

## Temperature e calore

**La temperatura e' una proprieta' del sistema legata all'energia interna.**

E' energia termica.

**Il calore e' la quantita' di energia termica scambiata fra due sistemi.**

E' una forma di trasferimento di energia.

La termodinamica e' lo studio dei processi che coinvolgono il calore.

Anche il lavoro meccanico trasferisce energia.

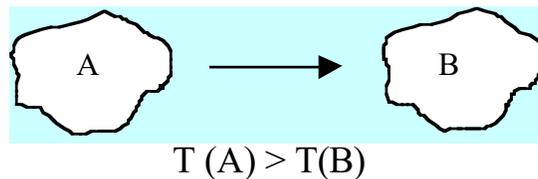
Joule nel 1878 ha dimostrato l'equivalenza degli effetti del lavoro meccanico e del calore.

Due sistemi sono in **contatto termico** quando si puo' aver scambio di energia termica dall'uno all'altro.

Se due sistemi sono in **equilibrio termico** (stessa temperatura) → non si ha nessun trasferimento di energia termica.

Se due sistemi hanno diverse temperature e sono a contatto termico c'e' trasferimento di calore.

Due corpi a contatto termico con temperature diverse dopo un certo tempo raggiungono l'equilibrio termico



**Se A e' in equilibrio termico con un terzo corpo T e B e' in equilibrio termico con lo stesso corpo T → anche A e' in equilibrio termico con B (legge zero della termodinamica).**

**Legge zero della termodinamica** serve anche per misurare la temperatura di un corpo

Corpo T e' un **termometro** cioe' un sistema che si mette rapidamente in equilibrio con qualunque altro sistema ed e' munito di una scala con un indice.

In un termometro puo' essere scelta come indicatore qualunque proprieta' della materia che sia variabile con lo stato termico (**proprieta' termometrica**).

## Esempi

a) Termometri costituiti da un liquido contenuto in un recipiente di vetro (proprieta' termometrica e' il volume del liquido)

b) Termometri a resistenza (proprieta' termometrica e' la resistenza elettrica di una piccola spira di filo)

- I materiali sono classificati come conduttori o isolanti in funzione della facilita' con cui gli elettroni che portano la carica si spostano da un atomo all'altro. Se e' molto facile, il materiale e' detto 'conduttivo'. La difficulta' di movimento si puo' rappresentare come **resistenza** elettrica.
- L'alta temperatura ha un effetto diretto sulla resistenza, in quanto la maggiore velocita' media si traduce in urti piu' frequenti per gli elettroni, che vengono rallentati.
- Quindi la resistenza aumenta con la temperatura, e puo' essere usata per misurarla.
- I termometri digitali moderni si basano su microsensori che misurano la resistenza dei propri componenti.

c) Termocoppie (proprieta' termometrica e' la tensione termoelettrica prodotta alla giunzione dei due fili di materiali diversi)

- I terminali dei fili sono posti a due temperature diverse, i portatori di carica si muovono per diffusione per compensare la differenza di temperatura
- Poiche i portatori di carica fluiscono con velocita' diversa nei due materiali, si crea una **differenza di potenziale**, che dipende in maniera non lineare dalla temperatura.

d) Termometri a infrarossi (proprieta' termometrica e' l'energia totale emessa per radiazione da ogni corpo)

- L'energia emessa per radiazione e' proporzionale alla temperatura alla quarta potenza

Nei laboratori nazionali di standardizzazione per una misura molto precisa della temperatura si usa un apparecchio (complesso ed ingombrante) che usa come proprietà termometrica la pressione di un volume fisso di gas idrogeno o elio.

Temperatura è direttamente proporzionale alla pressione nel termometro a gas a volume costante. Studieremo nelle prossime lezioni la variazione della temperatura a volume o a pressione costanti.

## Scale termometriche

Per misure quantitative di temperatura bisogna:

- (1) introdurre una scala di temperatura
- (2) stabilire alcune temperature di riferimento (riproducibile con grande precisione)

Termometri piu' usati si basano sulla dilatazione (termometri a dilatazione)

Sono costituiti da tubo capillare calibrato terminante in un piccolo bulbo riempito da sostanza termometrica liquida (mercurio, alcool etilico, ecc.)



Il prototipo di questo tipo di termometro risale al II secolo a.C. e venne riproposto da Galileo Galilei nel 1600: si basa sulle proprietà espansive dell'aria contenuta in un'ampolla che veniva poi messa a contatto con un liquido. La variazione di livello del liquido dipende dalla temperatura.

Il termometro è stato inventato dal medico istriano **Santorio Santorio** (1561-1636) che nel 1602 aggiunge una scala graduata al termoscopio ad alcool realizzando così il primo termometro clinico. La febbre non è ancora considerata un elemento indicativo della evoluzione clinica di una malattia.

Nel 1868 il medico tedesco A. Wunderlich (1815-1877) attribuisce per la prima volta valore clinico alla febbre.

Ogni scienziato gradua il proprio termometro a piacimento rendendo quindi impossibile la correlazione tra le misure effettuate da due strumenti diversi.

Giovanfrancesco Sagredo, un discepolo di Galileo, fu un costruttore di strumenti scientifici alla corte dei Medici. Fu lui a dividere la scala termometrica in 360 parti come si fa per l'angolo giro e da allora gli scienziati iniziarono a chiamare *gradi* le divisioni della scala dei termometri.

Robert Hooke (1635-1703) fu il primo a suggerire il punto di congelamento dell'acqua come un punto fisso. Il secondo punto fisso e il numero delle divisioni dell'intervallo tra i due punti fissi rimanevano ancora del tutto arbitrari.

## Scala Celsius.

**Nella scala Celsius** la temperatura tra 0 °C e 100 °C è divisa in 100 parti uguali (da qui il nome di **scala centigrada**).

Prende il nome dallo scienziato svedese Anders Celsius (1701-1744) ed è diventata il sistema di riferimento internazionale.

Il livello termico zero nella scala Celsius è scelto convenzionalmente come la **temperatura di fusione del ghiaccio** a pressione normale (ghiaccio fonde a livello termico ben definito e riproducibile).

Un secondo punto fissato pari a 100 è scelto come il livello termico che corrisponde **alla temperatura dell'acqua pura in ebollizione** a pressione normale.

Fissati questi due punti si può tarare un termometro.

Variatione unitaria di temperatura ( $1^{\circ}$  Celsius =  $1^{\circ}$ C) e' convenzionalmente quella che determina lo spostamento del livello nel capillare di un tratto di lunghezza pari a un centesimo del livello termico ad 0 a 100.

La lunghezza ( $l_1 - l_0$ ) viene divisa in 100 tacche  $\rightarrow$  e'  $1^{\circ}$ C

La temperatura viene estrapolata sopra il 100 e sotto lo zero

## Scala Fahrenheit

Nella scala Fahrenheit la temperatura tra 32 °F e 212 °F è divisa in 180 parti uguali.

Prende il nome dallo scienziato Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736). In questa scala, largamente impiegata nei paesi anglosassoni, alla temperatura del ghiaccio viene assegnato il valore 32, mentre a quella di ebollizione il valore 212, entrambe alla pressione atmosferica sul livello del mare. Si ha quindi una divisione in 180 parti uguali, ciascuna delle quali rappresenta un grado Fahrenheit (simbolo °F).

Se  $t_F$  e' temperatura espressa in Fahrenheit e  $t$  in gradi Celsius si ha:

$$t = 5/9 (t_F - 32)$$

per  $t_F = 32^0$  si ha  $t = 0^0C$  e per  $t = 212^0$  si ha  $t = 100^0C$

## Scala assoluta della temperature o scala Kelvin.

Proposta da Lord Kelvin nel 1868 partendo dalla considerazione che esiste una temperatura minima assoluta, lo **zero assoluto**. La scala prende quindi come riferimento lo zero assoluto come  $0^0K$  e il punto di congelamento dell'acqua che si associa a  $273.15^0K$   
E' usata per scopi scientifici

$$t (^0C) = T (^0K) - 273.15$$

La scala Celsius e Kelvin hanno una diversa scelta dello zero.  
Un grado Celsius = un grado Kelvin

Scala termometrica	PUNTI FISSI		
	ghiaccio fondente	acqua in ebollizione	divisioni
Centigradi	0 ° C	100 ° C	100
Kelvin	273,15 ° K	373,15 ° K	100
Fahrenheit	32 ° F	212 ° F	180

## Dilatazione termica.

Come abbiamo visto, la temperatura e' legata alla velocita' media degli atomi dei gas, e in generale al loro stato di "agitazione". Studieremo piu' avanti il comportamento dei gas perfetti e reali, ma ai fini della misura della temperatura possiamo trattare la dilatazione di solidi e liquidi, che si verifica quando una variazione di temperatura produce una piccola variazione di volume.

Un cubo di lato  $L_i$  e con volume  $V_i = L_i^3$  se riscaldato di una temperatura  $\Delta T = T_f - T_i$  si dilatera' di una certa variazione di Volume  $\Delta V = V_f - V_i$ .

Le due variazioni, di T e di V, sono legate da un'equazione lineare:

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

Ove  $\beta$  e' noto come coefficiente di dilatazione volumetrica.

Siccome misuriamo le temperature in K,  $\beta$  e' misurato in  $K^{-1}$

La variazione di Volume e' in realta' il risultato della variazione lineare  $\Delta L = L_f - L_i$  nelle tre dimensioni, che si puo' anche collegare con la variazione di temperatura tramite il coefficiente di dilatazione lineare  $\alpha$ :

$$\Delta L = \alpha L_i \Delta T.$$

Ecco i coefficienti di dilatazione lineare e volumica di alcuni materiali, misurati a temperatura ambiente:

Materiale	Coefficiente di dilatazione lineare, $\alpha$ (C°) <sup>-1</sup>	Coefficiente di dilatazione volumica, $\beta$ (C°) <sup>-1</sup>
<i>Solidi</i>		
Alluminio	$25 \times 10^{-6}$	$75 \times 10^{-6}$
Ottone	$19 \times 10^{-6}$	$56 \times 10^{-6}$
Ferro o acciaio	$12 \times 10^{-6}$	$35 \times 10^{-6}$
Piombo	$29 \times 10^{-6}$	$87 \times 10^{-6}$
Vetro (pyrex)	$3 \times 10^{-6}$	$9 \times 10^{-6}$
Vetro	$9 \times 10^{-6}$	$27 \times 10^{-6}$
Quarzo	$0,4 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
Cemento e mattoni	$\approx 12 \times 10^{-6}$	$\approx 36 \times 10^{-6}$
Marmo	$1,4-3,5 \times 10^{-6}$	$4-10 \times 10^{-6}$
<i>Liquidi</i>		
Benzina		$950 \times 10^{-6}$
Mercurio		$180 \times 10^{-6}$
Alcol etilico		$1100 \times 10^{-6}$
Glicerina		$500 \times 10^{-6}$
Acqua		$210 \times 10^{-6}$
<i>Gas</i>		
Aria (e molti altri gas a pressione atmosferica)		$3400 \times 10^{-6}$

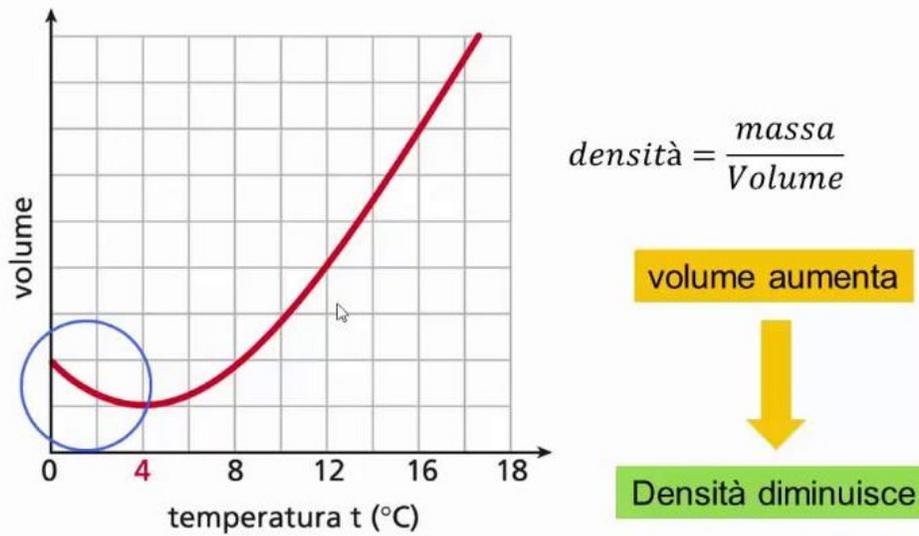
Da notare che tali coefficienti dipendono in realtà dalla temperatura stessa, ma intorno alla temperatura ambiente si possono considerare stabili.

Esempio: il classico cubo di ferro.

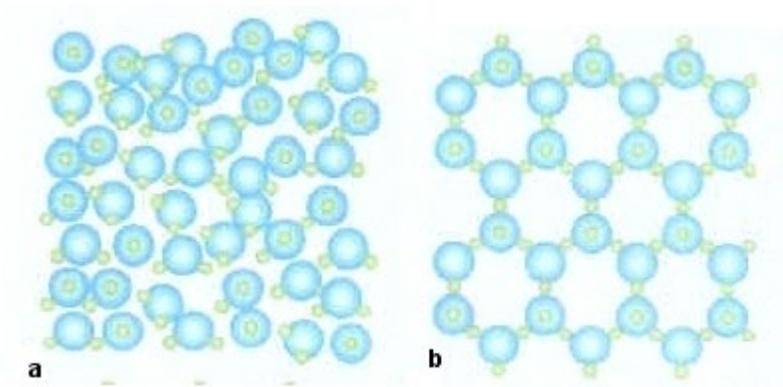
## **Dilatazione nella trasformazione da acqua a ghiaccio**

L'acqua ha un comportamento particolare: le molecole dell'acqua liquida, all'approssimarsi delle basse temperature, si riorganizzano per assumere lo stato solido.

## Il comportamento **anomalo** dell'acqua



L'allineamento delle molecole, data la loro forma, le costringere a occupare più spazio. Ecco perché sotto i 4 gradi il volume in realtà cresce avvicinandosi allo zero.



## **Primo principio della termodinamica**

**Il calore e' una forma di energia che si trasferisce da un corpo ad un altro se si ha differenza di temperatura.**

Joule trova la corrispondenza sperimentale fra lavoro meccanico e calore.

Il lavoro produce calore (es. scomparsa di energia meccanica in attrito)

Calore produce lavoro (es.: macchina a vapore)

Lavoro è energia meccanica trasferita in modo meccanico → movimento di corpi.

Calore è energia trasferita senza movimento.

**Un sistema possiede energia interna → somma energia cinetica e potenziale di tutte le particelle che lo costituiscono.**

**Il principio di conservazione dell'energia e' generalizzato** se si includono fenomeni meccanici e termici (es. energia spesa per vincere l'attrito non scompare ma si trasforma in calore).

### **Prima legge della termodinamica :**

$$Q = W + \Delta U$$

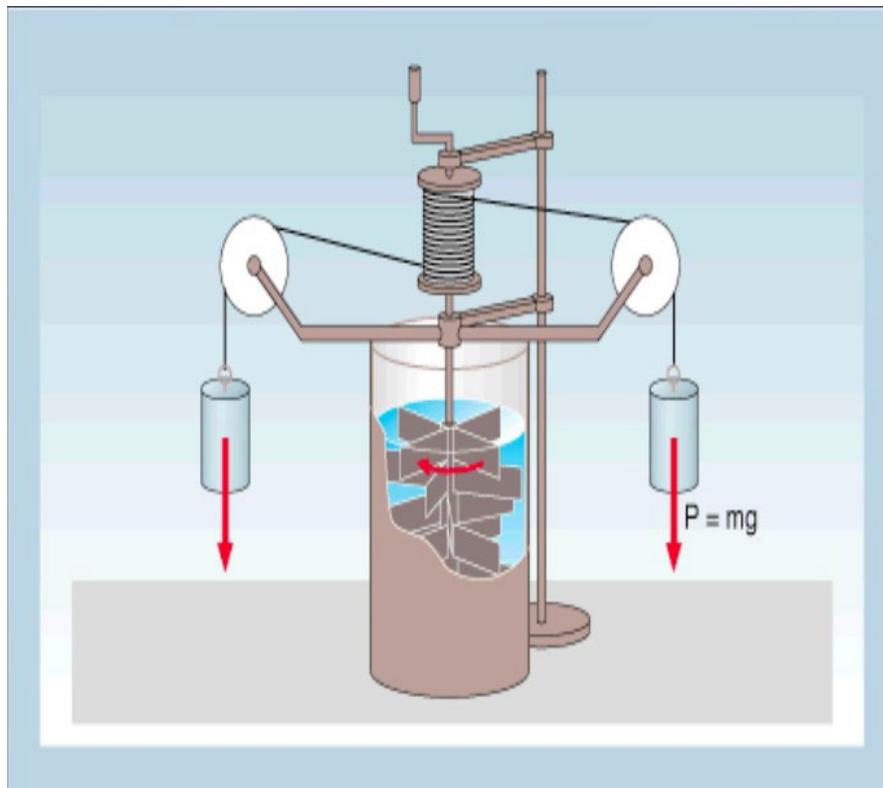
**Q = quantita' di calore assorbito dal sistema**

**W = lavoro compiuto dal sistema**

**$\Delta U$  = variazione dell'energia interna del sistema**

**Il primo esperimento sull'equivalenza fra lavoro e calore fu fatto da Joule nel 1840 con un dispositivo detto calorimetro di Joule. Consiste di un mulinello le cui palette ruotano, all'interno di un calorimetro pieno d'acqua, per effetto della discesa di due masse.**

**Facendo scendere piu' volte le masse e' possibile rilevare un aumento della temperatura dell'acqua.**



Per convenzione:

**Lavoro compiuto dal sistema e' positivo**  
**Lavoro compiuto sul sistema e' negativo**  
**Calore assorbito dal sistema e' positivo**  
**Calore ceduto dal sistema e' negativo**

Possiamo scrivere la prima legge della termodinamica come:

$$\Delta U = Q - W$$

La variazione di energia interna e' la differenza fra calore assorbito (o ceduto) e lavoro compiuto (o subito)

Se in processo di sa :  $Q - W < 0$  risulta una diminuzione di energia interna

Se in processo di ha :  $Q - W > 0$  si ha aumento di energia interna

Per esempio per aumentare l'energia interna di un corpo si può fare lavoro su di esso o fornirgli una adeguata quantità di calore.

**Sistema termodinamico e' determinato univocamente da variabili di stato** che descrivono lo stato del sistema e dipendono da coordinate termodinamiche (pressione, volume, temperatura).

I valori delle variabili di stato sono determinati solo dallo stato presente del sistema.

L'**energia interna** e' una **variabile di stato** (dipende dalle variabili che rappresentano lo stato del sistema), ma una variazione  $\Delta U$  puo' avvenire con varie combinazioni di  $Q$  e  $W$ .

Calore e lavoro dipendono invece da come la trasformazione viene effettuata → NON sono variabili di stato.

## Unita' di misura del calore

**caloria (cal)** = energia necessaria per variare di un grado la temperatura di 1 g di acqua da 14.5 °C a 15.5 °C alla pressione di 1 atm

**kilocaloria (kcal)** = 1000 cal

E' calore necessario per riscaldare 1 kg di acqua da 14.5°C a 15.5°C alla pressione di 1 atm.

Il calore puo' essere espresso in Joule (e' forma di energia).

**L'equivalente meccanico** del calore in Joule e' determinato sperimentalmente e vale:

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 4186 \text{ J}$$

Il primo a misurare l'equivalente meccanico del calore e' stato Joule

## Capacità termica e calore specifico

Per aumentare la temperatura di una sostanza si deve fornire calore che dipende dalla quantità della sostanza e dalla natura della sostanza.

**Capacità termica è quantità di calore che un sistema deve assorbire o cedere affinché la sua temperatura vari di un grado:**

$$\text{Capacità termica} = \frac{Q}{\Delta t}$$

Se vogliamo svincolarci dalla massa, la capacità termica per unità di massa è il **calore specifico**:

**Capacità termica = calore specifico \* massa**

Il **calore specifico c** risulta:

$$c = \frac{Q}{\Delta t m}$$

**m** è la massa totale del sistema

Il calore specifico si misura in :  $\text{cal g}^{-1} \text{grado}^{-1}$  ( $\text{kcal kg}^{-1} \text{grado}^{-1}$ )  
 $\text{J g}^{-1} \text{grado}^{-1}$

La variazione di temperatura  $\Delta t$  è la stessa in gradi Kelvin o Celsius

Dalla definizione di caloria → **calore specifico dell'acqua** (da 14.5°C a 15.5 °C) è pari a **1 cal g<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>**

Se si ha una massa  $m$  di sostanza di calore specifico  $c$ , per aumentare la temperatura da  $T_1$  a  $T_2$  si deve fornire il calore  $Q$ :

$$Q = c m (T_2 - T_1) = c m \Delta t$$

Il calore  $Q$  e' positivo (assorbito dal sistema) quando  $\Delta t > 0$  quindi  $T_2 > T_1$  (temperatura aumenta)

Il calore  $Q$  e' negativo (ceduto dal sistema) quando  $\Delta t < 0$  quindi  $T_2 < T_1$  (temperatura diminuisce)

Per i gas se la misura e' fatta a **volume costante** il calore specifico si indica con  $c_v$ .

Se la misura e' fatta a **pressione costante** il calore specifico si indica con  $c_p$ .

Dedicheremo specifiche lezioni a questi casi.

Il calore specifico in generale dipende (anche se debolmente) dalla temperatura: a temperature basse si ha diminuzione di tutti i calori specifici (tendono a zero avvicinandosi allo zero assoluto).

## Calore specifico molare

**Calore specifico molare C e' capacita' termica riferita ad una mole di sostanza:**

$$C = \frac{Q}{\Delta t n} = c \frac{m}{n}$$

C (maiuscola!) = Calore specifico molare  
n = numero di moli

Il calore specifico molare si misura in :                      cal moli<sup>-1</sup> grado<sup>-1</sup>

Una mole di un elemento di massa atomica M = M grammi di elemento

1 mole contiene N particelle

N = numero di Avogadro = 6.0249\*10<sup>23</sup>

Numero di moli n presenti in una massa m e':    n = m/M

$$Q = m c \Delta t = \frac{m}{M} M c \Delta t = n C \Delta t$$

**Se si hanno due sistemi in contatto termico, quando raggiungono la temperatura di equilibrio, il calore assorbito da un sistema e' uguale al calore ceduto dall'altro sistema.**

$$|Q_{assorbito}| = |Q_{ceduto}|$$

$$c_1 m_1 (T_{finale} - T_{1,ini}) = |c_2 m_2 (T_{finale} - T_{2,ini})|$$

$$c_1 m_1 (T_{finale} - T_{1,ini}) = c_2 m_2 (T_{2,ini} - T_{finale})$$

## **Calore latente**

Non è sempre vero che la temperatura aumenta fornendo calore ad una sostanza.

In certi casi la temperatura rimane costante.

Per esempio quando il ghiaccio scioglie o quando l'acqua evapora: si spende calore ma la temperatura non aumenta

**Le sostanze esistono in tre fasi:**

**solida**  
**liquida**  
**gassosa**

Il passaggio fra una fase all'altra e' detto **transizione di fase**.

Nelle transizioni di fase (fusione, evaporazione) si ha un brusco **aumento di energia interna**.

Un grammo di vapore acqueo a 100°C ha energia interna molto maggiore di 1 grammo di acqua liquida

Il calore viene speso per rompere legami molecolari.

**La temperatura nelle transizioni di fase rimane costante.**

Nelle transizioni di fase (solidificazione, condensazione) si ha una diminuzione di energia interna.

**Calore latente è il calore necessario per portare la massa**

## **unitaria da una fase all'altra.**

Dipende dalla sostanza e dalla transizione di fase.  
Si parla per esempio di:

**Calore latente di fusione (solido → liquido)**

**Calore latente di evaporazione (liquido → gas)**

**Calore latente di sublimazione (solido → gas)**

Il calore latente fornito nelle transizioni

solido → liquido e liquido → gas

viene integralmente restituito nei processi inversi, solidificazione e condensazione.

**Per esempio:**

**Per sciogliere una massa  $m$  di una sostanza e' necessario il calore  $Q$ :**

$$Q = c_f m$$

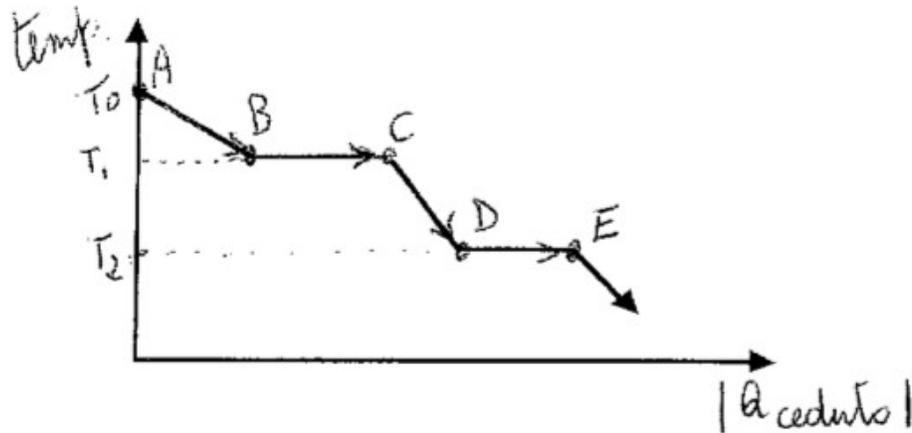
$c_f$  e' il calore di fusione della sostanza.

Il calore latente si misura in : cal/g

Non c'è riferimento alla temperatura nell'unita' di misura, ovviamente, perché la temperatura rimane costante

Lo stesso calore  $Q$  viene ceduto se la massa  $m$  si solidifica di nuovo.

## Curva di raffreddamento



Vapore si raffredda: A  $\rightarrow$  B

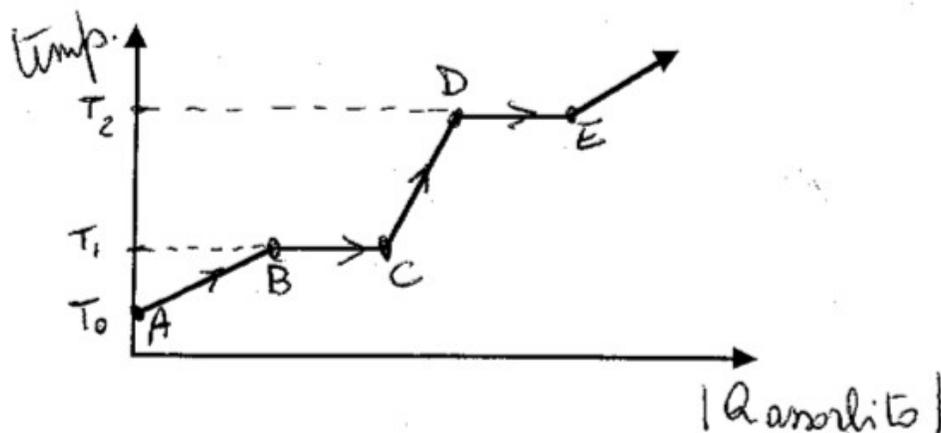
Vapore condensa: B  $\rightarrow$  C (transizione di fase: **condensazione**)

Liquido si raffredda: C  $\rightarrow$  D

Liquido congela: D  $\rightarrow$  E (transizione di fase: **solidificazione**)

Solido continua a raffreddarsi

## Curva di riscaldamento



Solido si riscalda: A  $\rightarrow$  B

Solido fonde: B  $\rightarrow$  C (transizione di fase: **liquefazione**)

Liquido si riscalda: C  $\rightarrow$  D

Liquido bolle: D  $\rightarrow$  E (transizione di fase: **evaporazione**)

Vapore continua a riscaldarsi

# Trasferimento del calore

**Conduzione:** il calore si diffonde in un solido o in un fluido in quiete

**Convezione:** liquido o gas in movimento assorbono calore e lo trasportano in un altro posto

**Irraggiamento:** trasferimento calore per mezzo di onde elettromagnetiche

## Conduzione

Non si ha trasporto macroscopico di materia, ma trasferimento di energia.

Nei metalli trasporto di energia e' dovuto ad elettroni liberi. Negli isolanti il trasferimento dipende da vibrazioni molecolari

### Trasporto di calore attraverso parete a facce piane parallele

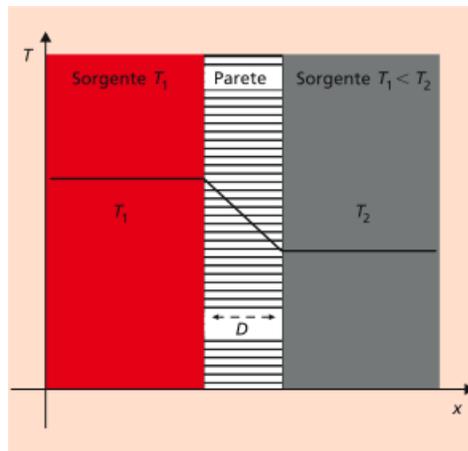


Fig. 4.1. Trasporto stazionario attraverso una parete omogenea a facce piane e parallele.

Se due facce di una di materiale sono tenute a temperature diverse  
→ il calore fluisce da faccia 1 (a temperatura  $T_1$ ) a faccia 2 (a temperatura  $T_2 < T_1$ ) → la temperatura varia con continuità'

**Flusso di calore**  $\frac{\Delta Q}{\Delta tempo}$  attraverso lo spessore  $\Delta x$  e':

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \text{tempo}} = K A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x}$$

K e' la **conducibilita' termica**

A e' la superficie della faccia di contatto

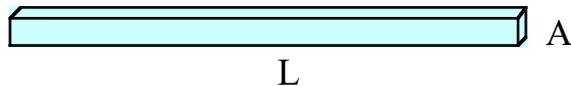
$\frac{\Delta Q}{\Delta \text{tempo}}$  e' una **corrente termica** (e' come carica elettrica/tempo per la corrente elettrica!). Dimensionalmente, e' un'energia/tempo, quindi come il lavoro/tempo, ed e' quindi equivalente a una potenza: si misura in **Watt (W)**.

Ne consegue che la **conducibilita' termica K** si misura in **W m<sup>-1</sup> gradi<sup>-1</sup>**

La conducibilita' termica diminuisce se diminuisce la perfezione cristallina della sostanza.

Esempio: per argento  $K = 406 \text{ W m}^{-1} \text{ gradi}^{-1}$   
 per legno  $K = 0.12 \text{ W m}^{-1} \text{ gradi}^{-1}$   
 per aria ( a 0 °C)  $K = 0.024 \text{ W m}^{-1} \text{ gradi}^{-1}$

Consideriamo una lunga barra di sezione A e lunghezza L



Se un estremo è tenuto stabilmente a temperatura  $T_1$  e l'altro a temperatura  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) si ha che la diminuzione di temperatura è uniforme lungo la barra. Raggiunto lo stato stazionario le temperature per ogni posizione della barra restano costanti.

In queste condizioni la corrente termica è:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \text{tempo}} = K A \frac{T_1 - T_2}{L}$$

<b>Materiale</b>	<b>w, conducibilità termica (W/mK)</b>
Diamante	1000
Argento	406.0
Rame	385.0
Oro	314
Ottone	109.0
Alluminio	205.0
Ferro	79.5
Acciaio	50.2
Piombo	34.7
Mercurio	8.3
Ghiaccio	1.6
Vetro	0.8
Calcestruzzo	0.8
Acqua a 20° C	0.6
Amianto	0.08
Neve (secca)	0.07
Fibra di vetro	0.04
Mattone (isolante)	0.15
Mattone rosso	0.6
Grasso corporeo	0.20
Sughero	0.04
Feltro di lana	0.04
Lana di roccia	0.04
Polistirene	0.033
Poliuretano	0.02
Legno	0.12-0.04
Aria at 0° C	0.024
Elio (20°C)	0.138
Idrogeno (20°C)	0.172
Azoto (20°C)	0.0234
Ossigeno (20°C)	0.0238
Gel di silicio	0.003

# Convezione

Trasferimento di calore nei fluidi quando il fluido stesso si muove.

**Convezione naturale:** movimento di fluido → fluido a contatto con un corpo caldo si riscalda e sale, si muove verso l'alto, perché densità diminuisce, a parità di volume diventa più leggera → sostituzione con fluido più freddo spinto verso il basso per gravità (es.: calorifero)

**Convezione forzata:** agente esterno mantiene il moto del fluido (es. ventilatore)

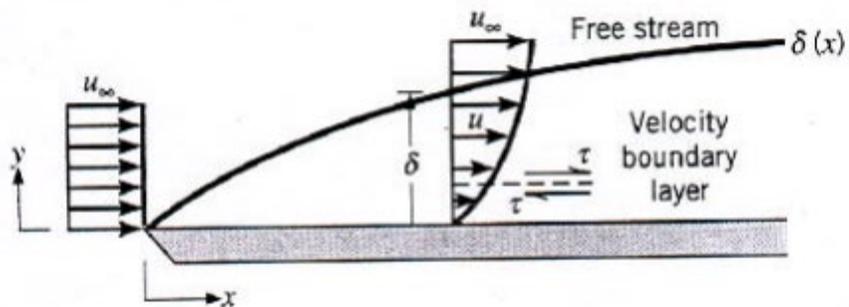
Nella convezione naturale si ha strato di fluido immobile a contatto con superficie calda.

Nella convezione forzata non è possibile avere strato immobile con superficie calda per presenza di agente esterno che muove il fluido.

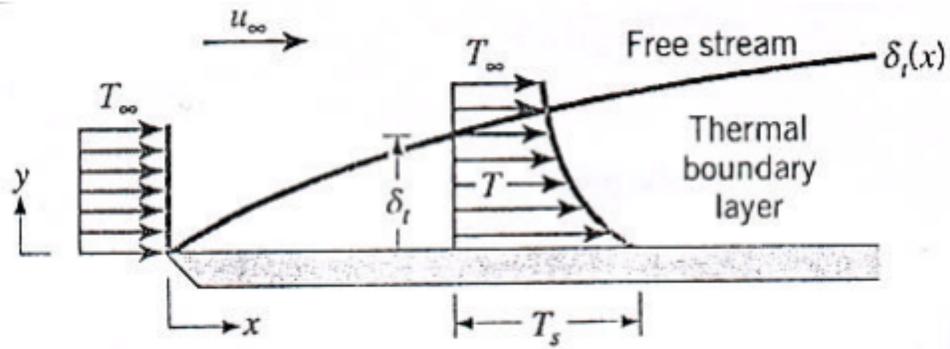
In questo caso la perdita di calore per unità di superficie per unità di tempo:

$$\frac{\Delta Q}{A \Delta tempo} = w_{conv} \Delta T$$

dove  $w_{conv}$  è **coefficiente di trasporto di calore per convezione**,  $\Delta T$  è la differenza fra regione calda e regione fredda (esempio differenza di temperatura fra radiatore e aria che lo circonda) e  $A$  la superficie di contatto.



**Figura 12.4.** Strato limite dinamico su lastra piana



**Figura 12.5.** Strato limite termico su lastra piana

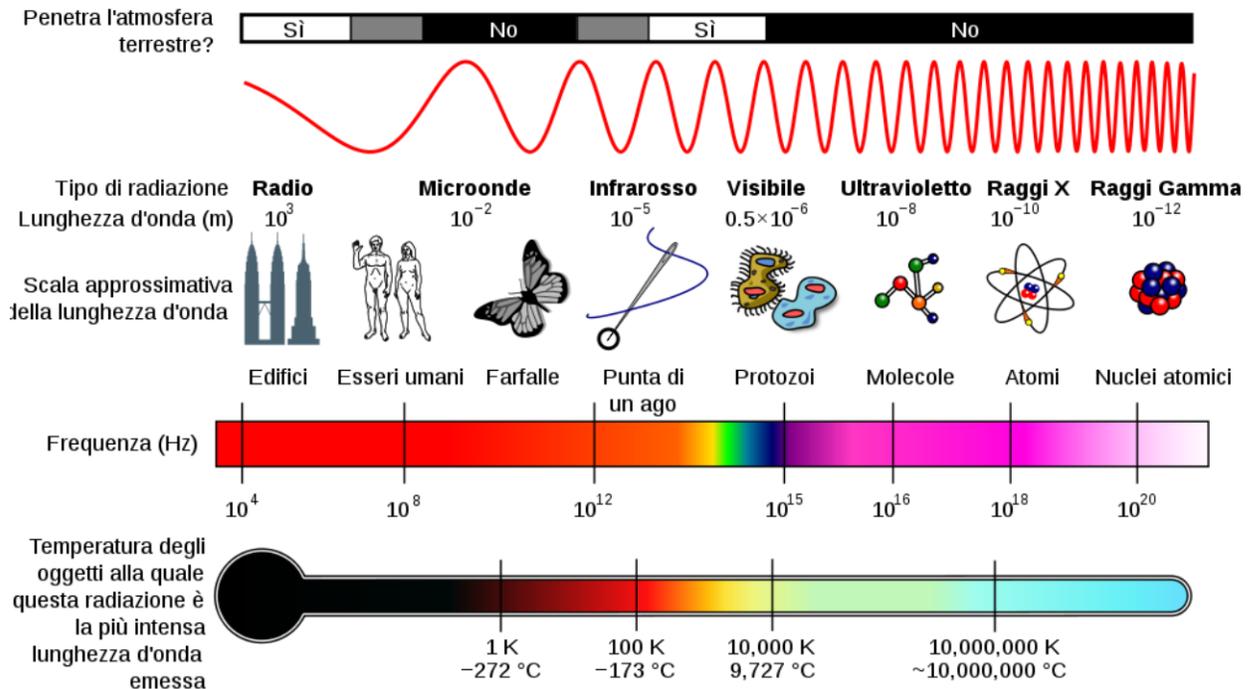
L'evoluzione della temperatura nel liquido (quindi lo scambio di calore) è dominato dalla dinamica del fluido. La parte più a contatto con la superficie a temperatura diversa sarà quasi ferma rispetto alla superficie, per via della viscosità del liquido. Lo scambio di calore sarà quindi maggiore.

# Irraggiamento

Ogni corpo caldo emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica.

E' radiazione termica o infrarossa.

Lunghezza d'onda da 1  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ .



Il calore irradiato avviene anche nel vuoto. Due corpi A e B si scambiano energia finché le temperature si uguagliano (equilibrio termico).

All'equilibrio termico l'emissione di radiazione da parte dei corpi continua, ma non ci sono variazioni di temperatura → i corpi assorbono tanta energia radiante quanta ne emettono.

Un buon emettitore è anche un buon assorbitore (altrimenti non sarebbe possibile l'equilibrio termico).

A parità di temperatura l'emissione dipende dal **potere emissivo** del corpo

**Corpo nero** è un assorbitore che assorbe tutta la radiazione incidente.

Sperimentalmente può essere rappresentato da un foro piccolo in un contenitore cavo → radiazione può entrare nel foro ma difficilmente esce

Corpo nero è anche un buon emettitore.

Capacità di emissione di altri corpi e' confrontata con il potere emissivo del corpo nero.

**Potere emissivo totale di un corpo** = energia radiante totale emessa dal corpo per metro quadro e per secondo.

Per il corpo nero vale:

$$\epsilon_0 = \sigma T^4 \quad \text{legge di Stefan-Boltzmann}$$

$\sigma$  = **costante di Stefan** =  $5.685 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

**Potere emissivo di un corpo qualunque:**  $\epsilon = e \epsilon_0$

$e$  = **emissività del corpo**  
(varia tra 0 e 1, il massimo e' ovviamente il corpo nero).

Il Tasso di calore emesso da un corpo e' dunque

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \text{tempo}} = e \sigma A T^4$$

Per il corpo umano, la superficie che conta e' la pelle, che ha  $e = 0.97$  (è dunque molto efficiente!).

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \text{tempo}} = 0.97 * \sigma * 1.8 \text{ m}^2 * 306 \text{ K} = 870 \text{ W}$$

Visto che il corpo a riposo genera solo 100 W , quindi si raffredderebbe di un grado ogni 7 minuti!... il Sole però ci scalda per irraggiamento, o la temperatura di una stanza.

Quindi una persona isolata (seduta su una panchina) e protetta dal contatto con l'aria (vestita) mantiene il proprio calore grazie all'irraggiamento.

## Potenza metabolica. Valore energetico degli alimenti

**Metabolismo basale** o **potenza metabolica basale** di un organismo umano esprime il **consumo energetico minimo dell'organismo nell'unita' di tempo**.

E' consumo di energia strettamente necessario per il mantenimento della temperatura corporea, del tono muscolare, delle funzioni cardiache, respiratorie, ghiandolari e nervose.

Potenza metabolica basale per un individuo sano e' di circa **40 kcal per m<sup>2</sup> di superficie corporea e per ora**, ovvero circa **1.2 W per kg di massa corporea**.

Per una **persona normale di 70 kg e' circa 1700 kcal al giorno**.

Se individuo non e' a riposo e a digiuno alla quota energetica di base si aggiunge la **potenza metabolica addizionale** cioe' **consumo di energia per unita' di tempo legato al lavoro muscolare, mentale, processi digestivi e accresciuti fabbisogni interni**.

La **potenza metabolica totale** e' la **somma della potenza metabolica basale e potenza metabolica addizionale** e viene compensata dall'assunzione di alimenti cioe' metabolizzazione di sostanze alimentari fondamentali (proteine, carboidrati, grassi).

Una persona adulta di 70 kg che svolge attivita' normale ha una potenza metabolica totale di circa **2500 kcal in 24 ore**.

Per lavoro fisico intenso la potenza metabolica totale puo' anche essere superiore a **4000 kcal al giorno**.

Carboidrati e proteine forniscono circa 4.1 kcal/g.

Grassi forniscono circa 9.3 kcal/g.

Energia chimica degli alimenti si converte pero' solo in parte in energia meccanica legata all'attivita' fisica svolta, anzi e' spesa maggiormente per i processi interni al corpo.