



Trasmissione del calore

Trasmissione del calore

Descriviamo il modo in cui avvengono gli scambi di calore.

Esistono tre meccanismi per trasmettere il calore:

- **Conduzione:** *senza trasporto di materia*, nei solidi e in misura molto ridotta nei fluidi
- **Convezione:** nei fluidi, *associato al trasporto di materia*
- **Irraggiamento:** *associato a radiazione elettromagnetica*, in qualsiasi mezzo trasparente e anche nel vuoto

Conduzione

La conduzione è l'unico meccanismo di trasmissione del calore attraverso i solidi

Gli atomi non possono spostarsi dalle posizioni in cui si trovano. I vari moti di vibrazione si trasmettono da un atomo/molecola all'altro/a.

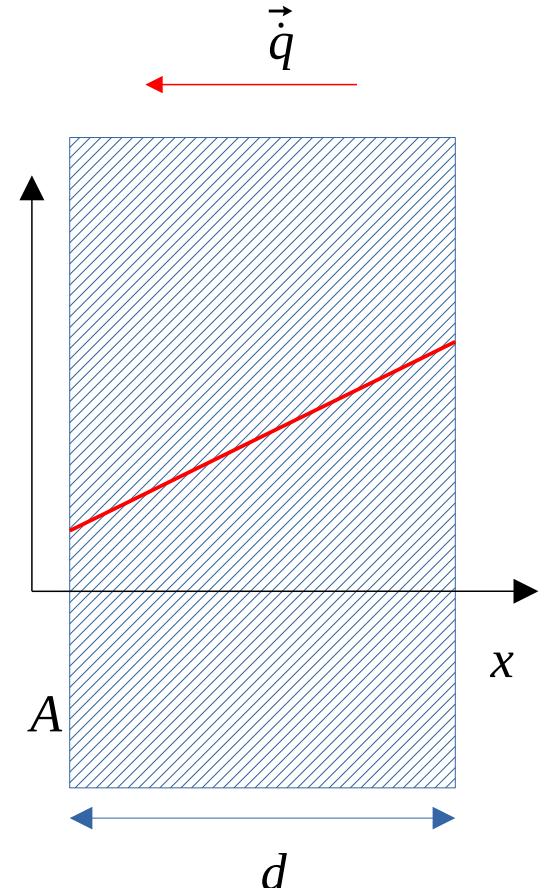
Il modello matematico di trasmissione attraverso una parete è molto semplice. Il calore trasmesso è proporzionale al salto termico, all'area, alla conducibilità ed inversamente proporzionale allo spessore.

Il coefficiente di conducibilità σ dipende dal solido e si misura in W/mK.

Naturalmente esiste anche una rappresentazione differenziale, che si usa per ricavare il campo di temperatura e flusso di calore per geometrie complicate.

$$\dot{Q} = \sigma \frac{A}{d} \Delta T$$

$$\vec{\dot{q}} = -\sigma grad T = -\sigma \vec{\nabla} T$$



Conduzione

Esempio di calcolo della conduzione attraverso una finestra con vetro singolo o vetro-camera

Nota: trascuriamo l'infisso, contrariamente alla normativa.

$$\sigma_{vetro} \simeq 1 \frac{W}{mK}$$

Vetro semplice (6 mm), salto 10 °C:

$$\dot{Q} = \sigma_{vetro} \frac{A}{d} \Delta T = 1670 \frac{W}{m^2}$$

MATERIALE	k (W/mK)
ACCIAIO	50
ALLUMINIO	209
BRONZO	64
LEGNO (ABETE)	0,126
LEGNO (QUERCIA)	0,18
LEGNO TRUCIOLATO	0,079
PVC ANTIURTO	0,162
POLIURETANO	0,025
VETRO	1
ARIA	0,026
ARGON	0,01772
KRYPTON	0,00949
FERRO	73
RAME	386
PIOMBO	35
STAGNO	64
PVC	0,12 - 0,17

Notare le differenze di conducibilità tra isolanti e conduttori

Conduzione

Esempio di calcolo della conduzione attraverso una finestra con vetro singolo o vetro-camera

Nota: trascuriamo l'infisso, contrariamente alla normativa.

$$\sigma_{aria\ ferma, 20^\circ C} \approx 0,026 \frac{W}{m K}$$

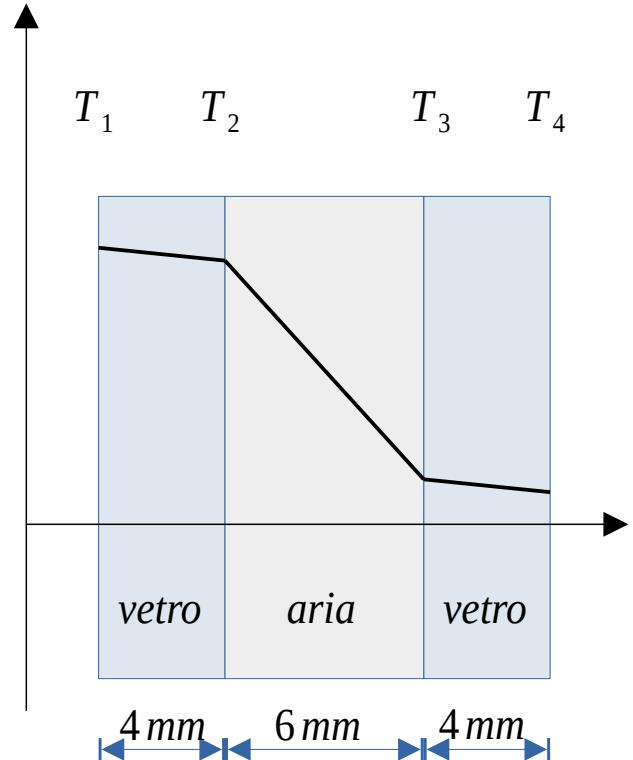
Vetro 4-6-4 (4 mm, 6 mm aria, 4 mm), salto 10 °C:

$$\dot{Q} = \sigma_{vetro} \frac{A}{d_1} (T_1 - T_2) = \sigma_{aria} \frac{A}{d_2} (T_2 - T_3) = \sigma_{vetro} \frac{A}{d_3} (T_3 - T_4)$$

$$T_1 - T_2 = \dot{Q} \frac{d_1}{\sigma_{vetro} A}; T_2 - T_3 = \dot{Q} \frac{d_2}{\sigma_{aria} A}; T_3 - T_4 = \dot{Q} \frac{d_3}{\sigma_{vetro} A}$$

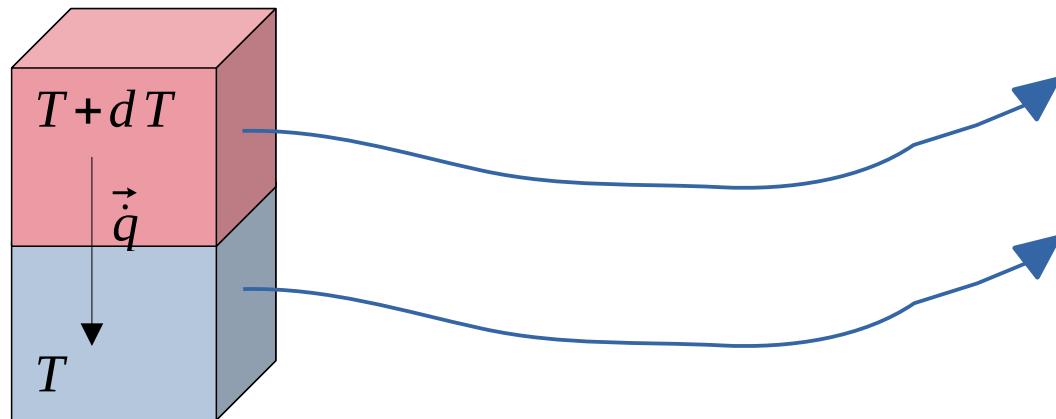
$$T_1 - T_4 = \frac{\dot{Q}}{A} \left(\frac{d_1}{\sigma_{vetro}} + \frac{d_2}{\sigma_{aria}} + \frac{d_3}{\sigma_{vetro}} \right)$$

$$10^\circ K = \frac{\dot{Q}}{A} \left(\frac{0,004}{1} + \frac{0,006}{0,026} + \frac{0,004}{1} \right) \circ \frac{K}{J m^2} \Rightarrow \dot{Q} = 41,9 \frac{W}{m^2} \quad \dot{Q} = 4,19 \Delta T \frac{W}{m^2 K}$$



Convezione

In un fluido in moto laminare, tra volumetti adiacenti c'è comunque conduzione come nei solidi, ma questo di solito è un effetto trascurabile rispetto ad altri fenomeni.

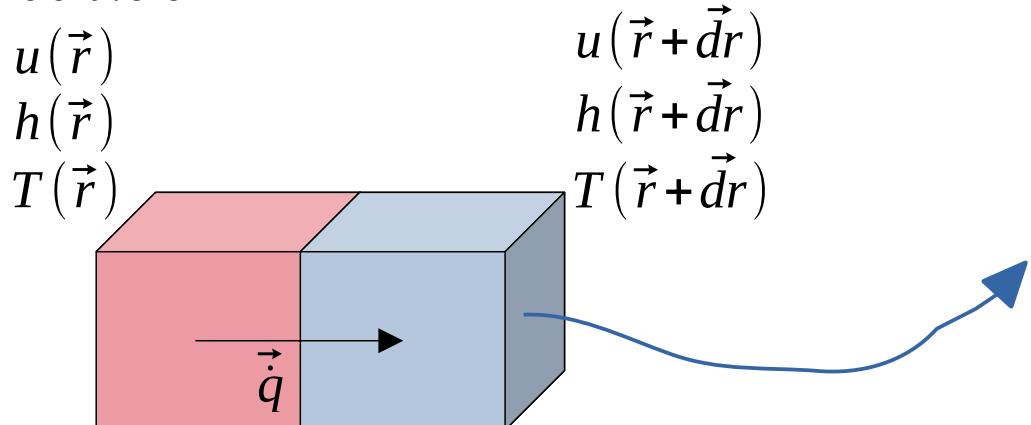


In realtà l'aspetto preponderante è il trasporto di materia, ognuno con una sua densità di energia e di entalpia.

Convezione

Ricordiamo i calcoli già fatti per sistemi aperti, stavolta con riferimento all'energia e all'entalpia di un volumetto. Naturalmente anche sul volumetto ci sono scambi di calore e lavoro.

$$\begin{aligned}\frac{dh}{dt} &= \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial h}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \\ &= \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} v_x + \frac{\partial h}{\partial y} v_y + \frac{\partial h}{\partial z} v_z\end{aligned}$$



Anche nelle derivate dell'entalpia (e dell'energia interna) compaiono i *termini convettivi*.

In pratica l'energia e l'entalpia cambiano perché il fluido si sta “portando addosso” queste quantità.

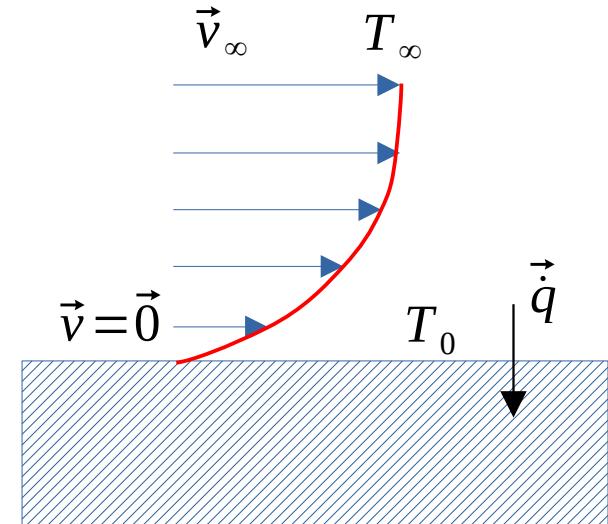
Quindi lo scambio termico è influenzato fortemente dallo stato di moto. I problemi sono di notevole difficoltà matematica, e si risolvono in maniera esatta o approssimata solo in pochissimi casi. In generale, si usa una soluzione numerica (al calcolatore)

Convezione forzata

Supponiamo di avere un fluido in moto rispetto ad una parete fissa, e che il moto del fluido sia governato da cause esterne (per es. una pompa o altra condizione che imponga un flusso al fluido). Si parla in questo caso di **convezione forzata**.

La velocità del fluido va a zero per i volumetti immediatamente a contatto con la parete. All'aumentare della distanza dalla parete, la velocità si avvicina più o meno rapidamente ad un valore asintotico, indicato con v_∞ . Lo stesso accade per la temperatura.

Gli strati più esterni si “rinnovano continuamente”, per cui la conduzione non riesce a variarne efficacemente la temperatura. Il risultato è che, già molto vicino alla parete, la temperatura è quella asintotica. Il gradiente diventa tanto più forte quanto maggiore è la velocità del fluido. Inoltre, se si innesca la turbolenza, i vortici hanno l'effetto di “rimescolare” il fluido e accelerare ancora lo scambio termico.



Convezione forzata

Il flusso di calore si esprime con una formula abbastanza semplice. In realtà tutta la complessa fluidodinamica è nascosta dentro il *coefficiente di scambio termico convettivo*.

$$\dot{Q} = h A (T_{\infty} - T_0)$$

h =coefficiente di scambio termico convettivo

A =area

Il coefficiente è estremamente variabile.

Vediamo quanto il raffreddamento ad acqua sia più efficiente di quello ad aria.

$$h_{aria} = 10 \div 100 \frac{W}{m^2 K}$$

In generale uno scambiatore a liquido o a vapore è molto più efficiente di uno a gas.

$$h_{acqua} = 500 \div 10^4 \frac{W}{m^2 K}$$

Attenzione alle scottature da vapore!

$$h_{vapore acqueo in ebollizione} = 3000 \div 10^5 \frac{W}{m^2 K}$$

Convezione naturale

Se il moto del fluido non dipende da una pompa/compressore, ma insorge spontaneamente per via delle differenze di densità causate da gradienti di temperatura, si parla di **convezione naturale**.

Per esempio consideriamo una parete più calda rispetto all'ambiente.

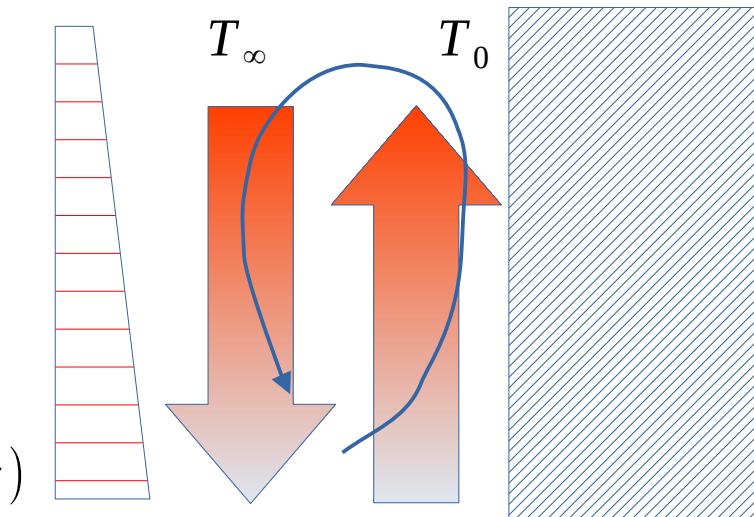
Il fluido riscaldato dal contatto con la parete diminuisce di densità man mano che sale. Al soffitto il moto deve invertirsi e il fluido si allontana dalla parete. Quindi scambia calore con l'ambiente e si raffredda, aumentando di nuovo di densità mentre scende.

Anche in questo caso il campo di moto del fluido è molto difficile da calcolare (anche più del caso di convezione forzata) e si ricorre ad approssimazioni e a misure empiriche.

$$\dot{Q} = h A (T_{\infty} - T_0)$$

h = coefficiente di scambio termico convettivo

$$h_{aria} = 5 \div 25 \frac{W}{m^2 K} \quad A = \text{area}$$



Irraggiamento

Si parte dalla definizione di **corpo nero**: un corpo che è in grado di assorbire tutta la radiazione incidente.

Assorbitore perfetto → Emettitore perfetto: all'equilibrio termico, un corpo nero deve essere in grado di riemettere tutta la radiazione assorbita, altrimenti non si potrebbe parlare di equilibrio.

Per un corpo con assorbanza $\alpha < 1$, anche l'emissività sarà ridotta al solo fattore $\alpha < 1$.

Un corpo nero emette energia con potenza

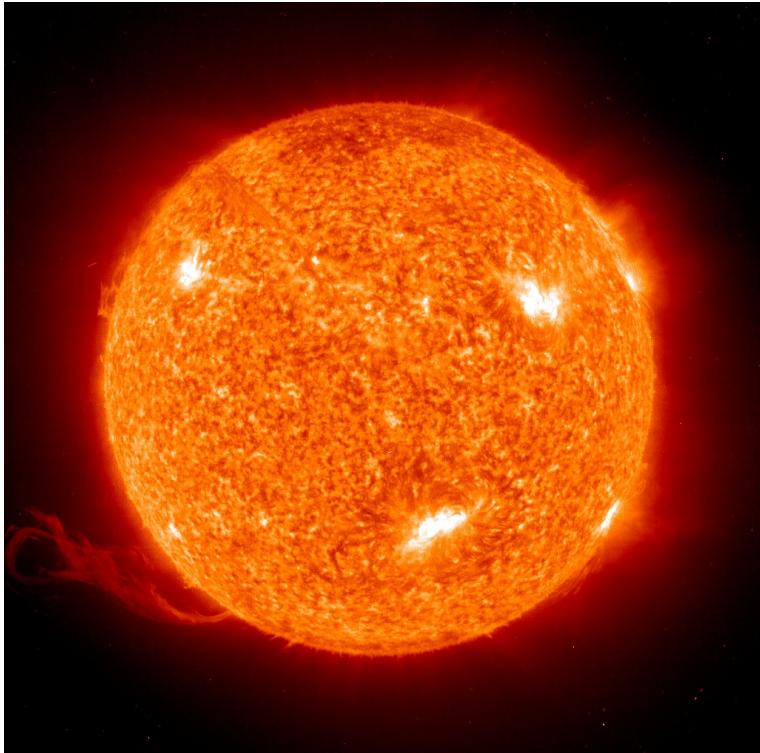
$$\dot{Q} = A \sigma T^4; \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \text{ costante di Stefan-Boltzmann}$$

Un corpo non nero avrà

$$\dot{Q} = A \alpha \sigma T^4$$

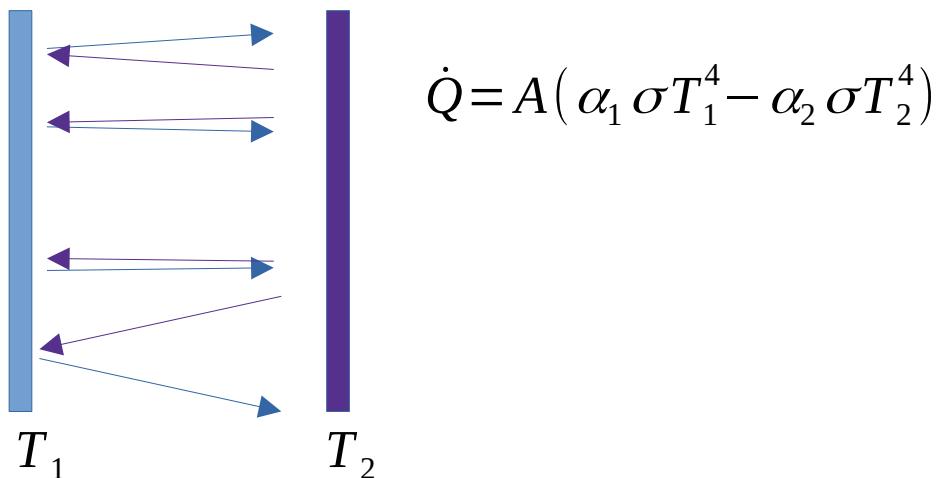
Irraggiamento

Due tipici corpi neri: il Sole ed una lampadina ad incandescenza



Irraggiamento

Tra due sorgenti affacciate che irraggiano si stabilisce un flusso netto di calore:



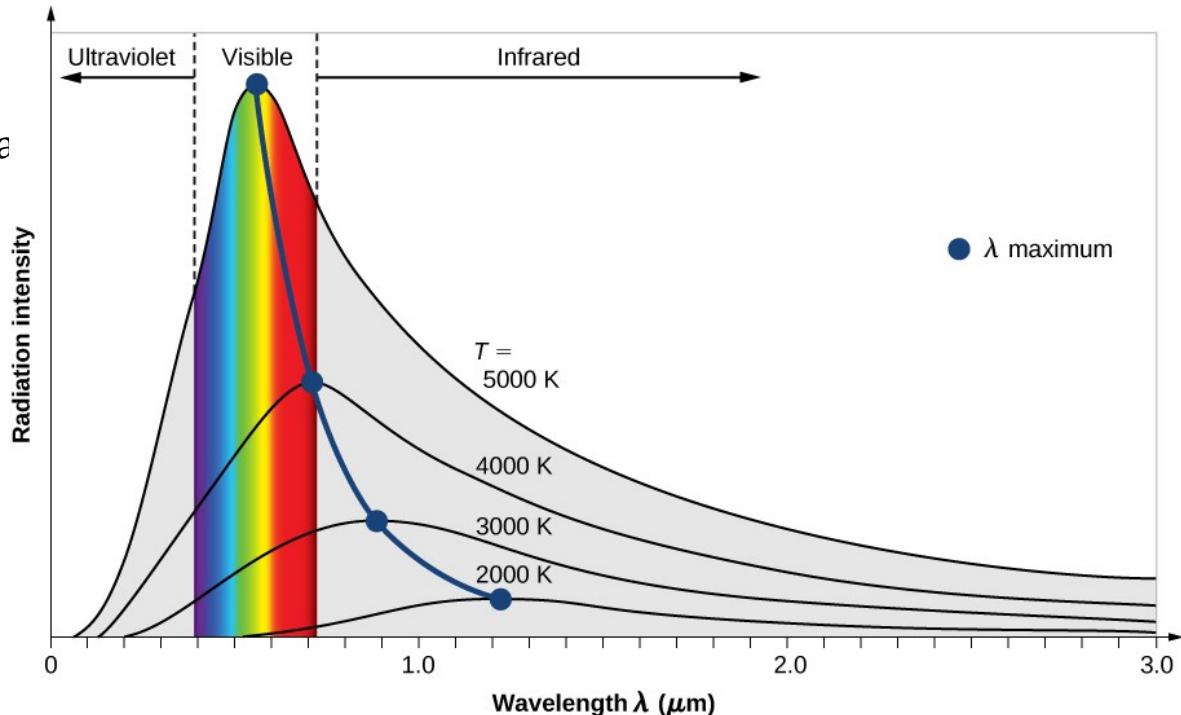
Irraggiamento

In realtà è estremamente interessante conoscere i dettagli della radiazione emessa.

Il picco della lunghezza d'onda della radiazione emessa dipende dalla temperatura della sorgente:

$$\lambda_{max} T = 2987,8 \mu m K$$

Legge dello spostamento di Wien.
Più è alta la temperatura, e più il picco si sposta a lunghezze d'onda basse.

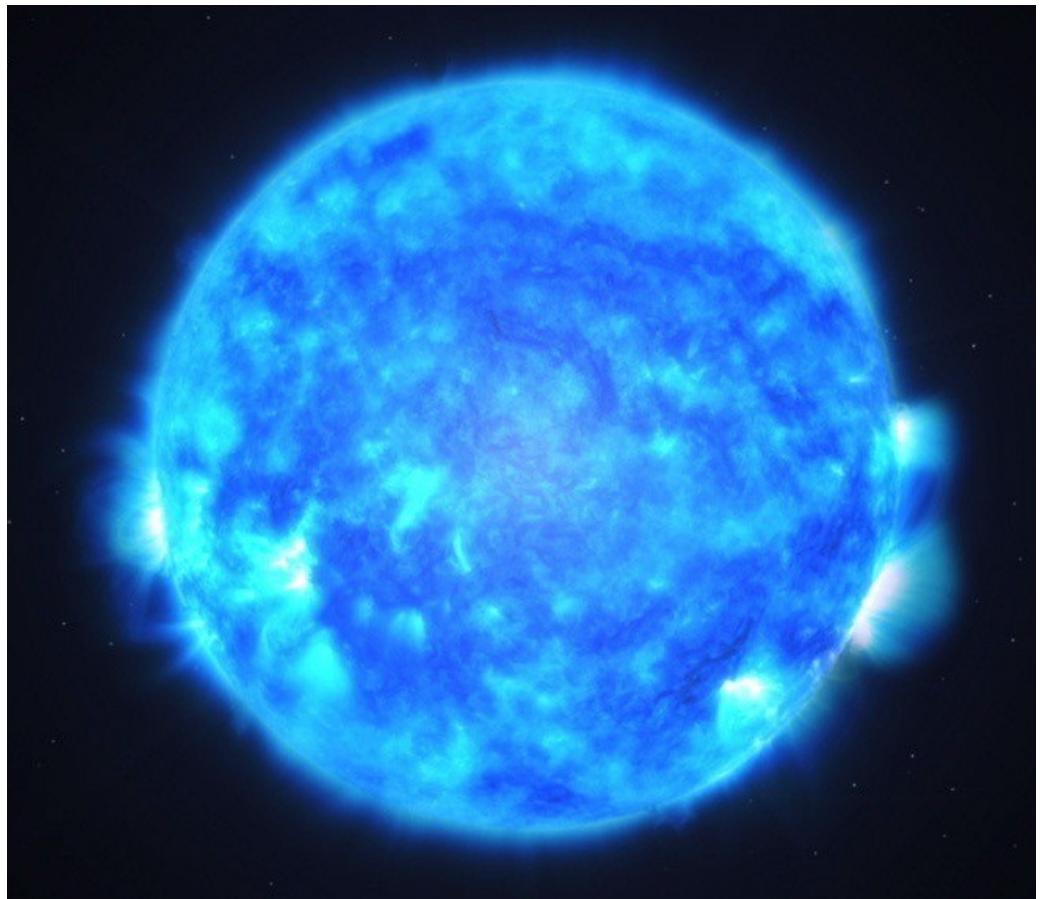


Irraggiamento

Per saperne di più sulla radiazione del corpo nero
e sull'irraggiamento in generale...

seguire Fisica II!

Una supergigante blu



Richiami ed argomenti correlati

La Termodinamica

Ci sono due punti di vista che dobbiamo conciliare, quello macroscopico e quello microscopico.

Dal punto di vista macroscopico, abbiamo bisogno di una descrizione di fenomeni che non si limitano al moto dei corpi, ma alla modificazione di loro proprietà che possono essere descritte quantitativamente. Storicamente, la *termodinamica*, ossia lo studio degli scambi e delle conversioni del *calore*, è nata così. Anche le prime applicazioni ingegneristiche, che hanno stravolto la nostra tecnologia e quindi la società, sono nate da uno studio macroscopico.

Dal punto di vista microscopico, oggi sappiamo che la materia è fatta di atomi organizzati in molecole e/o cristalli oppure in conglomerati amorfi. Non è praticamente possibile studiare questi stati organizzati risolvendo le equazioni del moto per ciascuno dei costituenti. Tuttavia è possibile derivare grandezze medie o totali di questi insiemi di costituenti. Questo è il compito della *meccanica statistica*, che raccorda la dinamica dei singoli costituenti alle proprietà dell'insieme. Il requisito, in questo caso, è che i costituenti siano in numero sufficiente da rendere trascurabili le fluttuazioni spaziali e temporali.

La Termodinamica

Abbiamo bisogno di partire da definizioni precise e di validità generale.

Definizioni:

Lavoro = prodotto scalare di una forza per lo spostamento del suo punto di applicazione.

Energia = capacità di un corpo o di un sistema di produrre lavoro.

Il motivo per cui la termodinamica si studia subito dopo la meccanica è che ha bisogno di queste definizioni, che provengono dalla meccanica, come fondamenta.

L'esperienza mostra che un corpo o sistema può acquisire o cedere energia in due modi:

- 1) subendo lavoro dall'ambiente o effettuando lavoro sull'ambiente – quindi **scambiando lavoro**;
- 2) senza subire o effettuare lavoro – quindi **scambiando calore**.

Calore = scambio di energia senza effettuazione di lavoro.

La Termodinamica

Attenzione: su alcuni (discutibili) testi si trovano fantasiose e vaghe definizioni di energia termica, calore, agitazione termica di particelle. Sono pessime definizioni perché concettualmente scorrette e di validità limitata solo ad alcuni casi. Una definizione deve essere chiara, valida sempre e non richiedere concetti o conoscenze che non siano già stati definiti.

L'energia di un corpo o sistema nel riferimento del suo centro di massa è una. Non ci sono "diverse" energie e non c'è bisogno di introdurre differenziazioni.

In ogni problema di termodinamica, va definito chiaramente e senza ambiguità qual è il **sistema termodinamico**, quale il suo **volumen di controllo**, quale la sua **superficie di controllo**.

Tutto ciò che non è compreso nel volume di controllo fa parte dell'**ambiente**.

Nello studio della termodinamica ci si riferisce sempre al sistema di riferimento del centro di massa del sistema termodinamico. Il moto rispetto ad altri corpi o sistemi non è termodinamicamente rilevante.

La Termodinamica

Un sistema termodinamico può ammettere o no scambi di massa con l'ambiente.

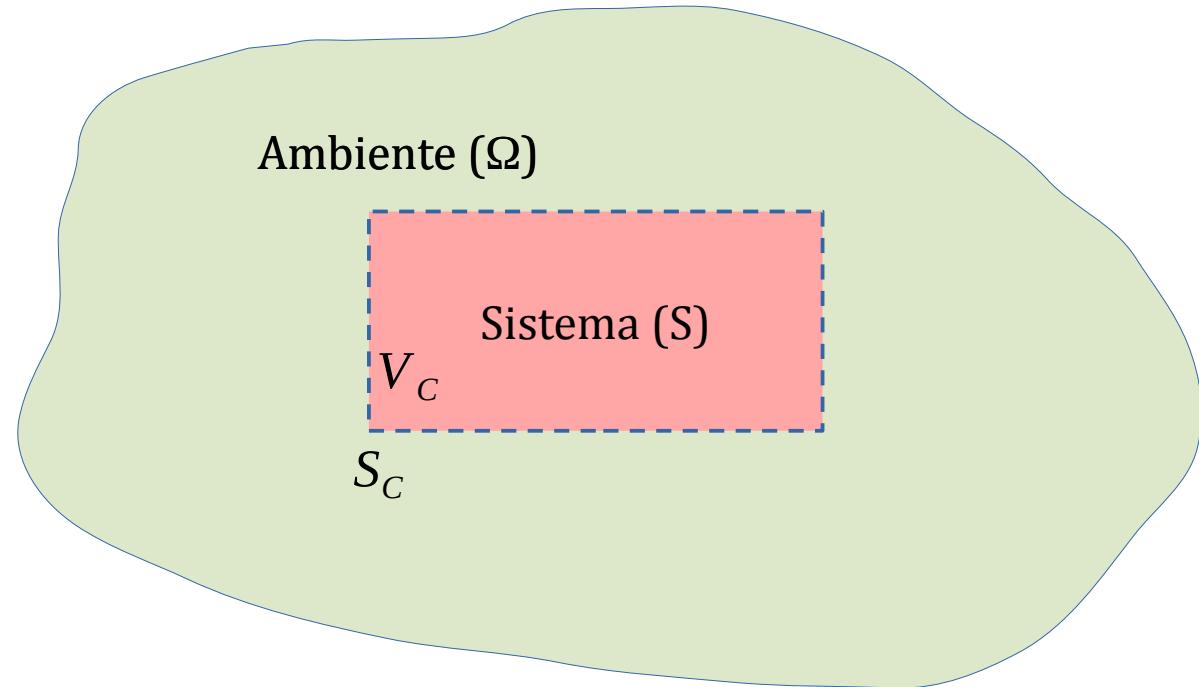
Nel primo caso si dice *sistema aperto*; se non ne ammette si dice *sistema chiuso*.

Un sistema chiuso che non può scambiare neanche energia con l'ambiente si dice *isolato*.

Le grandezze fisiche (coordinate termodinamiche) che descrivono un sistema termodinamico sono di due tipi:

1) *estensive*, se sono proporzionali alla massa del sistema (la massa è estensiva, ovviamente) – per es. Volume, Energia, ecc.

2) *intensive*, se non sono proporzionali alla massa – per es. Pressione, Temperatura



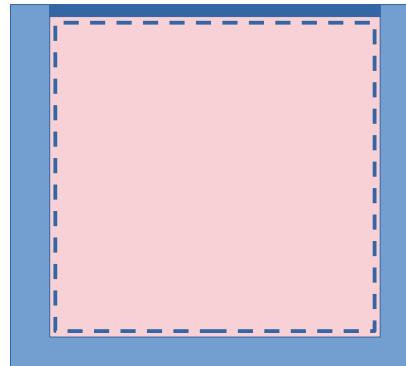
Si dice che un sistema termodinamico è in un certo stato termodinamico se **tutte** le sue coordinate termodinamiche estensive sono ben definite e tutte le grandezze intensive hanno lo stesso valore in ogni punto del sistema.

La Termodinamica

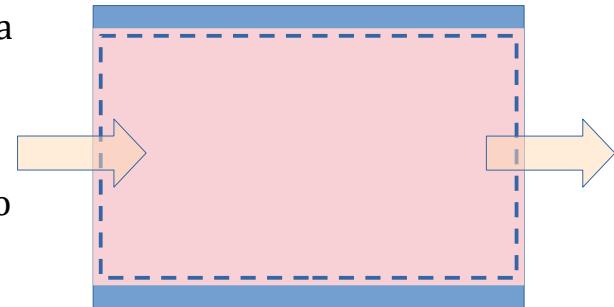
L'equilibrio termodinamico è una condizione che richiede:

- 1) *Equilibrio meccanico*: devono essere in equilibrio le forze che possono cambiare le coordinate termodinamiche, quindi non c'è lavoro.
- 2) *Equilibrio termico*: gli scambi netti di calore sono nulli.
- 3) *Equilibrio chimico*: gli scambi netti di materia sono nulli e le specie chimiche non variano in quantità e qualità.

Un gas in un cilindro con stantuffo mobile e con pareti adiabatiche (“che non permettono scambi di calore”) e alla stessa pressione dell’ambiente è un sistema chiuso in equilibrio termodinamico



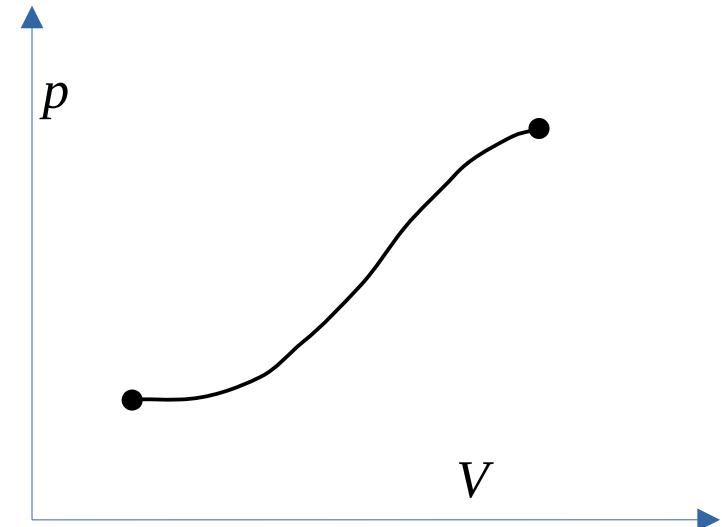
Un tratto di tubo adiabatico a pressione e temperatura costanti in cui fluisce un gas senza trasformazioni chimiche è un sistema aperto in equilibrio termodinamico



La Termodinamica

Trasformazione termodinamica: un processo durante il quale una o più coordinate termodinamiche di un sistema cambia(no) di valore

In una trasformazione *quasistatica* i valori delle coordinate termodinamiche sono sempre ben definiti in tutto il sistema: è così lenta che non vi sono effetti transitori termodinamicamente rilevanti. Le fluttuazioni sono di entità così modesta da poter essere ignorate (ad esempio onde di pressione dovute al moto di un pistone mobile).

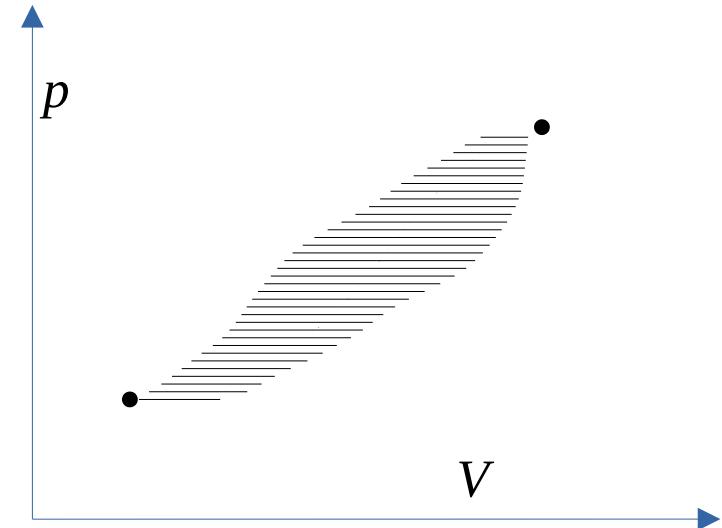


La Termodinamica

Trasformazione termodinamica: un processo durante il quale una o più coordinate termodinamiche di un sistema cambia(no) di valore

In una trasformazione non *quasistatica* i valori delle coordinate termodinamiche non sono univoci o sono proprio indefiniti, tranne che nel punto iniziale e finale.

Ad esempio possono esistere gradienti di temperatura, onde di pressione, combustioni parziali, ecc.



La Termodinamica

Una trasformazione termodinamica è **reversibile** se può essere ripercorsa all'indietro, riportando sia il sistema che l'ambiente nello stato iniziale.

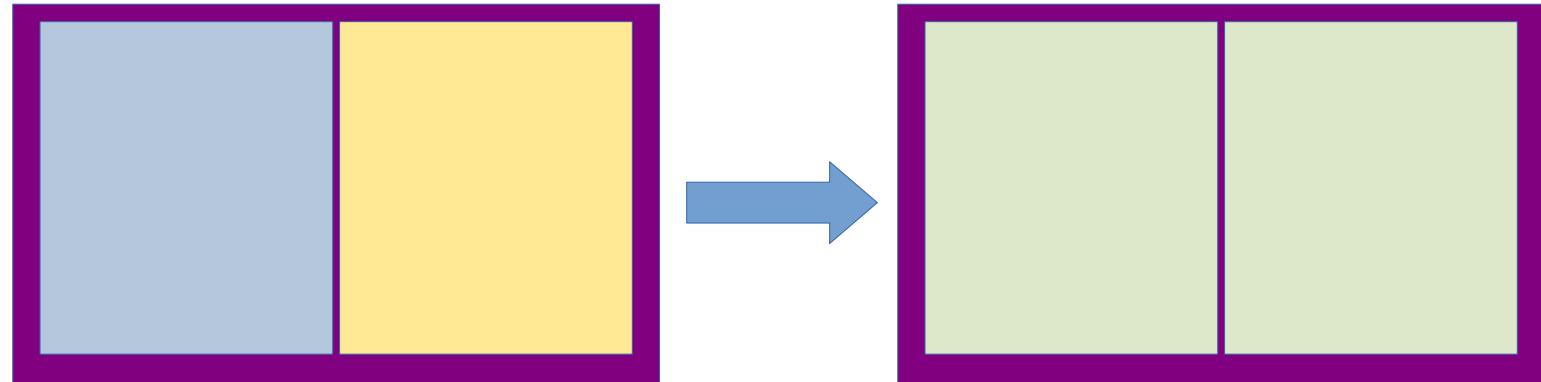
Una trasformazione termodinamica che non sia reversibile si dice **irreversibile**.

Una trasformazione non quasistatica non può essere reversibile.

Una trasformazione quasistatica *potrebbe* essere reversibile (ma non è detto).

Esempio di trasformazione quasistatica irreversibile:
miscelazione di due gas attraverso una membrana permeabile ad entrambi.

Si possono separare i gas, inserendo una membrana selettiva e pompando il gas.



Il sistema torna allo stato iniziale, ma l'ambiente evidentemente no a causa del consumo di risorse ed energia.

La Termodinamica

Una trasformazione termodinamica è **reversibile** se può essere ripercorsa all'indietro, riportando sia il sistema che l'ambiente nello stato iniziale.

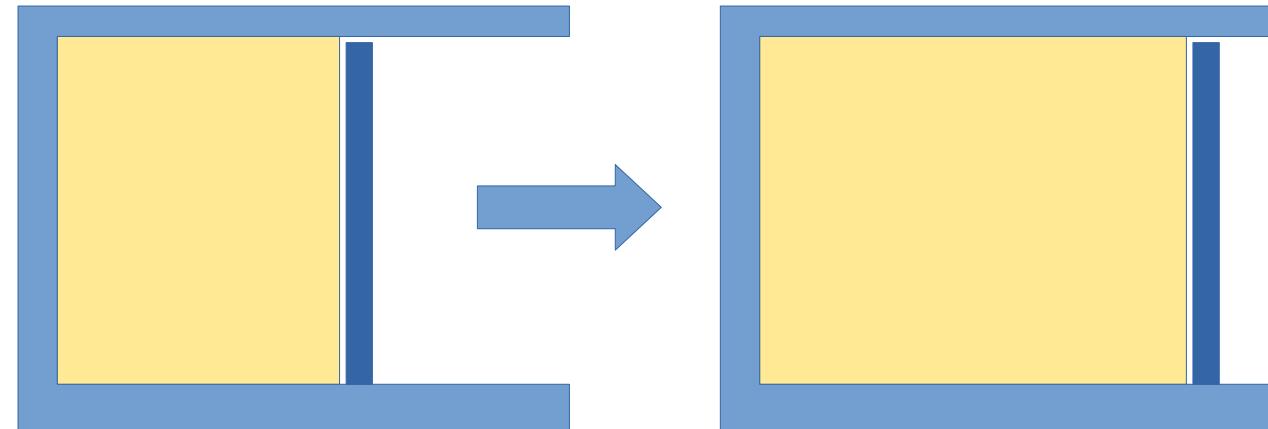
Una trasformazione termodinamica che non è reversibile si dice **irreversibile**.

Una trasformazione non quasistatica non può essere reversibile.

Una trasformazione quasistatica *potrebbe* essere reversibile (ma non è detto).

Esempio di trasformazione quasistatica reversibile:
un gas in un recipiente adiabatico con un pistone mobile si espande in conseguenza della diminuzione di temperatura dell'ambiente.

Riportando l'ambiente alla temperatura originale il gas viene ricompresso



La Termodinamica

Una trasformazione termodinamica è **reversibile** se può essere ripercorsa all'indietro, riportando sia il sistema che l'ambiente nello stato iniziale.

Una trasformazione termodinamica che non è reversibile si dice **irreversibile**.

Una trasformazione non quasistatica non può essere reversibile.

Una trasformazione quasistatica *potrebbe* essere reversibile (ma non è detto).

In generale, se vi sono fenomeni dissipativi o di aumento del disordine, anche una trasformazione quasistatica è irreversibile.

In pratica non si realizzano mai trasformazioni completamente reversibili, ma sono una buona approssimazione per alcuni fenomeni e consentono di stabilire parametri di confronto oggettivi.

Il Principio Zero della Termodinamica

Il Principio Zero della Termodinamica

Il cosiddetto *Principio Zero* della Termodinamica consente di definire la coordinata Temperatura, posseduta da qualsiasi sistema termodinamico.

Due sistemi termodinamici in grado di scambiare calore sono in equilibrio termico se le loro coordinate termodinamiche non variano nel tempo.

Il Principio Zero della Termodinamica asserisce che se due sistemi termodinamici sono separatamente in equilibrio con un terzo, allora sono in equilibrio anche tra di loro.

Se **A** è in equilibrio con **C**, e **B** è in equilibrio con **C**, allora anche **A** è in equilibrio con **B**.

L'equilibrio termico è perciò una **relazione di equivalenza**.

I sistemi termodinamici possono essere divisi in infiniti insiemi; ciascun insieme è composto da sistemi tutti in equilibrio termico tra loro.