riflettenti per ridurre l'irraggiamento



Esempio: Irraggiamento

Si consideri una bacinella d'acqua posta in un contenitore che permetta di scambiare calore con l'ambiente solo tramite irraggiamento; assumendo che il cielo notturno agisca come un corpo nero con una temperatura equivalente di $T = -23^\circ\text{C}$, calcolare tempo necessario a far congelare una massa m di acqua a 6°C .



a) Calorie necessarie al congelamento:

$$Q_1 = cm(T_{0^\circ\text{C}} - T_c) \quad Q_2 = m \lambda_{\text{H}_2\text{O}} \quad Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2 < 0$$

b) $\Rightarrow Q/t$

$$P_{\text{met}} = P_{\text{ass}} - P_{\text{em}} = \sigma \epsilon A (T_{\text{sky}}^4 - T_{\text{H}_2\text{O}}^4) < 0$$

$A = 9 \text{ cm}^2$
 $m_{\text{H}_2\text{O}} = 4.5 \text{ g}$

$$\Rightarrow t = \frac{Q_{\text{tot}}}{P_{\text{met}}} = \frac{Q_1 + Q_2}{\sigma \epsilon A (T_{\text{sky}}^4 - T_{\text{H}_2\text{O}}^4)} \Rightarrow t = 5.9 \text{ h}$$

Dilatazione Termica Solidi & Liquidi:

→ Per variazioni piccole di temperatura $\Delta T \ll 1$

$$\Delta l = \alpha l \Delta T \Rightarrow l(T + \Delta T) = l + \Delta l = l(1 + \alpha \Delta T)$$

α = Coefficiente di dilatazione lineare v.d.m $[K^{-1}]$

$$\alpha \approx 10^{-6} K^{-1}$$

TABELLA 18.2 Coefficiente di dilatazione lineare di alcune sostanze*

Sostanza	α ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Sostanza	α ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Ghiaccio (a 0 °C)	51	Acciaio	11
Piombo	29	Vetro (ordinario)	9
Alluminio	23	Vetro (Pyrex)	3,2
Ottone	19	Diamante	1,2
Rame	17	Invar**	0,7
Calcestruzzo	12	Quarzo fuso	0,5

* Valori determinati a temperatura ambiente eccetto quello relativo al ghiaccio.

** Questa lega è stata studiata per ottenere un metallo a basso coefficiente di dilatazione lineare. Il suo nome è un'abbreviazione di «invariabile».

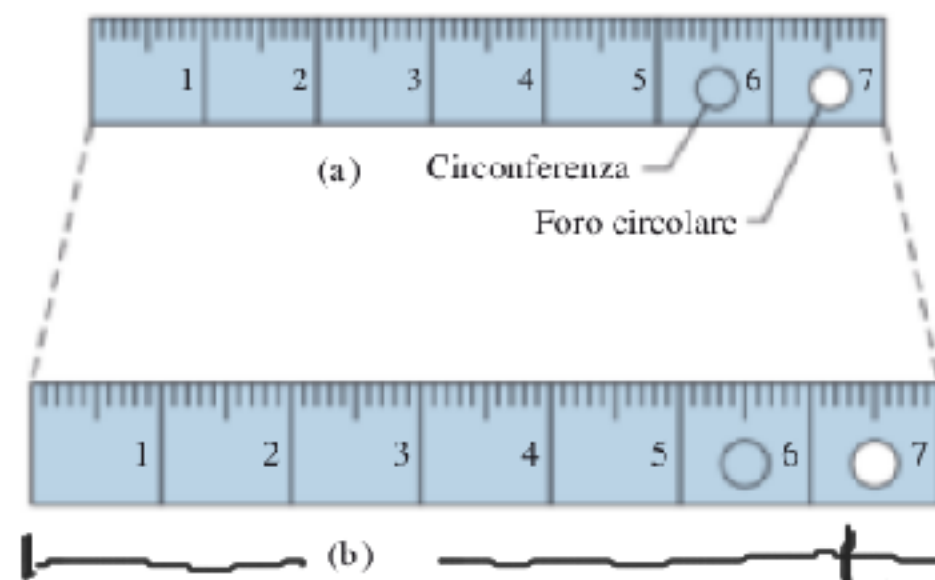


Figura 18.11 La stessa riga di acciaio a due temperature differenti. Quando si espande, ciascuna dimensione aumenta con la stessa proporzione. La scala, i numeri, lo spessore, i diametri della circonferenza e del foro circolare crescono dello stesso fattore. (La dilatazione è stata esagerata per chiarezza).

Dilatazione Termica Solidi & Liquidi:

→ Per una variazione piccola ΔT anche il volume del solido/liquido si espande:

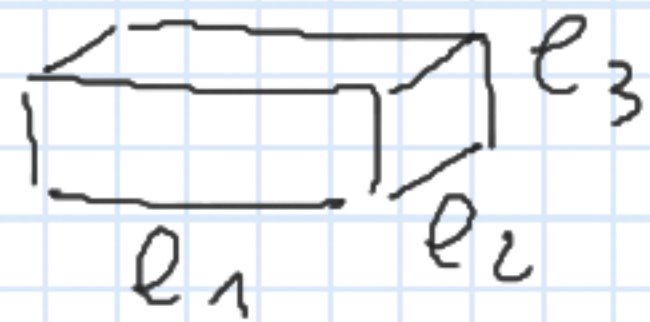
$$\Delta V = \beta V \Delta T$$

β = Coefficiente di dilatazione cubica u.d.m. $[K^{-1}]$

Per solidi isotropi $\beta = 3\alpha$

$$\therefore \beta = 3\alpha$$

S: consider un parallelepipedo e_1, e_2, e_3



Il suo volume a $T + \Delta T$ sarà:

$$V(T + \Delta T) = V_i + \Delta V = e_1(1 + \alpha \Delta T) e_2(1 + \alpha \Delta T) e_3(1 + \alpha \Delta T)$$

$$= \underbrace{e_1 \cdot e_2 \cdot e_3}_{V_i} \cdot (1 + \alpha \Delta T)^3 \approx V_i (1 + 3\alpha \Delta T) = V_i + \underbrace{3\alpha \Delta T V_i}_{\Delta V}$$

$$1 + 3 \cdot 1^2 \alpha \Delta T + 3 \cdot 1^2 (\alpha \Delta T)^2 + (\alpha \Delta T)^3$$

$\swarrow \sim 10^{-12}$ $\swarrow \sim 10^{-18}$
 ~ 0 ~ 0

ΔV

Esempio: Lastra di ferro riscaldata

Una massa di 3Kg di Fe passa da 18 °C a 20°C, alla pressione atmosferica. Calcolare la variazione di energia interna della lastra:

$$\Delta U = Q - W \approx Q = 2688 \text{ J}$$

$$Q = m c \Delta T = 2688 \text{ J} \quad c_{\text{Fe}} = 418 \text{ J/KgK}$$

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p(V) dV = p_{\text{atm}} \int_{V_i}^{V_f} dV = p_{\text{atm}} (V_f - V_i) = p_{\text{atm}} \Delta V = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

10^5 Pa

$$\Delta V = \beta V \Delta T = \underset{\sim 10^5}{3\alpha} V \underset{2}{\Delta T} = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$\rho_{\text{Fe}} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

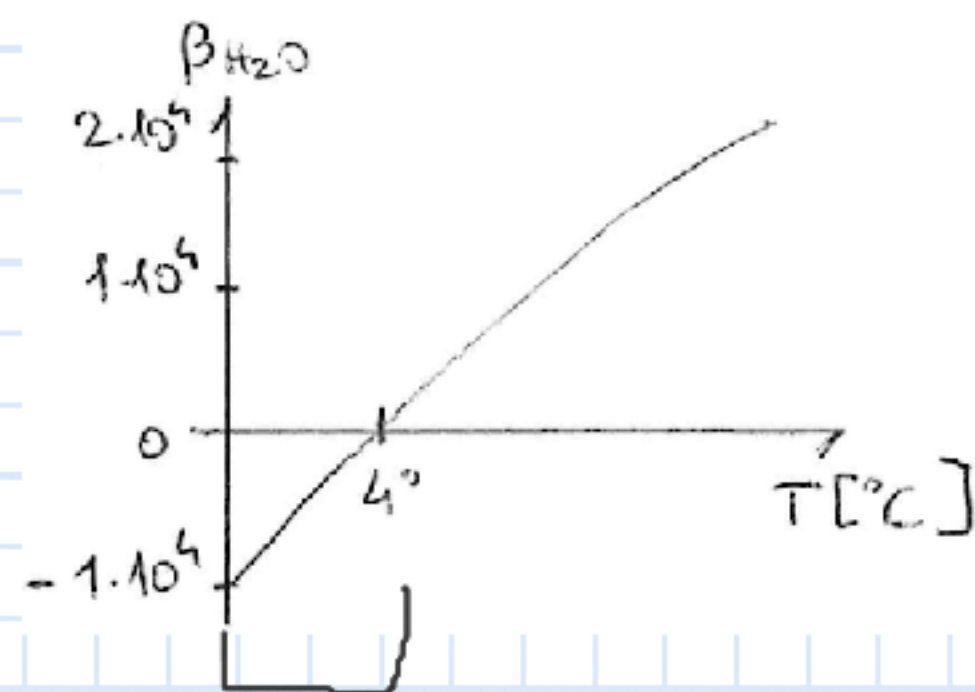
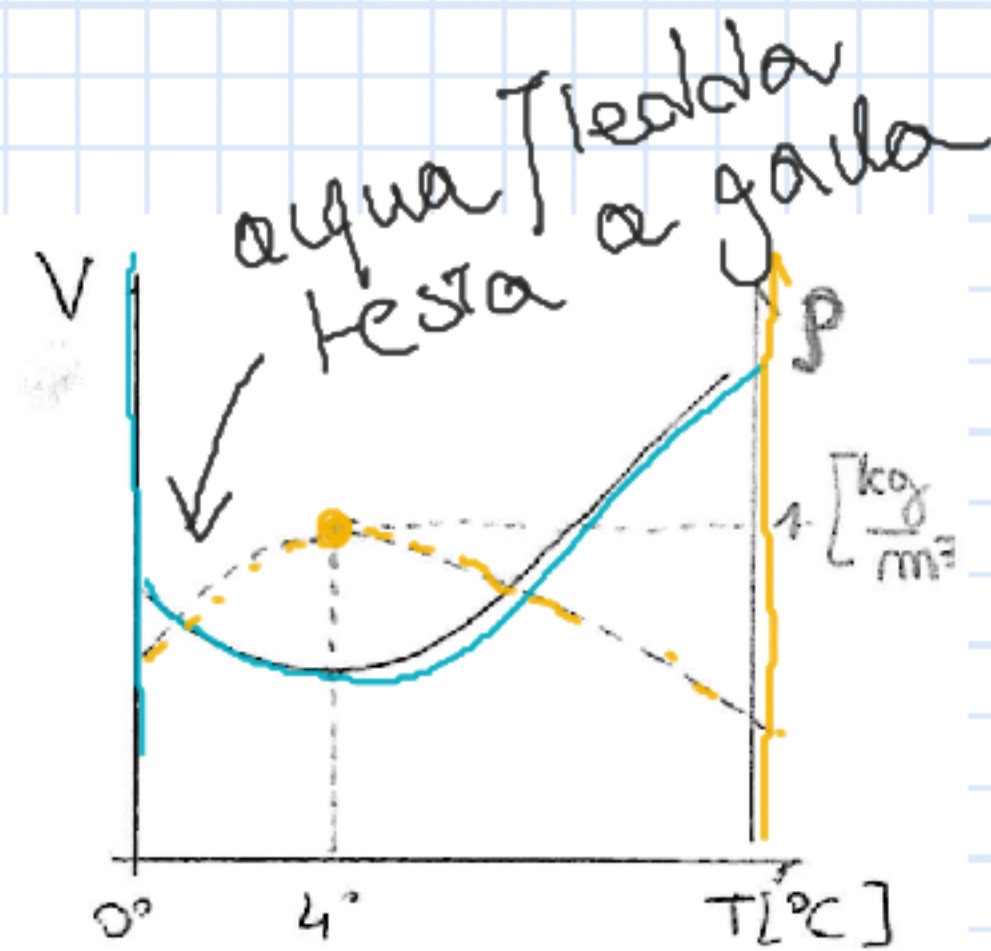
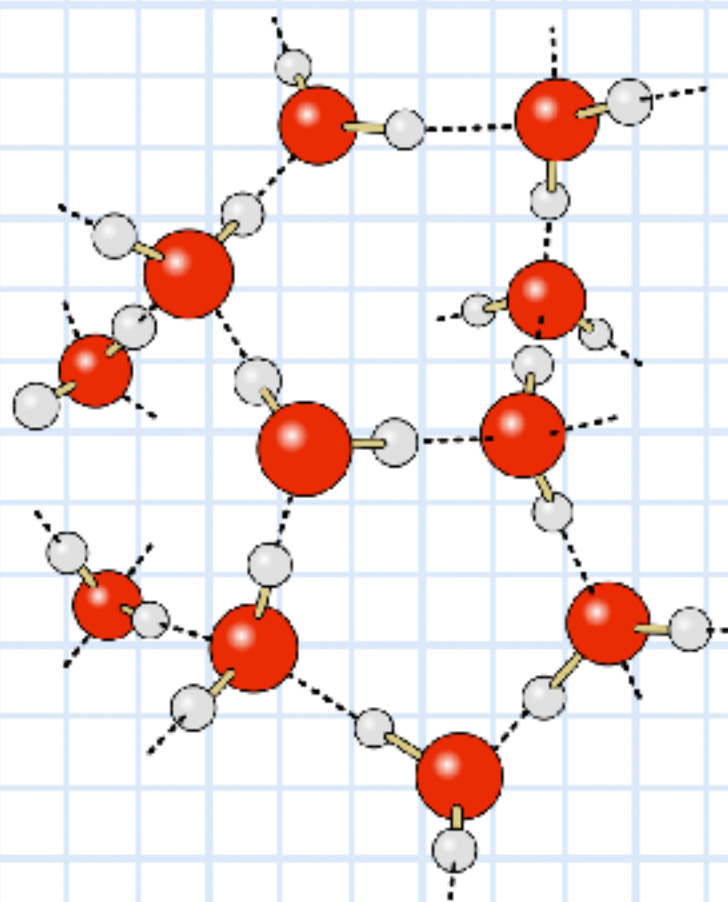
$$Q \gg W$$

Comportamento anomalo dell'acqua:

$$\Delta V = \beta V \Delta T \leq 0$$

\downarrow
 < 0

Il comportamento "anomalo" dell'acqua è dovuto alla sua struttura molecolare; abbassandone la temperatura da 4°C a 0°C si formano dei legami idrogeno tra le molecole sempre più forti che tendono ad espandere il liquido (ovvero a ridurre la densità).



il volume dell'acqua diminuisce