MODALITÀ TERMICHE di TRASPORTO ENERGETICO

- Scopo della termodinamica quantificare l'energia trasferita in processi per causa di differenze di temperatura. Si calcola il calore a volume o pressione costante secondo le

$$Q_V = \Delta U = C_V \Delta T$$
$$Q_p = \Delta H = C_p \Delta T .$$

Non ci si occupa del meccanismo specifico né della durata del processo di trasferimento.

- Qui interessano le modalità «macroscopiche» e una giustificazione microscopica per questi fenomeni di trasporto.

→ I MECCANISMI di TRASFERIMENTO TERMICO

→ NB: si parla (quasi) sempre di trasporto di calore ("heat transfer") anche se questo è un modo MOLTO AMBIGUO di procedere: si è già molto discusso sul fatto che il calore NON PUÒ ESSERE TRASFERITO perché è UNA MODALITÀ di TRASFERIMENTO e NON una sostanza.

E' necessaria una differenza di temperatura per consentire il trasferimento che può avvenire secondo tre modalità essenzialmente distinte.

I. CONDUZIONE

Causata da trasferimenti «meccanici» di quantità di moto / energia fra atomi / molecole costituenti il materiale in questione. $\exists \Delta T$ in questo caso implica differente «agitazione termica» che può propagarsi via collisioni atomiche.

La conduzione si può avere sia nei fluidi (gas / liquidi) che nei solidi, nei quali il trasporto avviene per redistribuzione dei moti del «reticolo» atomico ma anche per moto elettronico nel materiale.

II. CONVEZIONE

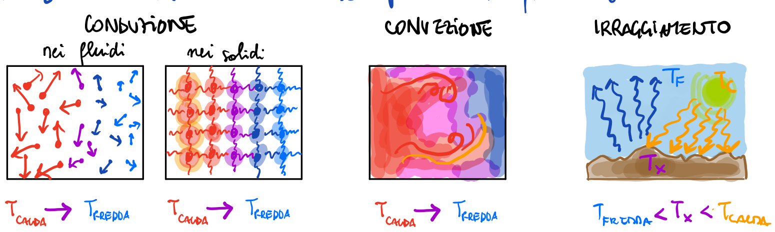
causata da movimentazione di porzioni di fluido (gas / liquidi) a loro volta dovute a gradienti termici che implicano differenze di densità / pressione. I moti possono essere naturali ma anche forzati / ventilati da agenti esterni (ventole / pompe / eliche, etc.).

Il meccanismo alla base della convezione è comunque di tipo conduttivo.

III. IRRAGGIAMENTO

causato da emissione / assorbimento di energia elettromagnetica (onde nel vuoto) da parte di atomi (livelli elettronici) e/o molecole (vibrazioni e rotazioni).

Non necessita di un mezzo per il trasporto (non lo vuole proprio!)



← è un promemoria, non «spiega» niente!

→ CONDUZIONE TERMICA

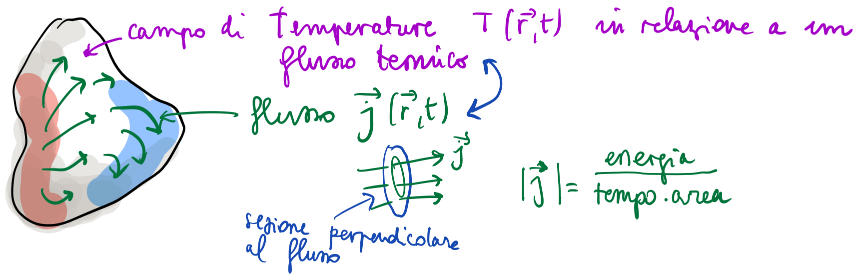
Si considerano fenomeni di trasporto termico dell'energia che non prevedono movimento di materia su scala macroscopica.

Ci si interessa qui di semplici situazioni in regime stazionario (indipendente dal tempo) e non-stazionario (dipendente dal tempo).

Il calore è formalmente trattato come un fluido secondo il modello matematico di J. Fourier. Non ci sono effetti di convezione né di irraggiamento.

Il modello è UNIDIMENSIONALE e la temperatura è una funzione del tipo $T = T(x,t)$ [in generale $T = T(\vec{r},t)$].

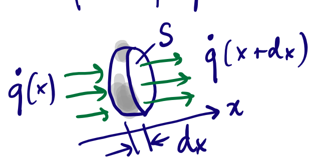
- Si definisce un FLUSSO TERMICO (in generale vettoriale) che misura l'energia per unità di tempo che fluisce attraverso una sezione unitaria perpendicolare al flusso stesso.



$|\vec{j}| \equiv \dot{q}$ si misura nel SI in W/m^2; si può anche scrivere $\dot{q} = \dot{Q}/S$ dove $\dot{Q}$ (W) è la potenza termica totale (non per unità di superficie, che è invece il flusso $\dot{q}$).

- Si vuol scrivere l'equazione (differenziale) per $\dot{q}$ in un problema conduttivo termico, ovvero la relazione che lega $\dot{q}$ al campo di temperatura.

Si sceglie la direzione x per il flusso e si prende un volume infinitesimo con facce perpendicolari al flusso:



l'energia che entra nel volumetto (per unità di tempo e di area) è
$$\dot{q}(x) - \dot{q}(x+dx) = -\frac{\partial \dot{q}}{\partial x} dx$$
per la definizione di derivata (notazione ∂ perché $\dot{q}$ può dipendere anche dal tempo).

L'energia che entra nel volumetto può essere anche scritta usando la capacità termica (a volume costante) come $dQ = C_V dT = c_V \, dm \, dT = c_V \rho \, dV dT = c_V \rho \, S \, dx \, dT$ per cui, per unità di tempo e di superficie, il flusso termico diventa

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = c_V \rho \, dx \frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial \dot{q}}{\partial x} = -c_V \rho \frac{\partial T}{\partial t}}$$

NB in 3D, in generale, la $\frac{\partial \dot{q}}{\partial x}$ diventa $\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = \vec{\nabla} \cdot \vec{j}$ [si chiama DIVERGENZA di $\vec{j}$].

La relazione che lega la variazione spaziale del campo di flusso termico $\vec{j}$ con la distribuzione spaziale del campo di variazione temporale della temperatura è

$$\vec{j} = \begin{cases} \dot{q}_x(\vec{r},t) \\ \dot{q}_y(\vec{r},t) \\ \dot{q}_z(\vec{r},t) \end{cases} \longrightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -c_V \rho \frac{\partial T}{\partial t} \longleftarrow T = T(\vec{r},t)$$

calore specifico a V=cost

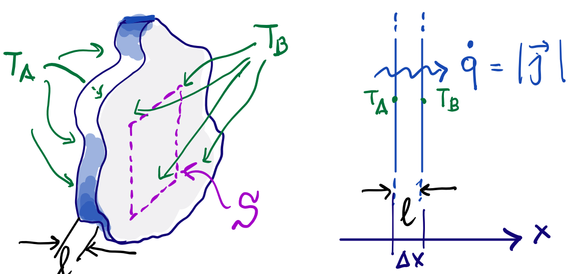
densità del materiale

Noi qui restiamo in una dimensione.

Ora serve determinare la relazione fra $\vec{j}$ ($\dot{q}_x$) e il campo di temperatura $T(\vec{r},t)$.

Gli esperimenti mostrano che c'è flusso termico solo in presenza di gradienti (variazioni) di temperatura e si stabilisce un « verso » di propagazione termica concorde con quello della diminuzione della temperatura

Caso più semplice: LAMINA INFINITA CON LE FACCE MANTENUTE A TEMPERATURE DIFFERENTI, UNIFORMI E COSTANTI



Si osserva in questa configurazione che

$$|\vec{j}| = \dot{q} \propto \frac{|T_A - T_B|}{\ell}$$

Si scrive $$\dot{q} = -k \frac{\Delta T}{\ell} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

k è la conducibilità termica [si misura nel SI in W/K·m o W/°C m]

il segno negativo serve a mantenere $k > 0$ quando si vuole avere un flusso di segno concorde alla variazione di temperatura (nel verso delle x crescenti se $\Delta T < 0$).

Si può anche considerare la potenza termica associata al flusso attraverso la sezione di superficie S:

$$\dot{Q} = \dot{q} S = -k S \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{(watt)}$$

Questa descrizione si applica anche "localmente" considerando una lamina di spessore infinitesimo per la quale si scrive:

$\dot{q} = -k \frac{\partial T}{\partial x}$ ovvero, in 3D, si usa la direzione di massima variazione della temperatura, il gradiente:

[la derivata è parziale perché $T = T(x,t)$]

$$\boxed{\vec{j} = -k \vec{\nabla} T}$$