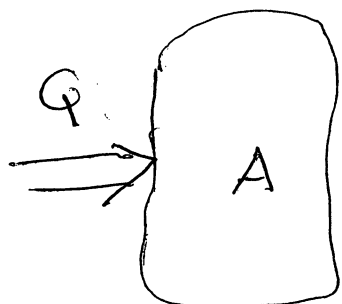


All'epoca in cui si pensava che a Q corrispondesse un fluido "calorico" che si trasferiva ~~per~~ tra sistemi conservandosi era stata introdotta unità di misura per Q : caloria. Esp. di mulinello di Joule (o equiv.) dava corrispondenza Joule $\leftrightarrow$ caloria.

Useremo ovunque solo Joule

Calorimetria

si osserva che volume di liquidi e solidi varia molto poco in funzione di variabili termod. (anche se uso ΔV in term. ad Hg per misurare t)



A: solido / liquido (lontano da transizione di fase)

$$W = \int_{A_{in}}^{A_{fin}} p dV \ll Q$$

$$\Delta U_A = Q - W \approx Q$$

se inoltre $\Delta T = T_f - T_{in}$ è suff. piccolo

$$Q = C_A(T) (T_f - T_{in})$$

$C_A(T)$: capacità termica di A alla temp. T

$$[C_A] = \frac{[E]}{[T]} \rightarrow \text{J/K (SI)}$$

inoltre per A omogeneo trovo

$$C_A = c_A M_A$$

$c_A(T)$: calore specifico della sostanza che compone A

$$\text{u. misura} \rightarrow \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$$

per trasf. infinitesima

$$C_A(T) = \frac{dQ}{dT}$$

Se ho trasf. reversibile T è definito ovunque e quindi anche $C_A(T)$



$$Q = \int dQ$$

↑
vero per qualunque trasf.

$$= \int \frac{dQ}{dT} dT = \int C_A(T) dT$$

↑
per rev.

altrimenti non sono def. stati intermed. e non def C_A durante trasf.

~~per solidi si può definire~~

• ~~definito~~ definisco anche calore specifico molare

$$c_{m,A}(T) = \frac{C_A(T)}{n}$$

$$n = \frac{M_A}{M_{m,A}} \leftarrow \text{massa di 1-mole } A$$

• Per solidi a T suff. elevata (dip. da solido) il calore specifico molare è costante

$$c_m \approx 25 \text{ J/K} \quad \text{Dulong-Petit} \\ (= 3R)$$

Def: Sorgente (o bagno termico) a Temp. T :
Sistema a Temp. T e $C \rightarrow \infty$

- gas è sistema la cui funzione di stato $f(p, V, T) = 0$ $V = V(p, T)$

olà in generale una forte variazione di V ~~da~~ con T a $p = \text{costante}$

Scegliendo p, T come variab. indep.

$$dQ = dU + p dV$$

$$dU = \underbrace{\frac{\partial U}{\partial p} dp}_{\text{questo è nullo per gas ideali - vedremo poi}} + \frac{\partial U}{\partial T} dT$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial p} dp + \frac{\partial V}{\partial T} dT$$

$$dQ = \left(\frac{\partial U}{\partial p} dp \right) + \frac{\partial U}{\partial T} dT + p \left(\frac{\partial V}{\partial p} dp \right) + p \frac{\partial V}{\partial T} dT$$

per $p = \text{cost}$

$$(dQ)_p = \frac{\partial U}{\partial T} dT + p \frac{\partial V}{\partial T} dT$$

per gas: due termini sono dello stesso ordine di grand.

$$\text{per } V = \text{cost} \quad dW = p dV = 0$$

$$(dQ)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} dp \right) + \frac{\partial U}{\partial T} dT$$

nullo per gas ideali

$(dQ)_V$ è significativamente minore di $(dQ)_T$

vedremo meglio più avanti

Cambiamenti di fase

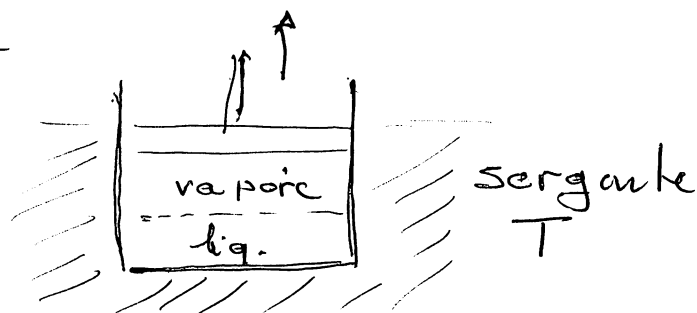
- solido $\leftrightarrow$ liquido
- solido $\leftrightarrow$ vapore
- liquido $\leftrightarrow$ vapore

esempio

sistema liq - vap
all'equilibrio

a temperatura T

uguale a temp sorgente



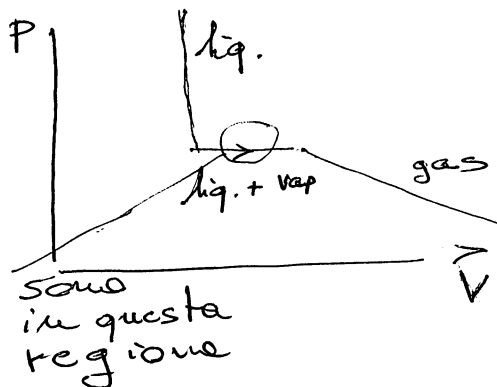
- espando lentamente: ~~costante~~ (trasf. revers.)

il sistema assorbe Q da sorgente

~~ma il volume liq. diminuisce,~~
aumenta vol. vap

nel diagramma P, V l'isoterma
completa è:

- processo isoterma
 m : massa liq $\rightarrow$ vap



$$Q = m \lambda_{vap}$$

$$\lambda_{vap} = \frac{Q}{m}$$

J/kg calore latente
(di evaporazione)

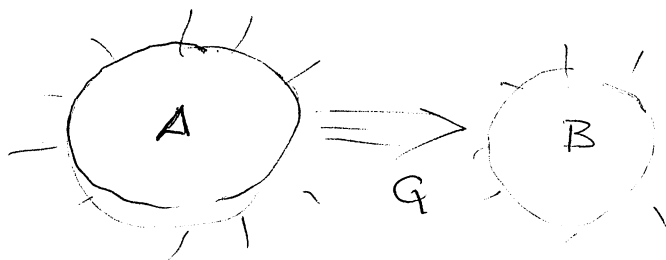
e.g. per acqua

- solido $\rightarrow$ liquido $\lambda_{fusione} = 3.3 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$
- liquido $\rightarrow$ vap (elip. da T)
 $\lambda_{eboll.} (373 \text{ K}) = 22.6 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$

Con Q abbiamo indicato
energia scambiata senza lavoro meccanico
come avviene ~~senza~~ passaggio di Q

1. Irraggiamento

sia A che B
emettono e
assorbono



ma si ha sempre trasferimento netto di
energia dal più caldo al più freddo
(è definizione di segno ΔT)

Energia emessa per unità di tempo
e unità di superficie

$$E = e T^4 \quad (\text{legge di Stefan - Boltzmann})^*$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$$

e : emissività di sup. (adimensionale)

ma perché non scrivo $E = \kappa T^4$?

$0 < e \leq 1$, ma e è anche = alla ~~fra~~ frazione
di en. incidente che viene assorbita: α

$\Rightarrow e = 1$ corpo nero: massima emiss.

$e = 0$ corpo riflette tutta ~~em~~ radiaz. incid.,
non emette nulla

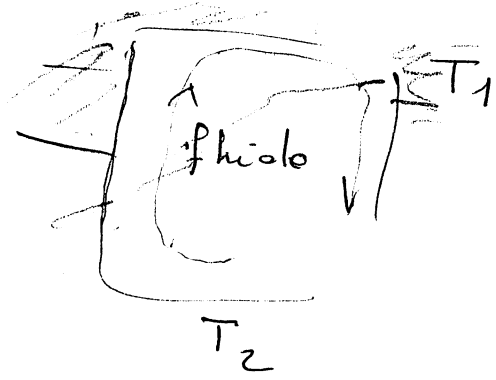
* Mazzolati ha def. Stefan - Boltzmann,
in realtà è combinazione di legge di
Kirchoff $E = \alpha E_B$ α : assorbività
con Stefan - Boltzmann $E_B = \sigma T^4$

2. convezione

si verifica in statica di fluidi che le variazioni di densità prodotte da ~~variazioni~~ differenze di T non consentono l'equil. meccanico

non equil. term $\Rightarrow$ non equil. mecc.

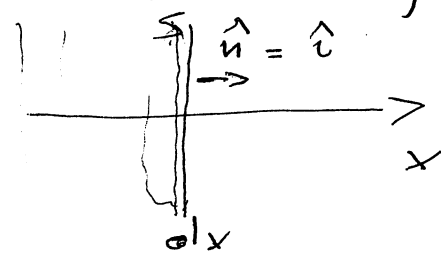
$\Rightarrow$ moti nel fluido, ~~si~~ scambio di Q per conduzione v. 3



3. ~~non~~ conduzione (Fourier)

1-dim

$T = T(x)$



sup. $S \perp$ a ax

la quant. di calore (infinitesima)

che fluisce attraverso S in dt è

$$|dQ = -K \frac{dT}{dx} S dt| \quad \text{segno - dà giusto verso di flusso } dQ$$

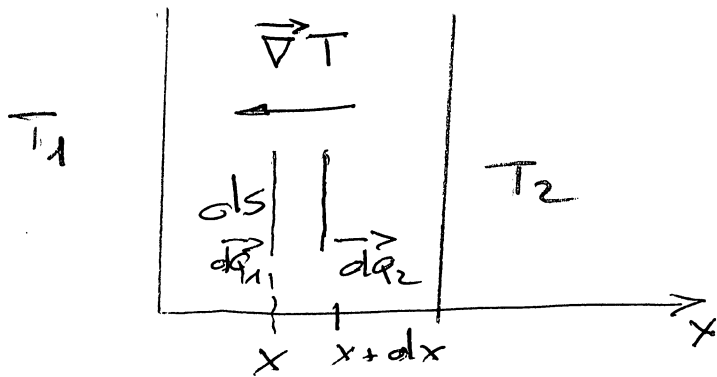
in più dim. $T(x, y, z)$ è campo scalare

$$|dQ = -K \vec{\text{grad}} T \cdot \hat{n} S dt|$$

legge di Fourier

K = conducibilità termica: $J \cdot m^{-1} s^{-1} K^{-1}$

applico legge di Fourier a elemento
di materiale di spessore dx ($\perp \vec{\nabla} T$) tra x e $x+dx$



$$dQ_1 = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x dS dt$$

$$dQ_2 = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} dS dt$$

$$= -k \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) dx \right] dS dt$$

$$dQ = dQ_1 - dQ_2 = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dS dx dt$$

~~derivate~~

$$c = \frac{dQ}{dT} \cdot \frac{1}{dm}$$

$$dQ = c dT dm$$

$$= c dT \rho dS dx$$

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dS dx dt = c dT \rho dS dx$$

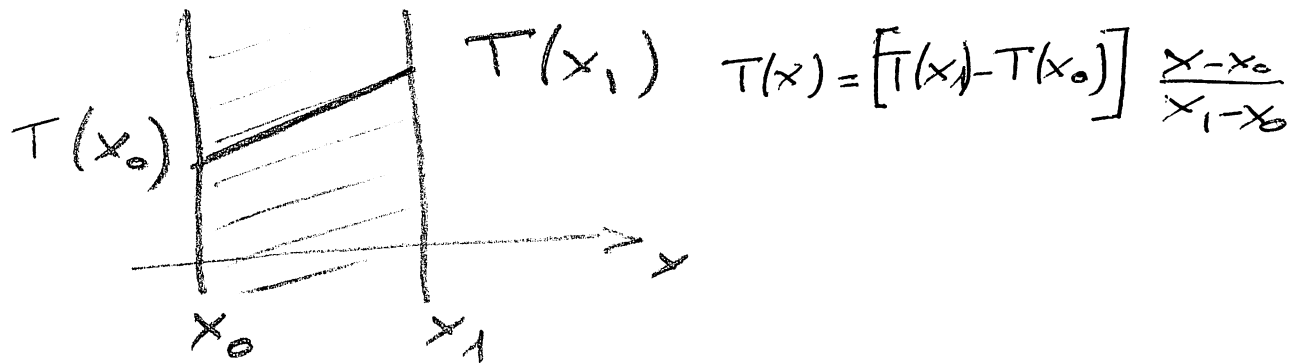
$$\boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho \frac{c}{k} \frac{\partial T}{\partial t}}$$

non dimostrare
a lezione

• qualche sol. particolare

- sol. stazionaria: $\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$

$$\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = \text{cost.}$$



- cond. iniziale sinusoidale

$$T(x) = T_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad \frac{2\pi}{\lambda} = u \quad \left(\begin{array}{l} \text{non lo chiamo} \\ K \text{ per evitare} \\ \text{confusione} \end{array} \right)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -T_0 u^2 \sin(ux)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} (-T_0 u^2 \sin(ux))$$

$$= -\frac{k u^2}{\rho c} (T_0 \sin(ux)) = -\frac{k u^2}{\rho c} T$$

integrando

$$T(x, t) = T(x, 0) e^{-\frac{k u^2}{\rho c} t}$$

$$= T(x, 0) e^{-t/\tau}$$

$$\tau = \frac{\rho c}{k u^2}$$

Ferro

$$k = 50 \text{ J m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$c = 448 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\rho = 7.86 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\lambda = 2\pi m \quad (R = 1m)$$

$$u = 1m; \quad \tau = \frac{\rho c}{k u^2} \approx 7.04 \times 10^4 \text{ s}$$

$$\lambda_3 = \frac{\lambda}{3}$$

$$\tau(\lambda_3) = \frac{1}{9} \tau$$