

## Recap:

### Equivalenza lavoro-calore:

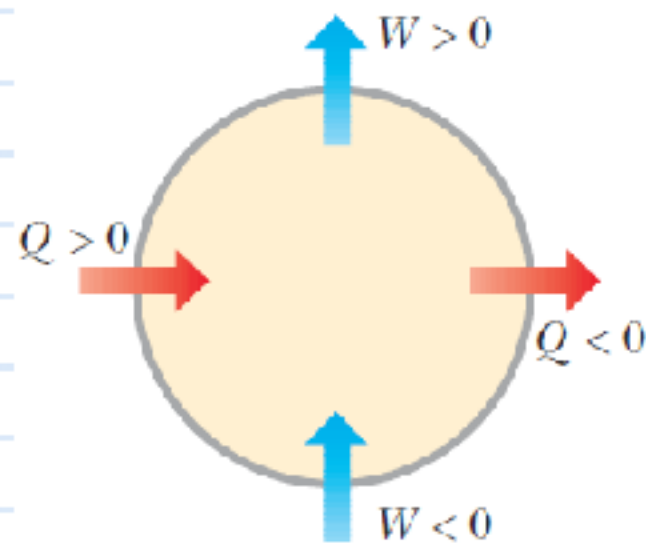
Il calore scambiato, senza lavoro esterno, per far variare la temperatura di un certo  $dT$  di una massa d'acqua è uguale al lavoro che deve essere speso, in condizioni adiabatiche, per ottenere la stessa variazione di temperatura

$$Q_{W=0} = -W_{\text{ad}}$$

Equivalenza lavoro-calore  
U.d.m. del  $Q$  [J]

- Sia calore che lavoro sono scambi di energia che avvengono tra sistema ed ambiente ~~tra~~ ~~avvenendo~~ durante le trasformazioni termodinamiche
- Il calore è l'energia scambiata tra un sistema e l'ambiente a causa della differenza di temperatura tra essi. → Vedremo che questo scambio è legato ~~è legato~~ ai moti caotici degli atomi/molecole che costituiscono il sistema/ambiente

### Convenzione segni:

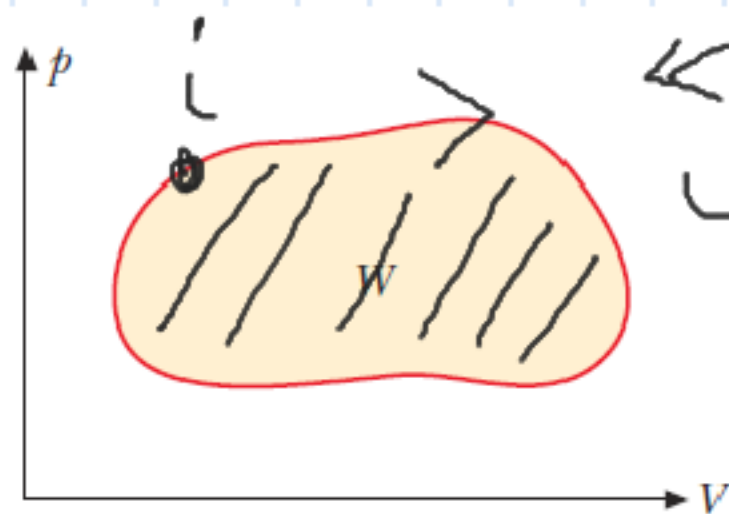
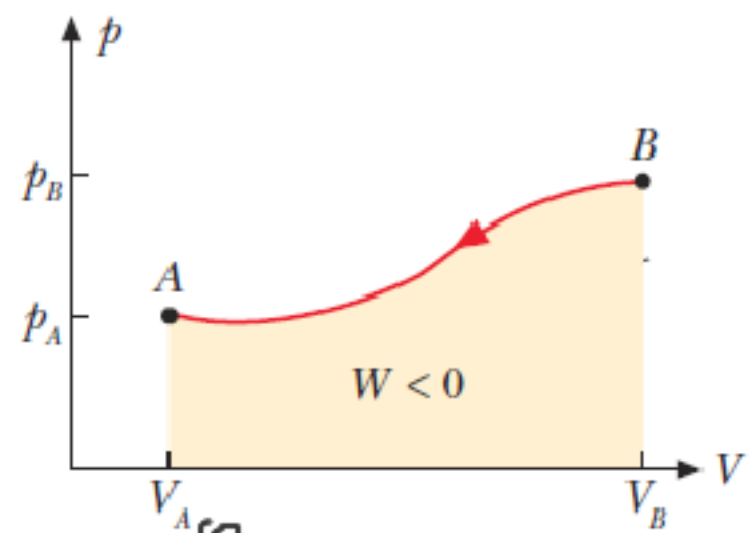
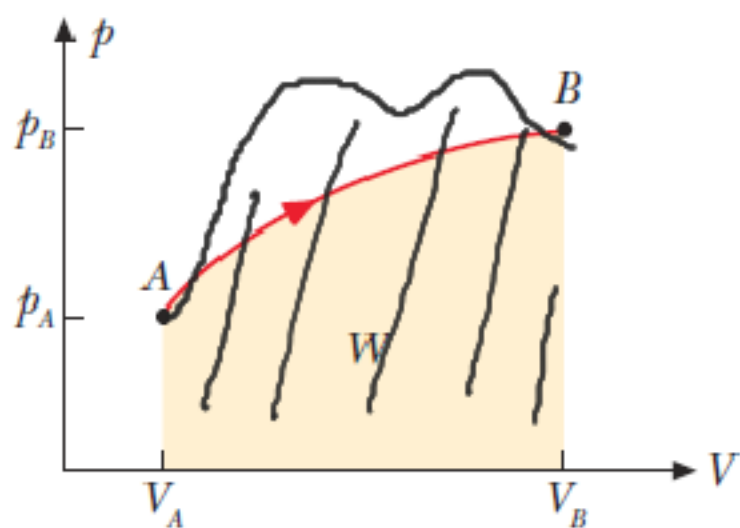


# Recap:

Lavoro in un sistema termodinamico:

$$W = \int_i^f dW = \int_{V_i}^{V_f} p(V) dV$$

in genere la pressione è funzione del volume



$W > 0$

$W < 0$

$$\int_A^B dV p(V) = - \int_B^A dV p(V)$$

1° Principio della Termodinamica:

La quantità  $Q - W$  è indipendente da come passo dallo stato A allo stato B:

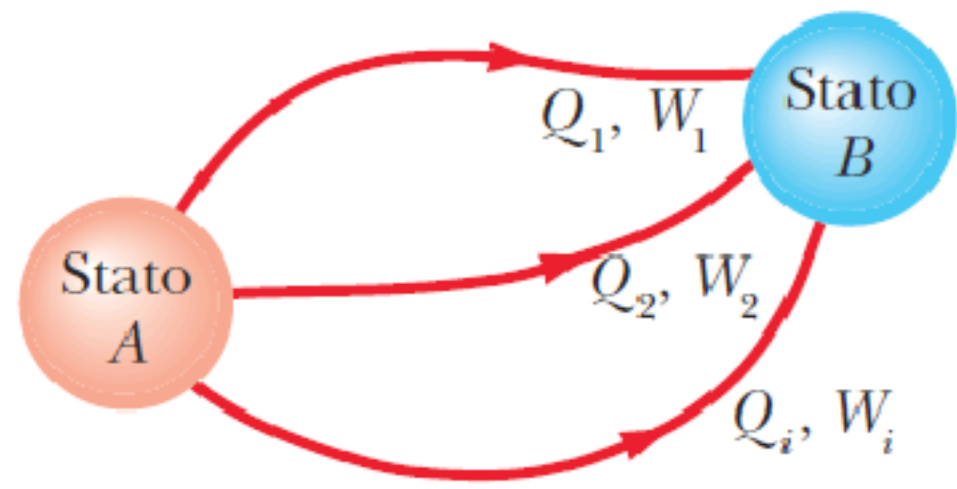
$$(i) \quad Q - W = \Delta U \quad Q = \Delta U + W$$

↓  
Variazione Energia Interna del sistema

→ Per una trasformazione infinitesima.

$$(ii) \quad dQ = dU + dW$$

$\Delta U$  è una funzione di stato (NON dipende da come passo dallo stato A allo stato B)



$$Q_1 - W_1 = Q_2 - W_2 = \dots = Q_n - W_n = U_B - U_A$$

1° Principio della Termodinamica:

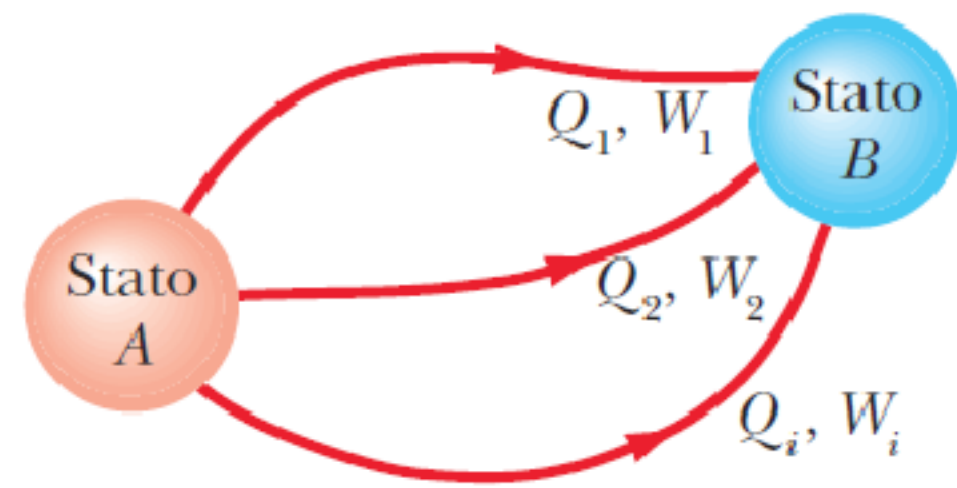
$\Rightarrow$  Per una qualsiasi trasformazione  
ciclica:

$$\Delta U = U_A - U_A = 0 = Q - W$$

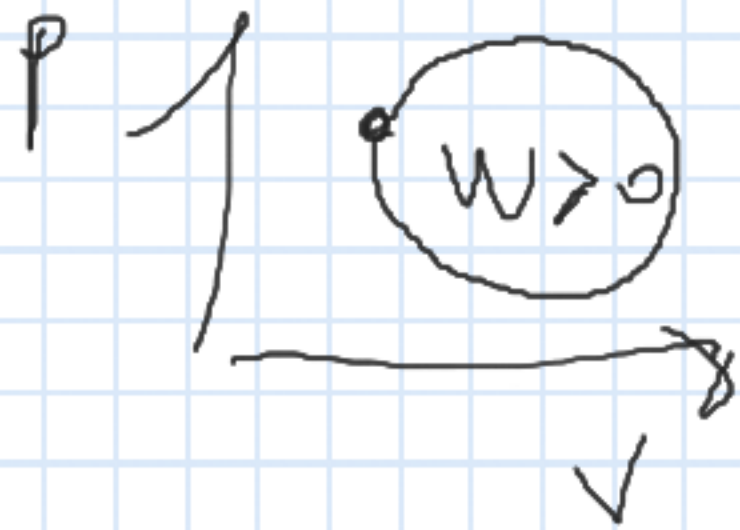
$$\boxed{Q = W}$$

$\Rightarrow \Delta U > 0$  se il sistema cede calore al sistema  
( $Q > 0$ ) ed compie lavoro  
sul sistema ( $W < 0$ )

$\Rightarrow \Delta U < 0$  se il sistema cede calore ( $Q < 0$ )  
o se il sistema compie lavoro ( $W > 0$ )



$$Q_1 - W_1 = Q_2 - W_2 = \dots = \\ = Q_n - W_n = U_B - U_A$$



## Il 1° Principio applicato ad alcune trasformazioni notevoli

• Adiabatica:  $Q = 0 \Rightarrow \Delta U = -W$

• Isocora:  $W = 0 \Rightarrow \Delta U = Q$

↓  
poiché volume  
costante

• Espansione libera di un gas

$$Q = W = 0 \Rightarrow \Delta U = 0$$

↓  
Lavoro  $\rightarrow$  nullo poiché il gas  
si espande nel vuoto, e  
quindi non è contrastato da  
nessuna pressione

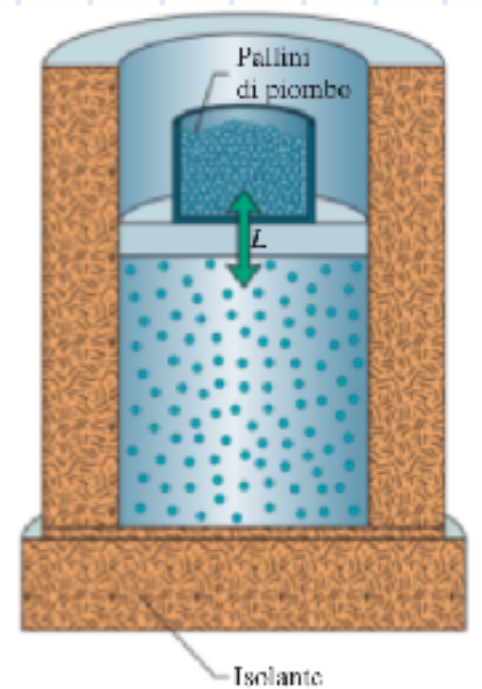


Figura 18.15 Un'espansione adiabatica può essere ottenuta togliendo lentamente i pallini di piombo dalla parte superiore del pistone. Aggiungendo dei pallini di piombo si inverte il processo a un qualunque stadio.

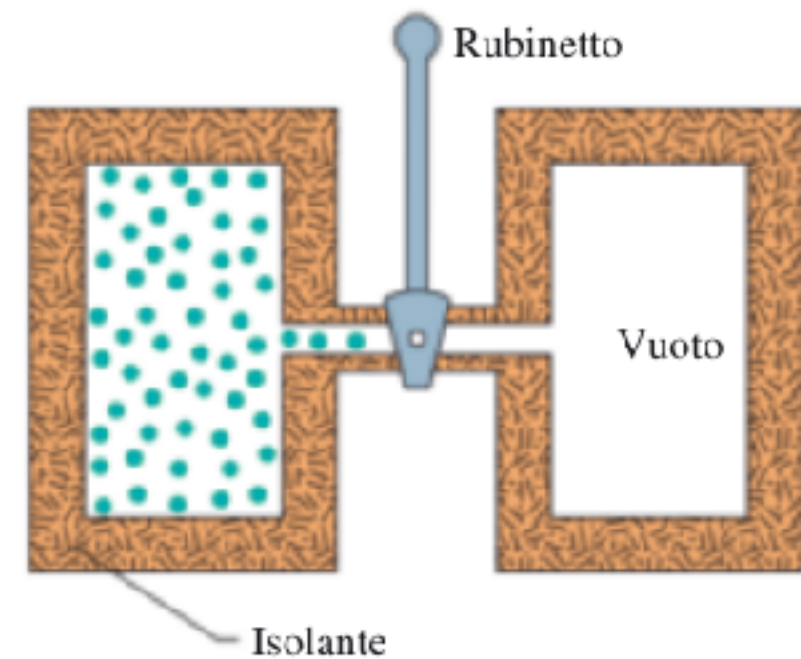
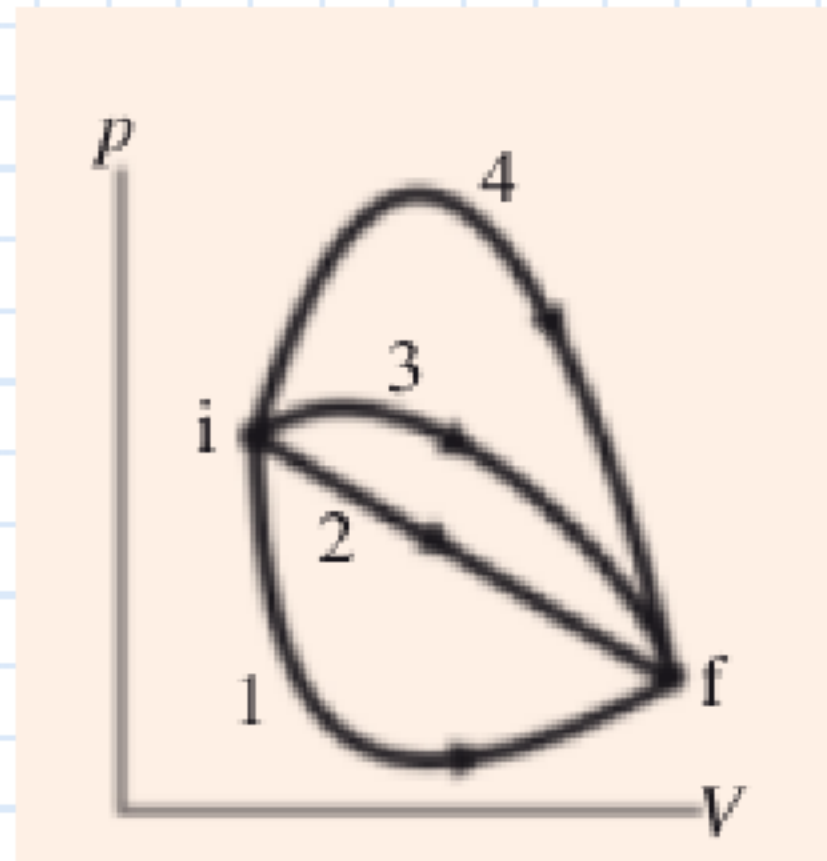


Figura 18.16 Lo stato iniziale di un processo di espansione libera. Una volta aperto il rubinetto, il gas dopo un po' raggiunge uno stato finale di equilibrio, riempiendo entrambe le camere.

## Esempio 1: Energia, Lavoro, Calore

Si considerino le 4 trasformazioni e si ordinino le rispettive: variazioni di energia interna, lavoro, e calore scambiato



$$\bullet \Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = \Delta U_4$$

poiché i & f sono uguali

$$\bullet W_4 > W_3 > W_2 > W_1 \quad \left( \begin{array}{l} \text{area sottesa} \\ \text{alla curva nel} \\ \text{piano } p-V \end{array} \right)$$

$$\bullet Q = \Delta U + W$$

$$Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4$$

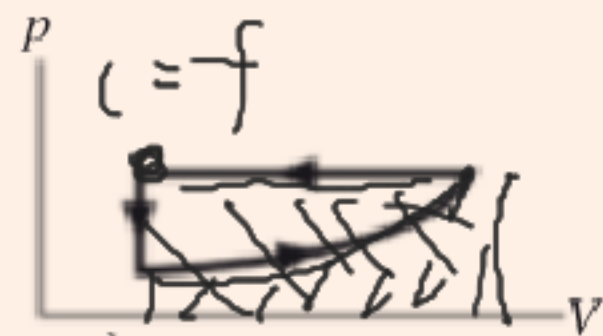
$$Q_4 = \cancel{\Delta U} + W_4 > Q_3 = \cancel{\Delta U} + W_3$$

$$\left[ \begin{array}{l} \Delta U = Q - W \\ Q = \Delta U + W \end{array} \right]$$

## Esempio 2: Energia, Lavoro, Calore

### VERIFICA 6

Per un ciclo completo come quello mostrato in questo diagramma  $p$ - $V$ , dire se (a)  $\Delta E_{\text{int}}$  del gas e (b) il calore netto trasferito  $Q$  sono positivi, negativi o nulli.



$\Delta U = 0$  poiché ciclo chiuso ( $i = f$ )

$W < 0$  poiché ciclo percorso in senso anti-orario

$$Q = \cancel{\Delta U} + W < 0$$

Calorimetria:  
Calore Specifico

$$Q = m c (T_f - T_i)$$

Calore scambiato per far  
varicare la temperatura  
di una sostanza  
da  $T_i$  a  $T_f$

$c =$  calore specifico  
[ J / kg K ]

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

$dT$  per una trasformazione  
infinitesimale

$$T_f - T_i = \frac{Q}{m c}$$

TABELLA 18.3 Calori specifici per alcune sostanze a temperatura ambiente

Sostanza	Calore specifico	
	cal/(g · K)	J/(kg · K)
<i>Solidi elementari</i>		
Piombo	0,0305	128
Tungsteno	0,0321	134
Argento	0,0564	236
Rame	0,0923	386
Alluminio	0,215	900
<i>Altri solidi</i>		
Ottone	0,092	380
Granito	0,19	790
Vetro	0,20	840
Ghiaccio (-10 °C)	0,530	2220
<i>Liquidi</i>		
Mercurio	0,033	140
Alcol etilico	0,58	2430
Acqua di mare	0,93	3900
Acqua	1,00	4190



Calorimetria:

Capacità Termica

→ dipende dal tipo di sostanza, ma anche dalla sua massa

$$C = c m$$

⇒ U.d.M [J/K]

$$Q = c m [T_f - T_i] = C [T_f - T_i]$$

Calore specifico molare

1 mol =  $6,022 \cdot 10^{23}$  particelle ( $N_A$ )

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

U.d.M

$$\left[ \frac{J}{mol \cdot K} \right]$$

↓  
 $m = \text{numero di moli} = \frac{M}{A} = \frac{M}{N_A m} \rightarrow$  massa di una particella  
↳ massa molare

## Esempio: Temperatura di Equilibrio

Due corpi a contatto all'interno di un recipiente adiabatico:

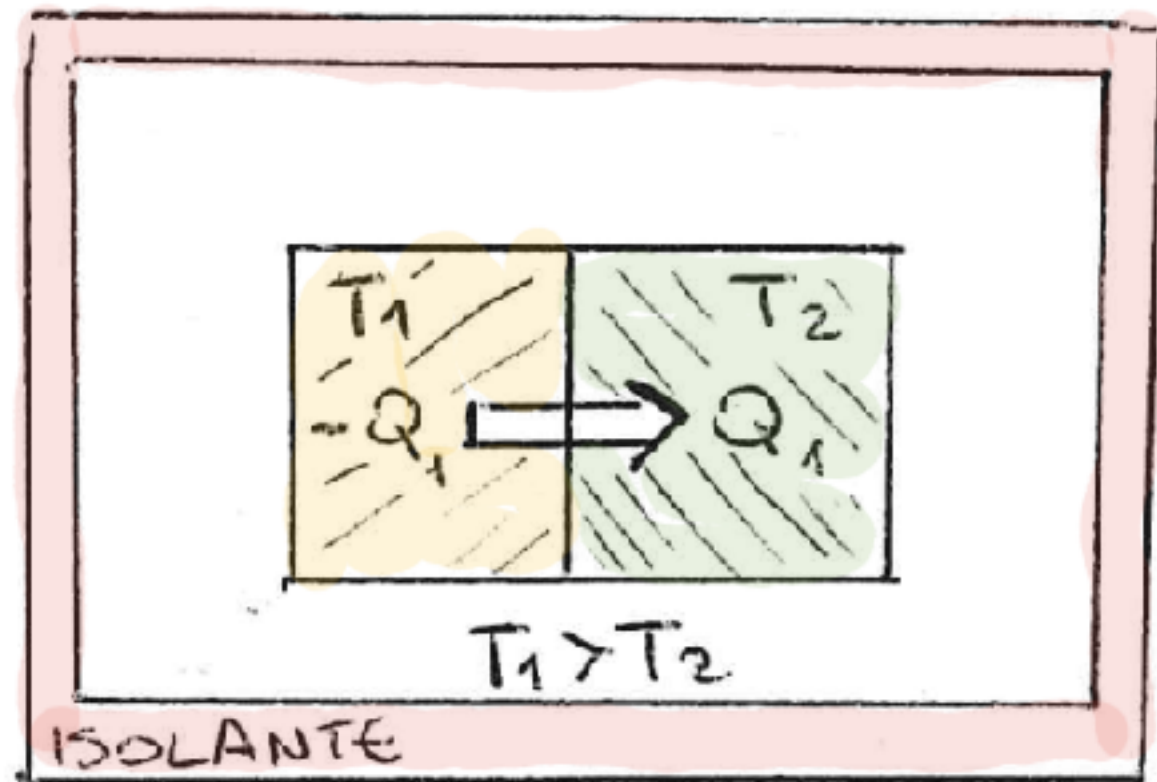
$$\Delta U_{\text{sys}} = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$$

$$\Delta U_1 = -\Delta U_2 \Rightarrow Q_1 - W_1 = -Q_2 + W_2 \quad \circ$$

$$Q_1 = -Q_2 \Rightarrow m_1 c_1 (T_{\text{eq}} - T_1) = -m_2 c_2 (T_{\text{eq}} - T_2)$$

$$T_{\text{eq}} = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$$

$$\text{Se } T_1 > T_2 \Rightarrow T_1 > T_{\text{eq}} > T_2$$



Esempio: Corpo caldo immerso in acqua

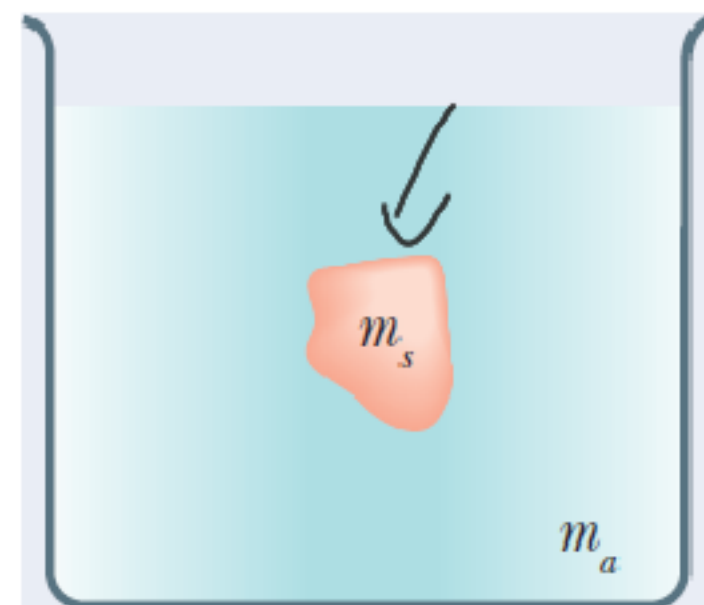
$$m_s = 0,378 \text{ Kg} \quad T_s = 95^\circ\text{C}$$

$$V_e = 2 \text{ l di H}_2\text{O} \quad T_a = 20^\circ\text{C}$$

$$T_{eq} = 21,3^\circ\text{C} \quad \Delta U_A = -\Delta U_S \Rightarrow Q_A = -Q_S$$

$$m_A c_A (T_{eq} - T_A) = -m_s c_s (T_{eq} - T_s)$$

$$c_s = \frac{m_A c_A (T_{eq} - T_A)}{m_s (T_{eq} - T_s)} = 399,7 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$



Cambiamenti di Fase:

ISOTERMI  $\Rightarrow T = \text{cost}$

Il calore necessario ad un passaggio di fase:

$$Q = m\lambda$$

$\lambda =$  Calore latente v.d.m  $[J/Kg]$

Cambiamento di fase

Terminologia

solido  $\Rightarrow$  liquido

fusione

liquido  $\Rightarrow$  solido

solidificazione

liquido  $\Rightarrow$  evaporazione

evaporazione

evaporazione  $\Rightarrow$  liquido

condensazione

solido  $\Rightarrow$  vapore

sublimazione

vapore  $\Rightarrow$  solido

brinamento (sublimazione)

Sostanza	Cambiamento fase ( $P_{atm}$ )	$\lambda [J/Kg]$
H <sub>2</sub> O	Fusione (273 K)	$3,3 \cdot 10^5$
H <sub>2</sub> O	Ebollizione (373 K)	$22,6 \cdot 10^5$
Al	Fusione (933 K)	$9 \cdot 10^4$
Al	Ebollizione (2723 K)	$11,4 \cdot 10^6$
Pb	Fusione (600 K)	$24,5 \cdot 10^3$
Pb	Ebollizione (2023 K)	$87,1 \cdot 10^4$

Esempio: Calore necessario per variare temperatura e stato

a) Calcolare calore necessario a far passare una massa d'acqua da  $T = -10^\circ\text{C}$  a  $T = 15^\circ\text{C}$

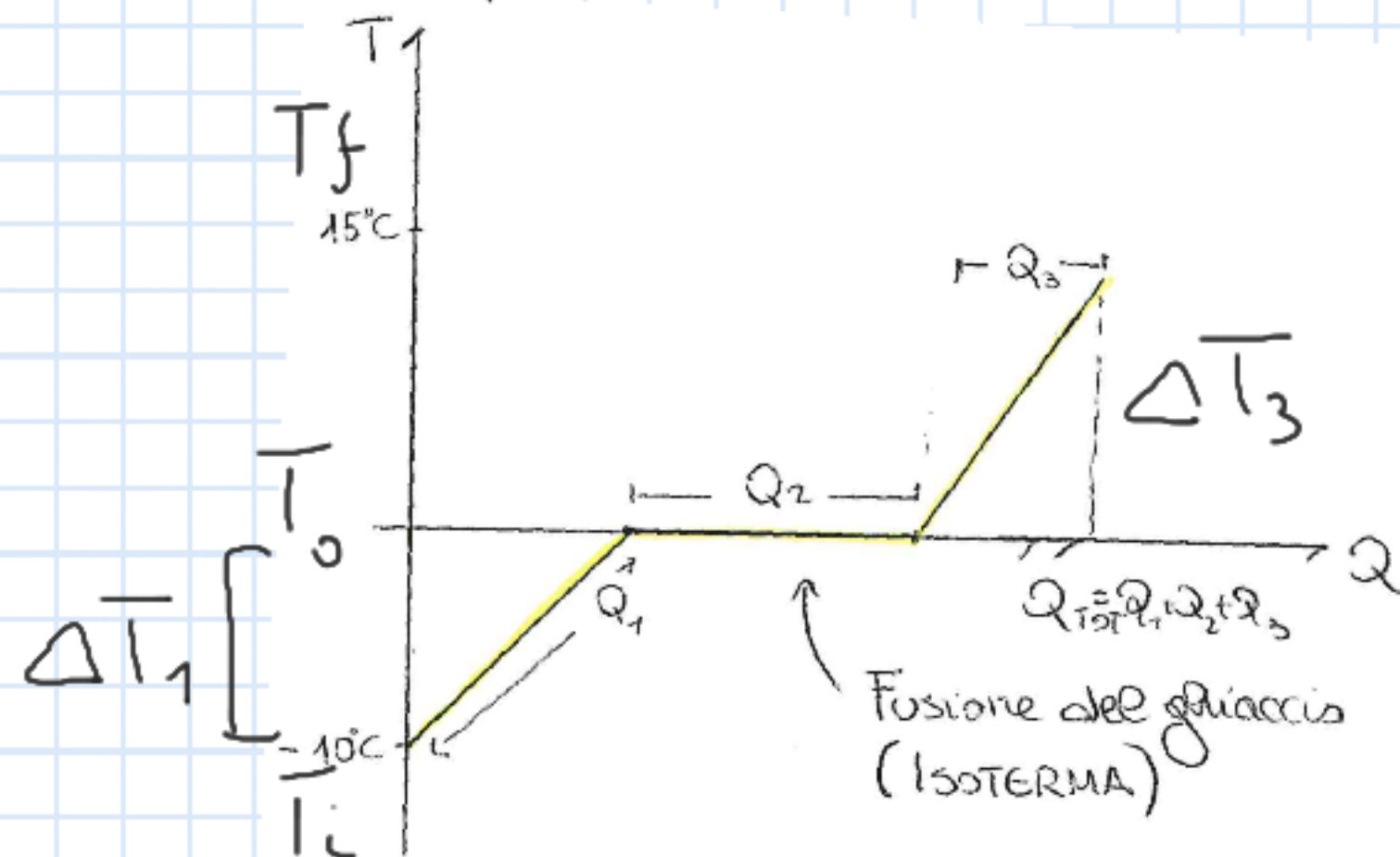
$$Q_{\text{TOT}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = * \Delta T_1$$

$$Q_1 = m_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{ice}} (T_{f,1} - T_{1,1})$$

$$Q_2 = \left. \begin{array}{l} \text{Fusione} \\ \text{H}_2\text{O} \end{array} \right\} m_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$Q_3 = m_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{liq}} \Delta T_3$$

$$* = m_{\text{H}_2\text{O}} \left( C_{\text{ice}} \Delta T_1 + \left. \begin{array}{l} \text{Fusione} \\ \text{H}_2\text{O} \end{array} \right\} + C_{\text{liq}} \Delta T_3 \right)$$



Esempio: Calore necessario per variare temperatura e stato

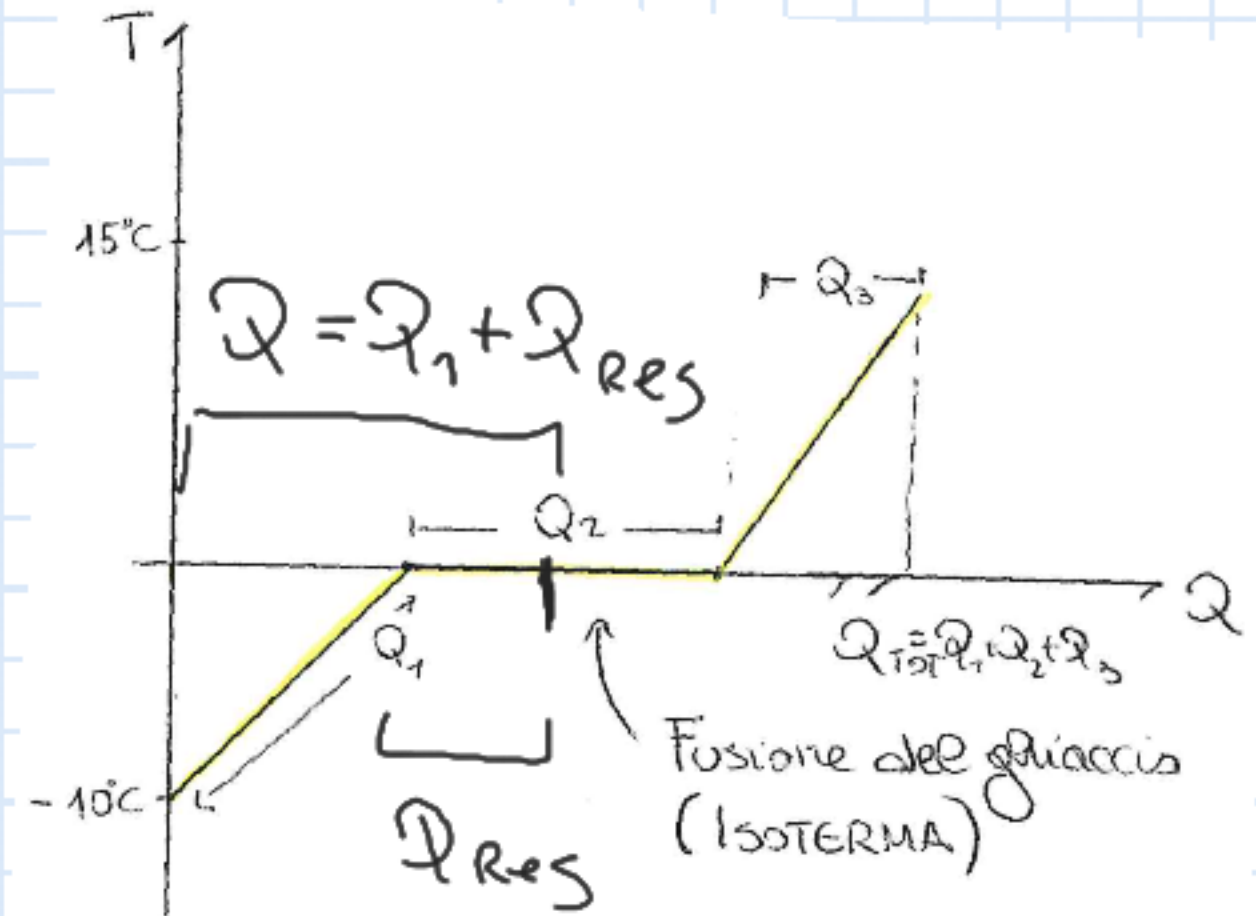
b) Si supponga di fornire  $Q_1 < Q < Q_1 + Q_2$ , quali sono lo stato e la temperatura finale dell'acqua?

$\Rightarrow$  Dato che  $Q > Q_1$ , tutto il ghiaccio raggiunge  $\phi^\circ\text{C}$

$\Rightarrow$  Poiché  $Q < Q_1 + Q_2$  solo parte dell'acqua fonderà, lasciando sia il liquido che il solido a  $\phi^\circ\text{C}$

$Q_{\text{Res}} = Q - Q_1 \Rightarrow$  Calore residuo per fondere il ghiaccio

$$m_{\text{liq}} = \frac{Q_{\text{Res}}}{L_{\text{fusione}}} < m_{\text{ice}}$$



## Esempio: Energia, Lavoro, Calore e cambio di fase

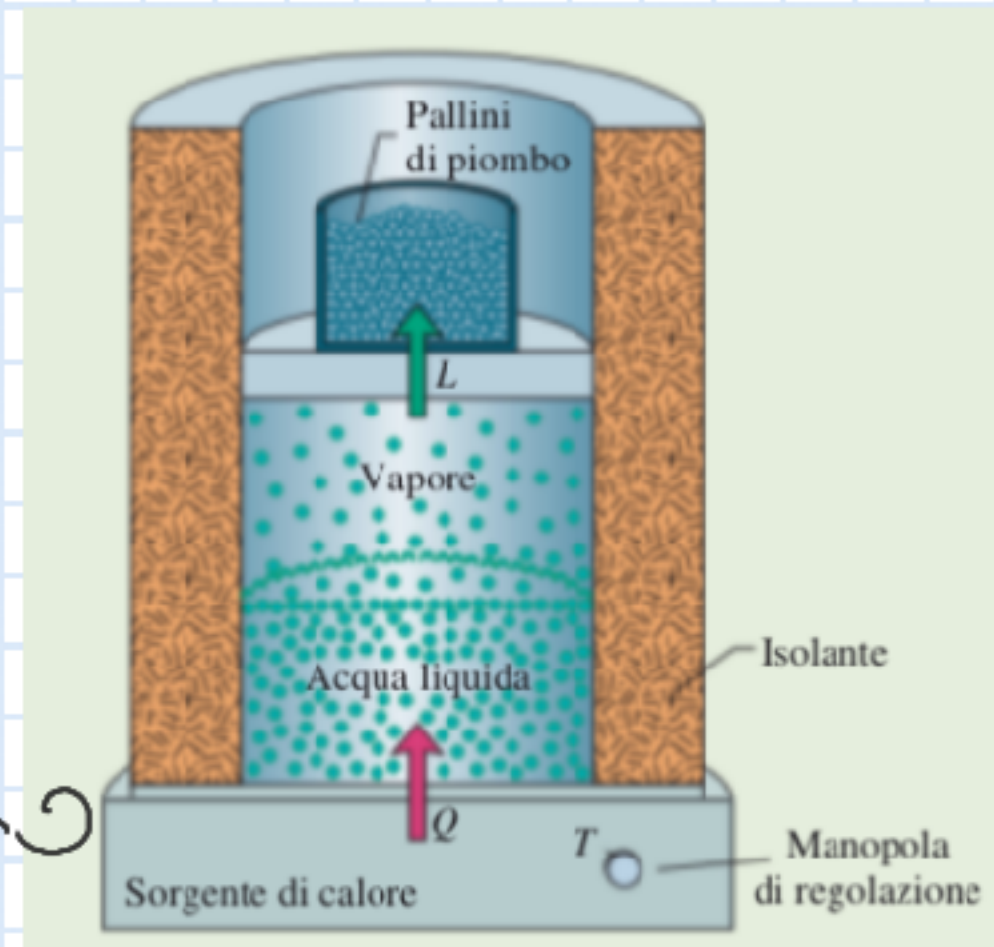
Si consideri una massa d'acqua allo stato liquido confinata in un contenitore adiabatico a contatto con una sorgente di calore che mantiene costante la temperatura a  $T=100^{\circ}\text{C}$ . L'acqua passa dallo stato liquido a quello di vapore espandendosi a pressione costante.

i) Lavoro compiuto nella trasformazione

$$p = \text{costante} \quad V_{\text{vap}} \text{ \& \ } V_{\text{liq}}$$
$$W = \int_{V_i}^f dV p(V) = p \int_{V_i}^{V_f} dV = p [V_{\text{vap}} - V_{\text{liq}}] \rightarrow \infty$$

ii) Calore fornito al sistema dalla sorgente

$$Q = m_{\text{H}_2\text{O}} \left. \begin{array}{l} \text{eup} \\ \text{H}_2\text{O} \end{array} \right\}$$



## 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.

iii) Variazione di Energia Interna

$$\Delta U = Q - W = m_{\text{acqua}} L_{\text{evp}} - p [V_{\text{vap}} - V_{\text{liq}}]$$

