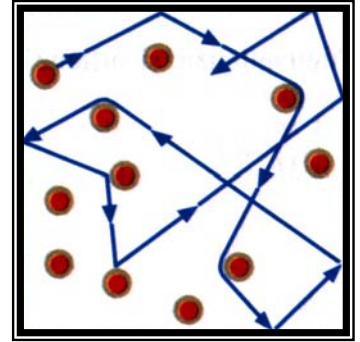


## TERMODINAMICA

quando un sistema fisico (per esempio un fluido) e' costituito da un numero molto grande di particelle (atomi o molecole) la dinamica newtoniana diventa inapplicabile (e anche inutile!)



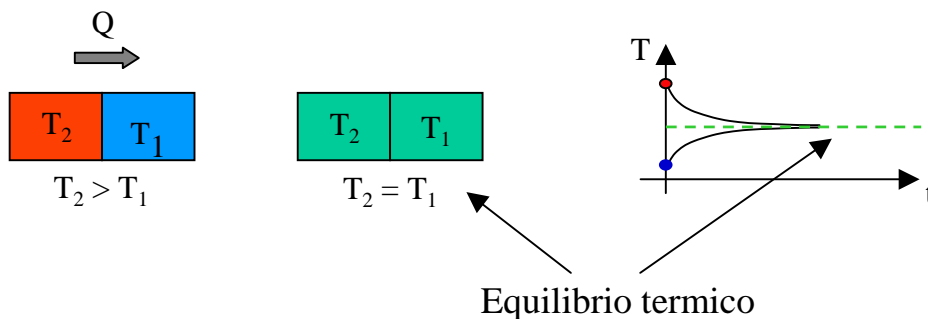
La **termodinamica** descrive le proprieta' *macroscopiche* del sistema  
 → calore, temperatura, energia interna, pressione volume, entropia, etc.  
 → studia le trasformazioni fisico-chimiche tra le varie fasi della materia  
 → pone in relazione proprieta' microscopiche e macroscopiche (teoria cinetica dei gas)

La **termodinamica** ha a che fare con i concetti di temperatura e calore

Temperatura → una misura di quanto un corpo e' caldo o freddo

Calore → energia ceduta ad un corpo per innalzarne la temperatura

Se metto a contatto (temico) due corpi a temperature differenti, avviene uno scambio di calore tale che .....



Due corpi in equilibrio termico sono alla stessa temperatura!

Principio ZERO della termodinamica!

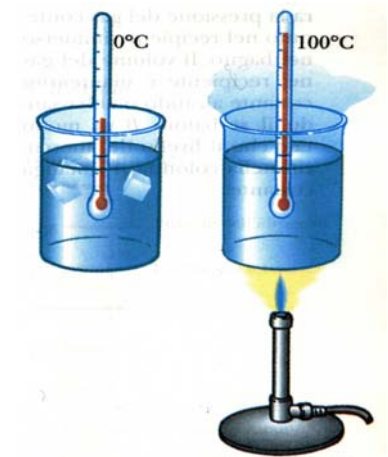
## Def. Operativa di Temperatura

- 1) misuro una proprietà fisica che varia con la temperatura
- dilatazione termica (lunghezza e/o volume)
  - variazione della pressione di un gas (a vol. Costante)
  - variazione di resistenza elettrica
  - variazione di colore di un corpo caldo

- 2) stabilisco due T di riferimento:

**0 °C** → fusione del ghiaccio a 1 atm

**100 °C** → ebollizione acqua a 1 atm



**Figura 16.1** Rappresentazione schematica di un termometro a mercurio. A causa della dilatazione termica, il livello del mercurio aumenta quando il mercurio viene riscaldato da 0°C (punto di fusione del ghiaccio) a 100°C (punto di ebollizione dell'acqua).

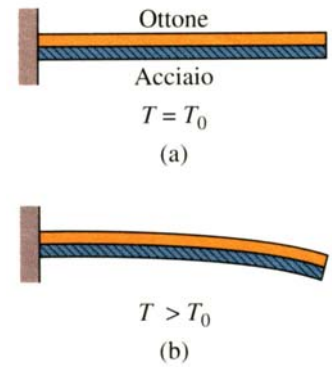
- 3) stabilisco l'unità di misura dividendo la distanza in 100 parti uguali:  
ho costruito un **termometro** in gradi Celsius (gradi centigradi)

Nel sistema MKS la temperatura si misura in gradi **Kelvin** chiamata **Temperatura Assoluta** (vedi avanti)

## Dilatazione termica

ogni materiale, solido, liquido o gassoso, e' soggetto a dilatazione termica

⇒ le sue dimensioni variano con la temperatura!



### Dilatazione lineare

$$\Delta L = L_0 \lambda \Delta T \quad \lambda \text{ coeff. dilataz. lineare} \quad [\lambda] = [^{\circ}\text{K}^{-1}]$$

### Dilatazione volumetrica

$$\Delta V = V_0 \alpha \Delta T \quad \alpha = 3\lambda \text{ coeff. dilataz. volum.} \quad [\alpha] = [^{\circ}\text{K}^{-1}]$$

**Tipicamente  $\lambda$  e  $\alpha$  sono positivi**

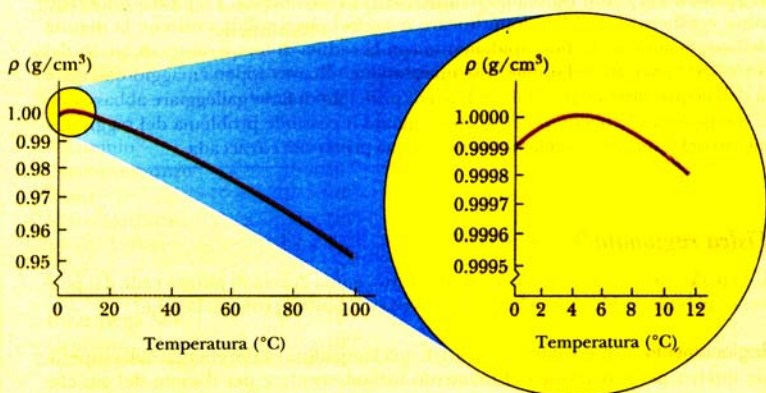
⇒ la densita'  $\rho$  aumenta al diminuire della temperatura T

#### Coefficienti di dilatazione cubica di alcuni liquidi

Sostanza	$\alpha$ ( $\text{K}^{-1}$ )
Etanolo	$1,12 \times 10^{-3}$
Glicerina	$0,53 \times 10^{-3}$
Mercurio	$0,18 \times 10^{-3}$
Olio d'oliva	$0,72 \times 10^{-3}$

## Il caso anomalo dell' acqua

Nota: per i solidi  $\alpha$  e' piu' piccola di circa un fattore 10



**Figura 16.8** La densita' dell'acqua in funzione della temperatura. L'inserto sulla destra mostra che il massimo di densita' per l'acqua si verifica a 4°C.

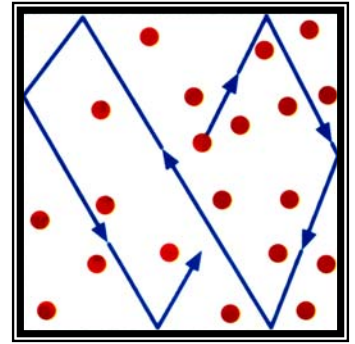
max  $\Rightarrow \rho (T=4^{\circ}\text{C}) = 1 \text{ g/cm}^3$   
poi decresce al diminuire di T



la densita' del ghiaccio e' minore di quella dell'acqua!!!

## I gas perfetti

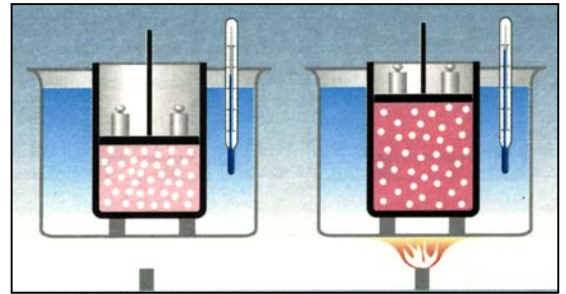
gas rarefatto (a bassa densita') nel quale le molecole non interagiscono tra loro. (urtano solo contro le pareti del contenitore).



$$\left\{ \begin{array}{l} t = \text{temperatura espressa in gradi Celsius } [^{\circ}\text{C}] \\ V_0 = \text{volume occupato dal gas a } t = 0^{\circ}\text{C} \quad [\text{m}^3] \\ p_0 = \text{pressione esercitata dal gas a } t = 0^{\circ}\text{C} \quad [\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}] \end{array} \right.$$

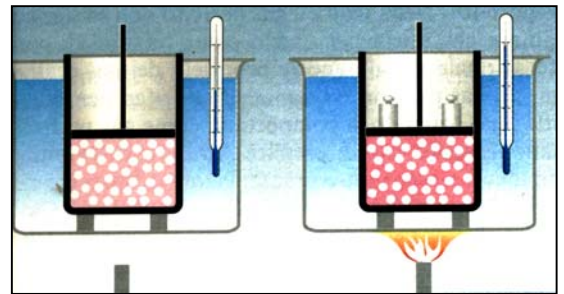
**I legge di Gay-Lussac** ( $p = \text{cost.}$ )

$$V(t) = V_0(1 + \alpha t) \quad \text{trasf. isobara}$$



**II legge di Gay-Lussac** ( $V = \text{cost.}$ )

$$p(t) = p_0(1 + \alpha t) \quad \text{trasf. isocora}$$



**Il coefficiente e' lo stesso nella I e II legge ed uguale per tutti i gas perfetti !**

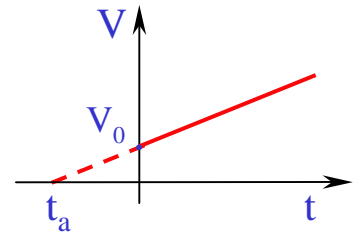


$$\alpha = 3.7 \times 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1} = (1/273.16) \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Nota:  $\alpha$  ~fattore 10 piu' grande rispetto ai liquidi

Posso ora introdurre **T assoluta**  $\Rightarrow$

- 1) trovo il valore  $t = t_a$  per cui  $V(t_a) = 0$   
 $\Rightarrow t_a = -1/\alpha = -273.16 \text{ }^\circ\text{C}$



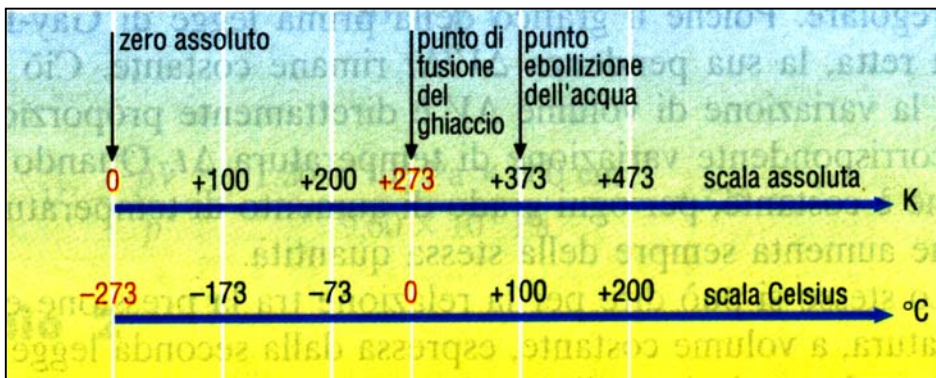
- 2) definisco la nuova temperatura  $T = t - t_a$

$$\Rightarrow T(^{\circ}\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.16$$

$$T_0 = T(0^{\circ}\text{C})$$

$\Rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{I legge G.L.} \rightarrow V(T) = V_0 (T / T_0) \\ \text{II legge G.L.} \rightarrow p(T) = p_0 (T / T_0) \end{array} \right.$

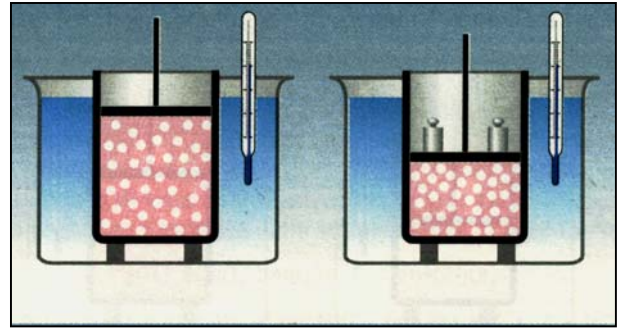
Nel si misura in gradi **Kelvin** chiamata  
**Temperatura Assoluta**



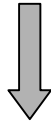
$$T(^{\circ}\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.16$$

**Legge di Boyle** ( $T = \text{cost.}$ )

$pV = k \text{ cost}$  trasf. isoterma



combinando le tre leggi  
(isoterma + isobara)



$$p V = N k_B T$$

$N = n$ . molecole del gas

$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

costante di Boltzman

**Equazione di stato dei gas perfetti**

### Nota:

- lo stato del gas e' determinato dalle tre grandezze  $p$ ,  $V$  e  $T$ , due delle quali sono indipendenti, la terza e' imposta dall'equazione di stato
- il prodotto  $pV$  e' proporzionale alla quantita' di gas presente nel contenitore, ovvero al numero  $N$  di molecole del gas

La quantita' di gas si misura anche in .... numero di **moli**



## MOLE

quantita' di materia corrispondente ad un numero  $N$  di atomi (o molecole) pari a

$$N_A = 6.02 \times 10^{23}$$



$$n \text{ (moli)} = N / N_A$$

$N_A$  = Numero di Avogadro

## Massa Molecolare

massa di una mole di sostanza (cioe' di  $N=N_A$  atomi o molecole) e si misura in grammi

### **Esempio:**

il peso molecolare dell'  $H_2O$  e'  $M=18$  g.

Qual'e' la massa  $m$  di una molecola di  $H_2O$ ?

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{18 \text{ g}}{6.023 \times 10^{23}} \sim 3 \times 10^{-23} \text{ g}$$

Posso riscrivere l'equazione di stato in termini di numero  $n$  di moli:

$$p V = N k_B T = (N / N_A) \underbrace{N_A k_B}_{R} T$$

$$p V = n R T$$

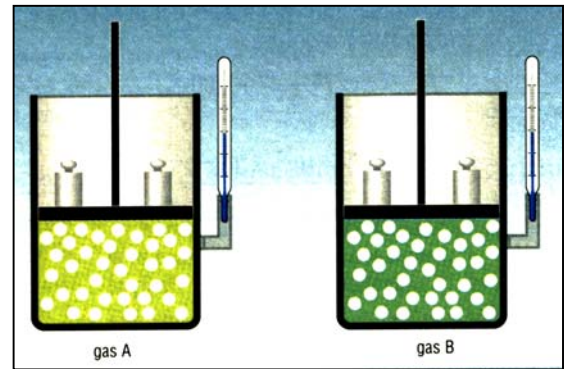
$R = 8.31 \text{ J K}^{-1}$   
costante dei  
gas perfetti

A cosa serve?  Problema delle condense!!!

## Numero e legge di Avogadro

( **A. Avogadro chimico italiano, 1776-1856** )

due gas A e B costituiti dallo stesso numero di molecole  $N$ , tenuti alla stessa pressione  $p$  e temperatura  $T$ , occupano lo stesso volume  $V$



In particolare Avogadro misuro' che  $\Rightarrow$   
 $p_0 = 1 \text{ atm}$ ,  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 mole di gas ( $N = N_A = 6.023 \times 10^{23}$ ) occupa **22.4 litri!**

**Mole: quantita' di materia corrispondente a  $N_A$  atomi (o molecole)  $\Rightarrow n \text{ (moli)} = N / N_A$**

Il numero di Avogadro  $N_A$  si misura prendendo 12 g. di dell'isotopo  $^{12}_6\text{C}$  e dividendo per la massa  $m_C$  di un atomo di carbonio

$$N_A = \frac{\text{PM} ( ^{12}_6\text{C} )}{m_C} = \frac{12 \text{ g}}{1.99 \times 10^{-26} \text{ kg}} = 6.023 \times 10^{23}$$

n. massa A  
 $\downarrow$   
 $^{12}_6\text{C}$   
 $\uparrow$   
 n. atomico Z

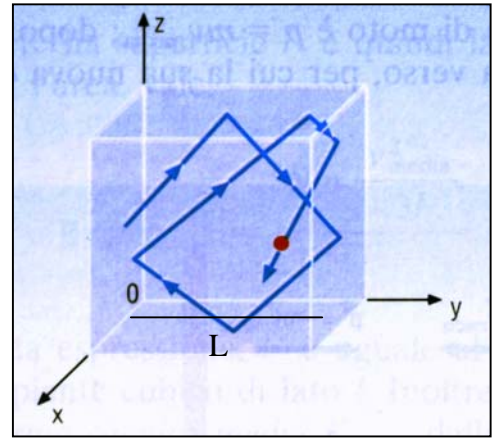


# Teoria cinetica dei gas

**P, V, T (macrosc.) ↔ v, K (microsc.)**

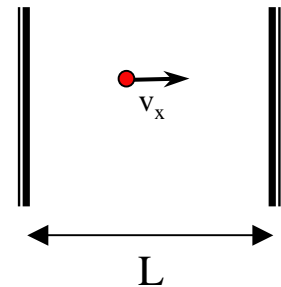


Leggi della dinamica



## Esercizio:

trovare la pressione **P** esercitata da **N** molecole che si muovono con velocità **v<sub>x</sub>** tra le pareti di una scatola cubica di volume **V = L<sup>3</sup>**



Applicando le leggi della meccanica e' facile trovare che

$$P = \frac{2}{3} N \frac{\langle E_c \rangle}{V} \quad \longrightarrow \quad \langle E_c \rangle = (1/2) m v^2 \quad \text{Energia cinetica media molecole}$$

combinando con equazione di stato,

$$\begin{cases} P V = \frac{2}{3} N \langle E_c \rangle \\ P V = N k_B T \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\langle E_c \rangle = \frac{3}{2} k_B T}$$

La  $T_{\text{ass.}}$  e' una misura dell'energia cinetica media delle molecole!!!

## Esercizio:

come dipende la velocità della temperatura?

In termini di velocità  $v_{qm}$

$$v_{qm} \equiv \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3 k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3 R T}{M}}$$

Esempio : gas di  $O_2$  a  $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$        $M(O_2) = 32 \text{ g}$

$$v_{qm} = \sqrt{\frac{3 \times 8.31 \times 300 \text{ (J/K) K}}{32 \times 10^{-3} \text{ kg}}} \sim 483 \text{ m/s}$$



$$\begin{cases} \text{un urto (elastico)} & f = m a_x = m [\Delta v_x / \Delta t] = 2 m v_x / \Delta t \\ \text{n urti in } \Delta t & n = (v_x \Delta t) / 2 L \end{cases}$$

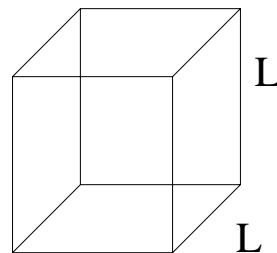
$$\Rightarrow \langle F \rangle = n f = m (v_x)^2 / L$$



$N$  molecole nella scatola  $\Rightarrow N/3$  si muovono lungo asse  $x \Rightarrow$

$$\langle F \rangle = \frac{N}{3} \frac{m \langle v_x \rangle^2}{L} = \frac{2}{3} N \frac{\langle E_c \rangle}{L}$$

$$P = \frac{\langle F \rangle}{A} = \frac{2}{3} N \frac{\langle E_c \rangle}{V}$$



$$A = L^2$$

$$V = L^3$$

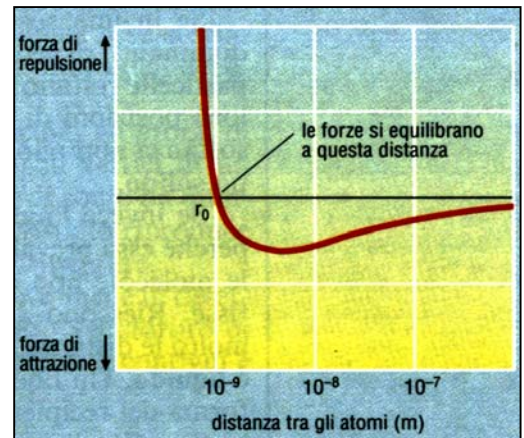
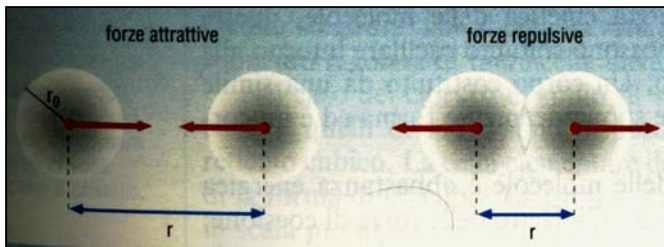
L

## Gas perfetto

molecole non interagenti  $\Leftrightarrow$  Energia del gas = K delle molecole

## Gas reale

molecole interagiscono  $\Leftrightarrow$  Energia del gas = K delle molecole +  $U_{\text{pot}}$

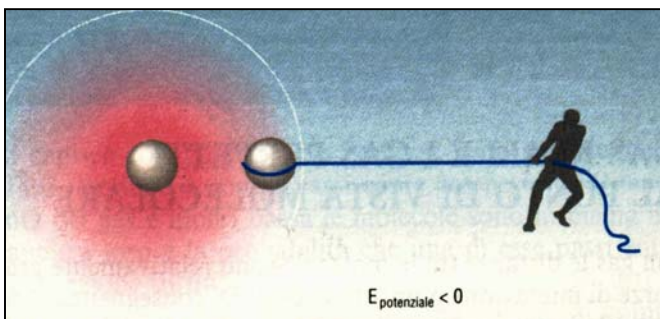


### modello molecole:

sfere rigide di raggio  $r_0 \sim 10^{-9}$  m che per

- $d < r_0 \rightarrow$  si respingono
- $d > r_0 \rightarrow$  si attraggono

$$d \gg r_0 \rightarrow F = 0$$



per separare due molecole da vicino a lontano  $\rightarrow$  bisogna compiere lavoro

$$\Delta U = L_{\text{ext}}$$

- l'energia potenziale finale U e' maggiore!
- se  $U(d \gg r_0) = 0 \rightarrow U(d \sim r_0) < 0$

In generale quindi  $\Rightarrow$

$$E_{\text{int}} = K + U$$

$$E_{\text{int}} = K + U$$

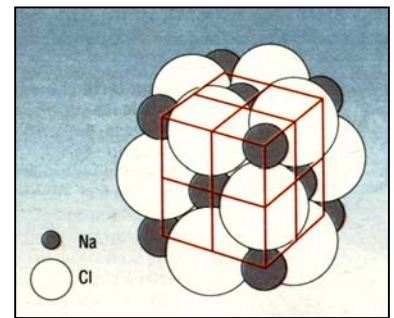
ricordarsi che  $K = K(T)$

- $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{K} \rightarrow \text{moto di agitazione termica che tende a } \textit{separare} \text{ le molecole} \\ \mathbf{U} \rightarrow \text{forze di attrazione che tendono a } \textit{tenere unite} \text{ le molecole} \end{array} \right.$

$\mathbf{K} \rightleftharpoons \mathbf{U} \rightarrow$  determina gli stati di aggregazione (o *fasi*) della materia

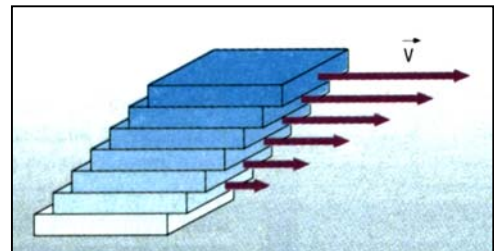
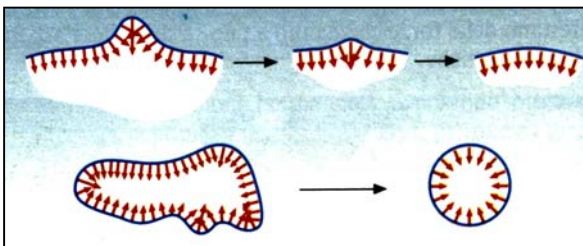
### SOLIDO ( $U \gg K$ )

le molecole occupano posizioni (quasi) fisse  
 $\Rightarrow$  solido  $\leftrightarrow$  forma propria (reticolo cristallino)  
 proprieta'  $\rightarrow$  elasticita'



### LIQUIDO ( $U \sim K$ )

le molecole possono muoversi, ma restano vicine  
 $\Rightarrow$  liquido  $\leftrightarrow$  volume proprio  
 proprieta'  $\rightarrow$  tensione superficiale - capillarita' - viscosita'



### GAS ( $U \ll K$ )

le molecole si muovono (quasi) liberamente  
 $\Rightarrow$  gas  $\leftrightarrow$  ne' forma, ne' volume proprio  
 proprieta'  $\rightarrow$  compressibilita'

**Cambiando T**  
 $\downarrow$   
**cambio K**  
 $\downarrow$   
**passaggio di stato**

$$E_{\text{int}} = K + U \quad \longrightarrow \quad \Delta E_{\text{int}} = \Delta K + \Delta U$$

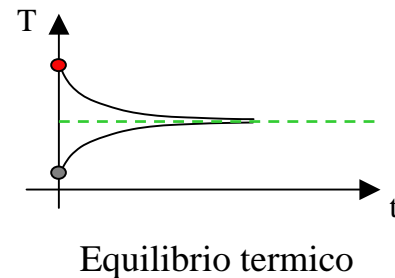
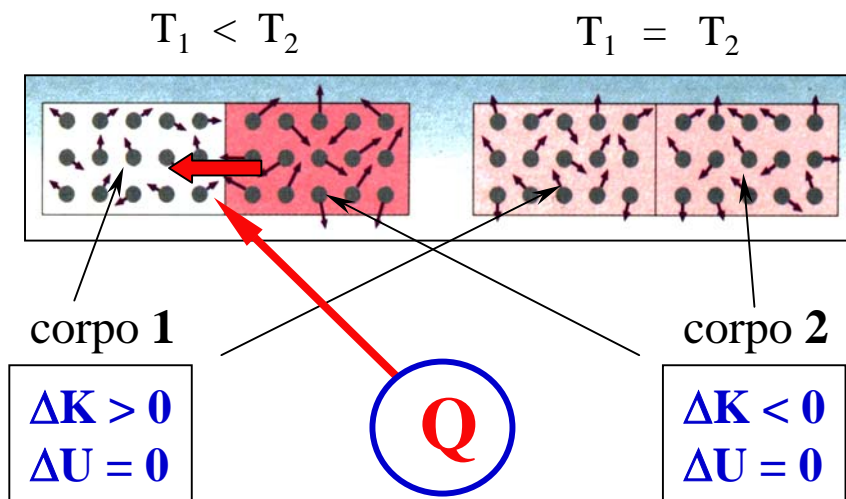
Ho *due* modi di cambiare  $E_{\text{int}}$  !

- 1) **Cambiare K variando T** (senza cambiare il volume V)
- 2) **Cambiare U variando V** (senza cambiare la temp. T)



## ? Come posso far cambiare K

- 1a) mettere a contatto (termico) due corpi a T diverse in modo che **calore** venga trasferito dal corpo caldo a quello freddo.



**Definizione di caloria:** quantita' di energia necessaria a

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ g di H}_2\text{O} \\ \Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{K} \end{array} \right\} \longleftrightarrow 1 \text{ caloria}$$

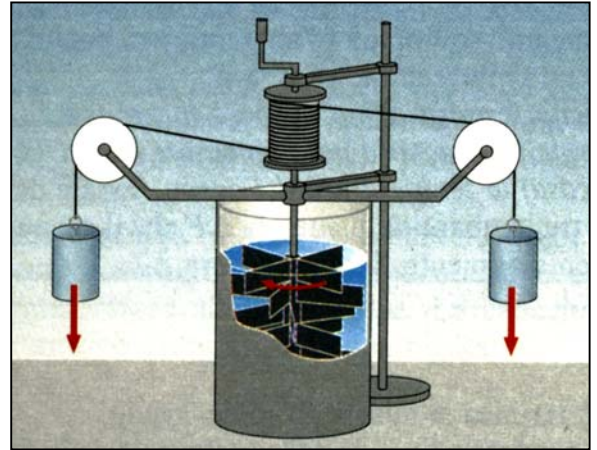
$$\left( \begin{array}{l} \text{in realta' } \Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{tra } 14.5 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 15.5 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right)$$

**1b)** compiere lavoro meccanico  $L_{\text{ext}}$  sul sistema.

## Esperimento di Joule

lasciando cadere i pesi, compio lavoro meccanico sul sistema.

→ le molecole si muovono più velocemente, la  $T$  del liquido aumenta!



Energia meccanica  
 $\Rightarrow$  aumento di  $E_{\text{int}}$   $\begin{cases} \Delta K > 0 \text{ (e' aumentata } T) \\ \Delta U = 0 \text{ (V non e' cambiato)} \end{cases}$

**Joule misuro' che :**  $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ Kg di H}_2\text{O} \\ \Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{K} \end{array} \right\} \longleftrightarrow 4186 \text{ J}$

### Altri esempi:

- trapano, freni macchina
- strofinarsi le mani quando e' freddo

Combinando exp. **1a)** e **1b)** trovo:



**Equivalente meccanico del calore**

$$\boxed{1 \text{ caloria} = 4.186 \text{ J}}$$

## ? Come posso far cambiare U

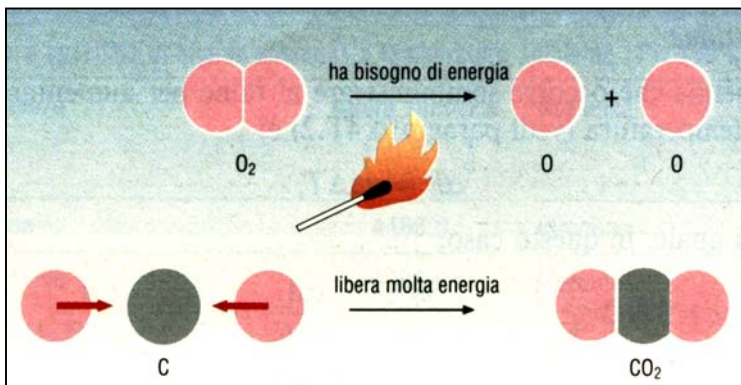


Variando la configurazione (la distanza) tra le molecole del sistema.

**2a)** in ogni passaggio di stato la distanza media fra le molecole varia senza che cambi la temperatura. Per cambiare tale distanza occorre cedere al sistema del calore (latente), vedi lezione sui passaggi di stato.

**2b)** in ogni reazione chimica la configurazione delle molecole varia, poiche' si formano nuovi legami.

### Esempio: combustione



L'energia liberata per formare  $\text{CO}_2$  e' circa il doppio di quella spesa per scindere  $\text{O}_2$

### Esercizio:

? Sollevamenti di un peso da  $20 \text{ kg} \times 1 \text{ m} \Leftrightarrow$  consumare un pasto da 2000 Calorie-cibo

### Nota:

1 Caloria-cibo = 1000 cal

## Capacita' termica

non tutti i corpi subiscono lo stesso  $\Delta T$  a pari  $\Delta E$ .

$$\Delta E = C \Delta T$$

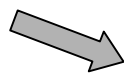
oppure

$$\Delta Q = C \Delta T$$

$$[C] = [J / ^\circ K]$$

$C \rightarrow$  capacita' termica del corpo

$C$  e' proporzionale alla massa  $m$  del corpo!  $\rightarrow$  **Inerzia termica**



$$C = c m$$

$$[c] = [J / ^\circ K \text{ kg}]$$

**calore specifico**

Calore specifico di alcune sostanze a temperatura ambiente ( $T = 298 \text{ K}$ ) e pressione atmosferica			
Sostanza	calore specifico ( $\frac{J}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ )	Sostanza	calore specifico ( $\frac{J}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ )
Acqua	4186,0	Idrogeno	14 985,9
Alluminio	962,8	Mercurio	138,1
Anidride carbonica	837,2	Oro	134,0
Argento	238,6	Ossigeno	920,9
Aria	1004,6	Ottone	376,7
Carbonio	506,5	Rame	389,3
Elio	5232,5	Vapore d'acqua	2009,3
Ferro	481,4	Vetro (in media)	837,2

**Notare il  $c$  dell'acqua!!!  
(altra anomalia)**



$\text{H}_2\text{O} \rightarrow$  elemento essenziale per "regolare" la temperatura  
 $\rightarrow$  clima temperato

Giorno



(a)

Notte



(b)

### *Fenomeno delle brezze*

giorno:  $T_{\text{terra}} > T_{\text{mare}}$   
 $\Rightarrow$  aria calda sulla terra sale  
 e arriva la fredda dal mare  
 $\rightarrow$  brezza: mare  $\rightarrow$  terra

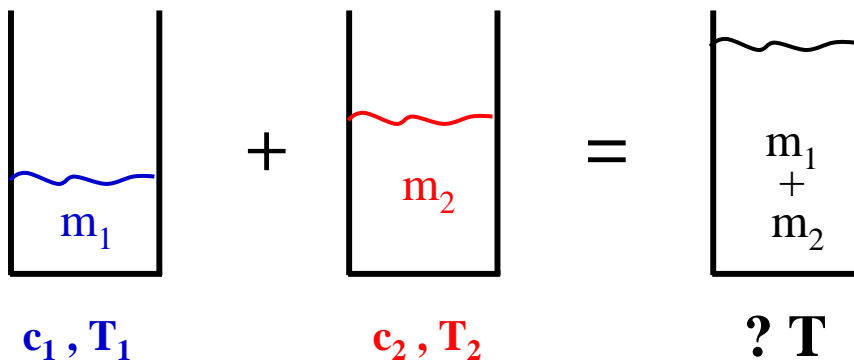
notte:  $T_{\text{terra}} < T_{\text{mare}}$   
 $\rightarrow$  brezza: terra  $\rightarrow$  mare



esercizio

trovare la temperatura finale di equilibrio  $T$  che si ottiene mescolando i due liquidi .

Dati:  $m_1, c_1, T_1, m_2, c_2, T_2$  ( $T_2 > T_1$ )

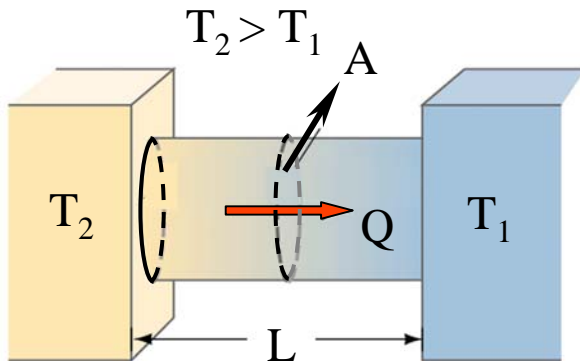
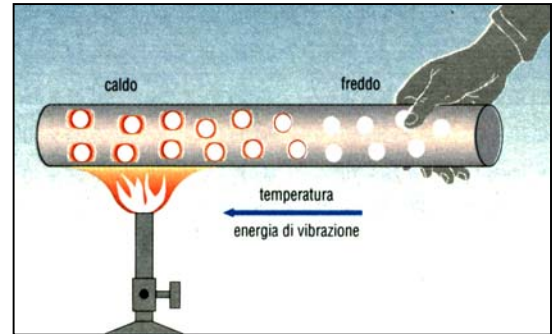


Suggerimento:  $\Delta Q_{1 \rightarrow 2} = - \Delta Q_{2 \rightarrow 1}$

## Trasmissione del calore: $\Rightarrow$ 3 meccanismi

### Conduzione

- avviene nei corpi solidi
- non c'è trasporto di materia
- dipende dalla conducibilità  $\lambda$  del materiale e dalla geometria del sistema



$$\Delta Q / \Delta t = \lambda \frac{A}{L} \Delta T$$

$\lambda$  = conduttività termica

$$[\lambda] = [\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}]$$

Argento = 460

Acqua = 0.4

Ferro = 67

Aria secca = 0.02

Legno = 0.2

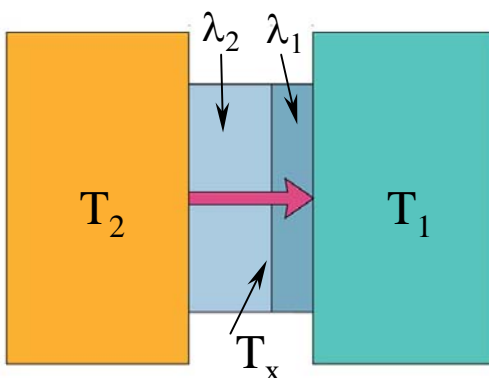
Poliuretano exp. = 0.024

Vetro = 0.9

Lana vetro/roccia = 0.045

### Esercizio

Calcolare la potenza dissipata attraverso i due strati in figura e la temperatura all'interfaccia

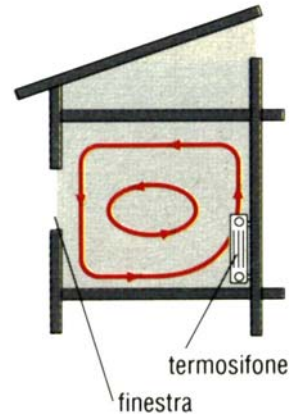
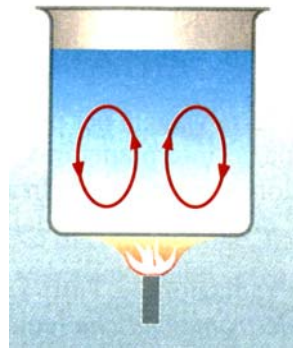


$$T_x = \frac{(L_2 / \lambda_2) T_1 + (L_1 / \lambda_1) T_2}{(L_1 / \lambda_1) + (L_2 / \lambda_2)}$$

$$P = \frac{A \Delta T}{(L_1 / \lambda_1) + (L_2 / \lambda_2)}$$

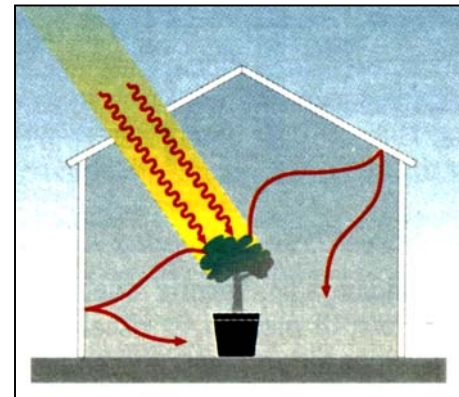
## Convezione

- avviene nei fluidi (liquidi e gas)
- c'è trasporto di materia
- avviene solo dal “basso verso l’alto”



## Irraggiamento

- avviene nel vuoto alla velocità della luce ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) → onde elettromagnetiche
- tutti i corpi irradiano (dipende da  $T$ )  
 $T > 1000 \text{ °C}$  → visibile;  $T < 1000 \text{ °C}$  → IR
- energia assorbita dipende dalla caratteristica del materiale: opachi e trasparenti
- serra ed effetto serra a causa della  $\text{CO}_2$
- costante solare =  $1350 \text{ W/m}^2$



### Esercizio 1

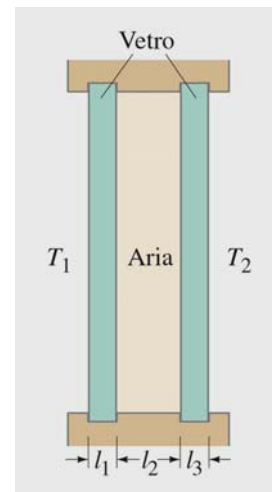
Calcolare la potenza necessaria per tenere riscaldata una vecchia casa fatta di mattoni pieni e finestre a singolo vetro sapendo che

salto di temperatura	$\Delta t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
superficie mattoni	$A_1 = 100 \text{ m}^2$
spessore muro	$L_1 = 0.5 \text{ m}$
conducibilita' mattoni	$\lambda_1 = 0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$
superficie vetro	$A_2 = 5 \text{ m}^2$
spessore vetro	$L_2 = 5 \text{ mm}$
conducibilita' vetro	$\lambda_2 = 1 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$

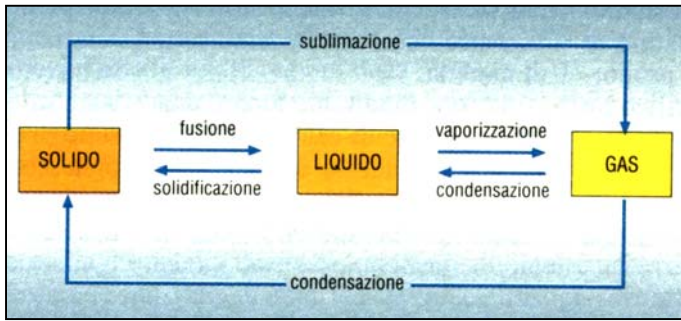
### Esercizio 3

Supponendo con  $\Delta t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , calcolare la potenza dissipata attraverso una finestra di superficie  $A = 5 \text{ m}^2$ , costituita da “doppi vetri” con le seguenti caratteristiche

spessore vetri	$l_1 = l_2 = 5 \text{ mm}$
conducibilita' vetro	$\lambda_v = 1 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$
spessore aria	$l_a = 10 \text{ mm}$
conducibilita' aria	$\lambda_a = 0.01 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$

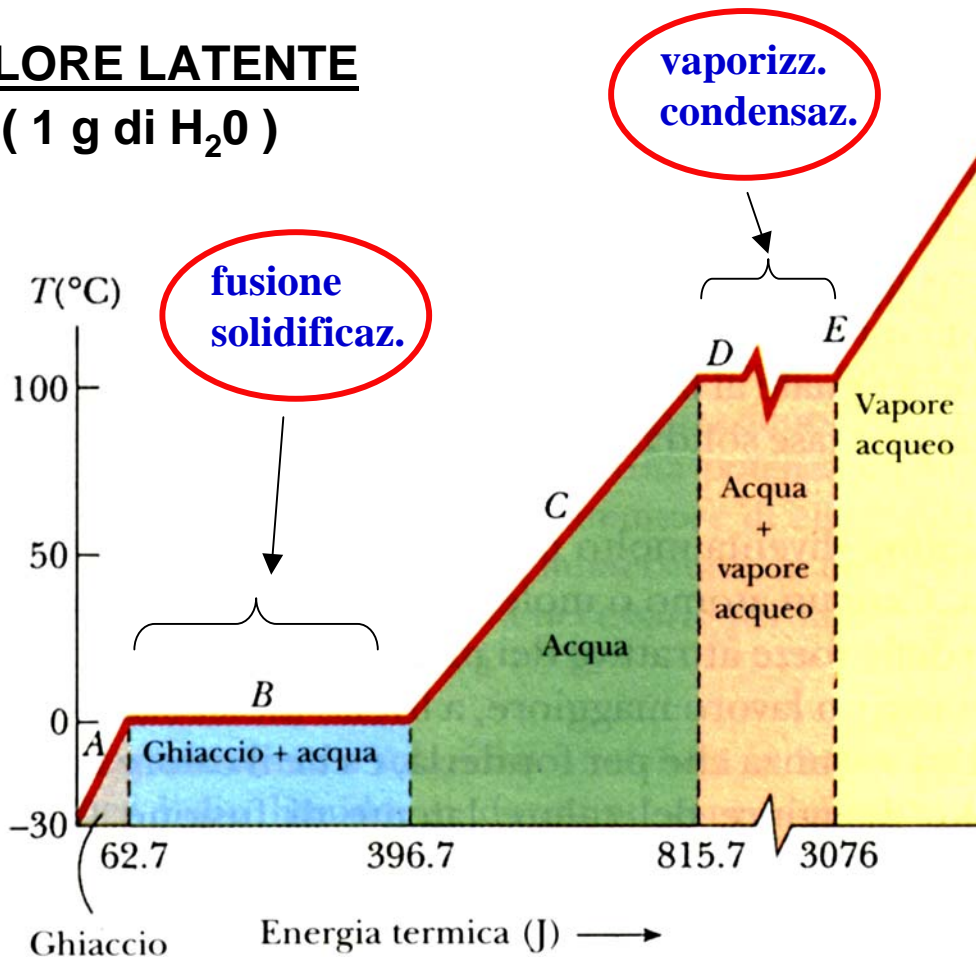


# I passaggi di stato



Solido  $\rightarrow$  liquido  $\rightarrow$  gas  
 $\Rightarrow$  le molecole hanno maggiore K  
 $\Rightarrow$  devo fornire Energia al sistema!

## CALORE LATENTE ( 1 g di H<sub>2</sub>O )



Calore latente  $\rightarrow$

Energia richiesta per il passaggio di stato a  
 $T = \text{costante}$

Esempio H<sub>2</sub>O

$$c_{\text{fus}} = c_{\text{sol}} = 3.3 \times 10^5 \text{ J / kg}$$

$$c_{\text{vap}} = c_{\text{con}} = 2.3 \times 10^6 \text{ J / kg}$$

$$c_{\text{lat}} = \Delta E / \Delta m$$

$$[c_{\text{lat}}] = [\text{J / kg}]$$

## Esercizio

sia dato un blocco di ghiaccio di massa  $m = 1 \text{ kg}$  alla temperatura di  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Domanda a)

Quanto calore occorre fornire al sistema per ottenere acqua a  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  ?

Domanda b)

Quale sarà lo stato finale del sistema e la sua temperatura se si fornisce al ghiaccio un calore pari a  $200 \text{ kJ}$  ?

Dati:

$$c (\text{ghiaccio}) = 2500 \text{ J / }^\circ\text{K kg}$$

$$c_{\text{fus H}_2\text{O}} = 3.3 \times 10^5 \text{ J / kg}$$

$$c (\text{H}_2\text{O}) = 4186 \text{ J / }^\circ\text{K kg}$$

Suggerimento:  $Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$

$Q_1$  = calore necessario per far passare il ghiaccio da  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$

$Q_2$  = calore necessario a fondere il ghiaccio a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$

$Q_3$  = calore necessario per far passare l'acqua da  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$

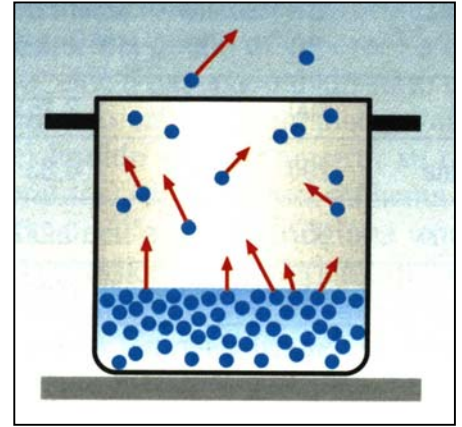
## Pressione di vapore

T, P

**Vaporizzazione**: processo di fuga delle molecole dalla superficie di un liquido

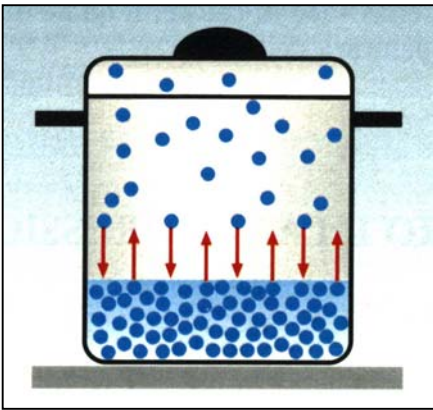
$$\langle E_c \rangle = 3/2 k_B T$$

le molecole vicine alla superficie con  $E \gg E_c$  possono sfuggire (evaporare!)



- energia media molecole rimaste diminuisce  $\Rightarrow$  il liquido si raffredda
- occorre fornire energia  $\Rightarrow$  calore latente di vaporizzazione
- notare: la velocità di vaporizzazione dipende da T e P

T, V



Fisso ora T e V

(pentola chiusa e “svuotata” di aria)

all'equilibrio (termo)-dinamico  $\Rightarrow$

n. molec. che sfuggono = n. molec. che rientrano

il vapore e' *saturo*  $\Rightarrow$

**$P_{\text{vap}}$**

- fissata T, se cambio V,  $P_{\text{vap}}$  non varia ! (cambiano  $V_{\text{liq}}$  e  $V_{\text{vap}}$ )
  - aumento V  $\rightarrow$  piu' mlecole passano nella fase vapore
  - diminuisco V  $\rightarrow$  piu' mlecole passano nella fase liquida

? Sudorazione, ventilatore, vento

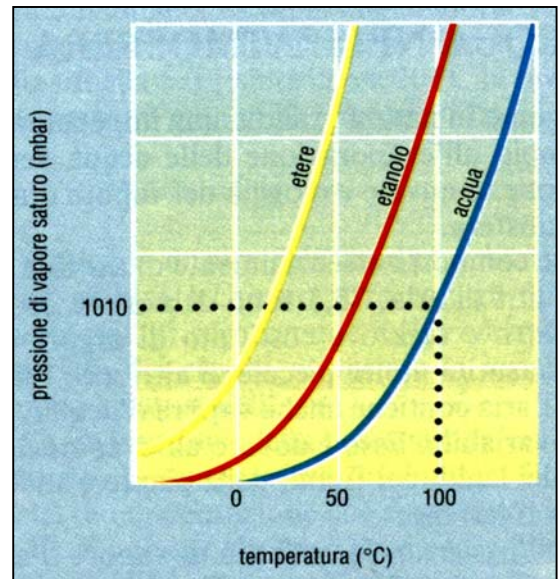
**La  $P_{\text{vap}}$  dipende da T**  
( e dal tipo di sostanza)

### Ebollizione:

la transizione liquido  $\rightarrow$  vapore avviene su tutto il volume del liquido

$$(P_{\text{vap}} > P_{\text{ext}})$$

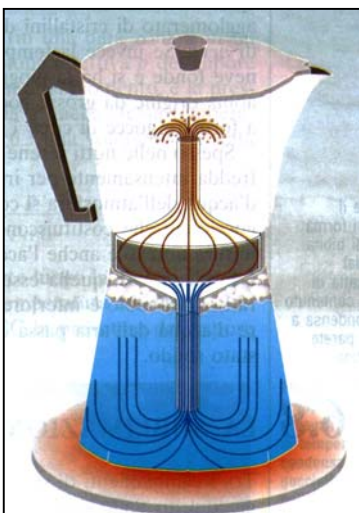
- quando l'acqua raggiunge  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $\rightarrow P_{\text{vap}} = 1\text{ atm} \Rightarrow$  se  $P_{\text{ext}} = 1\text{ atm}$ ,  
l'acqua inizia a bollire! ( e T non sale piu'!)



**$P_{\text{vap}}(\text{H}_2\text{O})$  a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $\sim 0.02\text{ atm}$**

Qualche domanda :

- ? perche' d'inverno piove di piu'?
- ? perche' la pentola a pressione cuoce piu' in fretta ?
- ? perche' a volte l'acqua bolle "istantaneamente" quando aggiungiamo sale o riso ? ( fenomeno "supersaturazione")
- ? quale pressione "sento" in una sauna a  $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ?  
(sauna = ambiente saturo di vapore acqueo)



### Un buon esercizio:

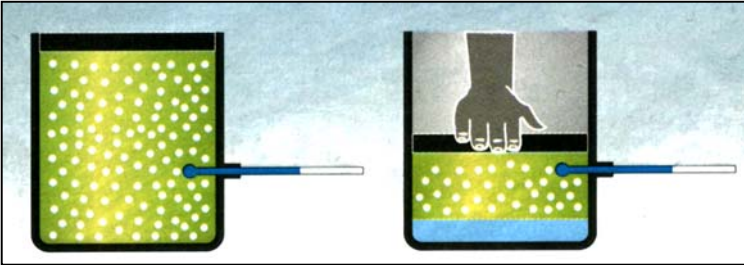
spiegare come funziona la  
macchinetta del caffe'!

Inizialmente  $P_{\text{liq}} = 1\text{ atm} + P_{\text{vap}}$  e' piccola!  
a  $T \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow P_{\text{liq}} \sim 1.5\text{ atm}$  ( $T_{\text{eboll}} \sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  
e' sufficiente a vincere gravita' + resistenza filtro  
e l'acqua sale senza bollire!  
Alla fine c'e' solo vapore e si sente il gorgoglio!

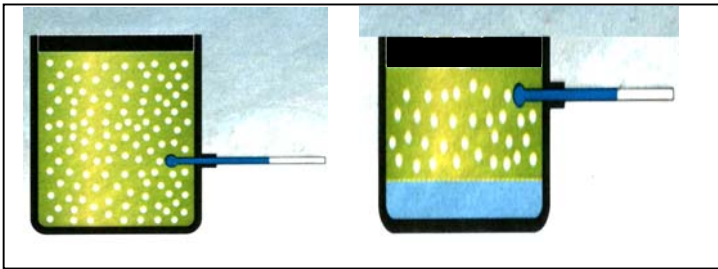


# Condensazione

1) aumentare la pressione a T costante



2) diminuire la temperatura a P costante

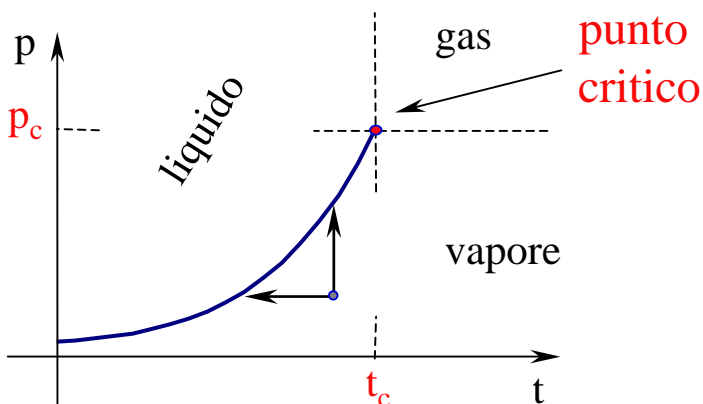


Temperatura critica	
Sostanza	°C
Acqua	374
Ammoniaca	132
Anidride carbonica	31
Ossigeno	-119
Azoto	-147
Idrogeno	-240
Elio	-268

Il gas d'acqua esiste a temperature superiori a 374 °C.

.... ma non sempre e' possibile liquefare un vapore!!

## curva liquido-vapore



### Definizione:

un gas e' un vapore non liquefabile, ovvero

$$\rightarrow \begin{cases} t > t_c \\ p > p_c \end{cases}$$

## Applicazione: il problema delle condense

temp [C]	p_vap0 [mbar]	c_sat [g / m <sup>3</sup> ]
0	6.1	4.8
5	8.7	6.8
10	12.3	9.4
15	17.0	12.8
20	23.4	17.3
25	31.6	23.0
30	42.4	30.3
35	56.1	39.5
40	73.7	50.9
45	95.7	65.1
50	123.2	82.6
55	157.2	103.8
60	199.0	129.4
65	250.0	160.1
70	311.7	196.8
75	385.9	240.1
80	474.6	291.1
85	579.8	350.7
90	704.1	420.0
95	850.1	500.2
100	1020.6	592.4

Supponiamo che il vapor d'acqua saturo possa essere considerato come un gas perfetto (\* vedi esercizio).  
Se  $p_0(T)$  e' la sua pressione di vapore saturo alla temp. T

$$\longrightarrow p_0(T) V = n R T$$

$$\longrightarrow c_0(T) = \frac{p_0(T) M}{R T}$$

$c_0(T)$  = conc (kg/m<sup>3</sup>) del vapore saturo

Uguualmente, se il vapore non e' saturo



$$\left\{ \begin{array}{l} p(T)V = n R T \\ c(T) = \frac{p(T) M}{R T} \end{array} \right.$$

Formula di Magnus

$$p_0(t) = p_0(0) 10^{\frac{at}{(b+t)}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_0(0) \text{ [mbar]} = 6.10 \\ a \text{ [1/C]} = 7.50 \\ B \text{ [C]} = 237.30 \end{array} \right.$$

DEFINIZIONE:  
Umidita' Relativa (UR)

$$UR = \frac{p(T)}{p_0(T)} = \frac{c(T)}{c_0(T)}$$

## Applicazione: il problema delle condense

temp [C]	p_vap0 [ mbar ]	c_sat [ g / m <sup>3</sup> ]
0	6.1	4.8
5	8.7	6.8
10	12.3	9.4
15	17.0	12.8
20	23.4	17.3
25	31.6	23.0
30	42.4	30.3
35	56.1	39.5
40	73.7	50.9
45	95.7	65.1
50	123.2	82.6
55	157.2	103.8
60	199.0	129.4
65	250.0	160.1
70	311.7	196.8
75	385.9	240.1
80	474.6	291.1
85	579.8	350.7
90	704.1	420.0
95	850.1	500.2
100	1020.6	592.4

$\Delta T$ di condensazione ( C )						
Umidita' Relativa						
0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
15.5	12.0	9.2	6.8	4.8	3.0	1.4
16.1	12.5	9.5	7.1	5.0	3.2	1.5
16.8	13.0	9.9	7.4	5.2	3.3	1.6
17.4	13.5	10.3	7.7	5.4	3.4	1.6
18.1	14.0	10.7	8.0	5.6	3.6	1.7
18.8	14.5	11.1	8.3	5.9	3.7	1.8
19.5	15.1	11.6	8.6	6.1	3.8	1.8
20.2	15.6	12.0	8.9	6.3	4.0	1.9
20.9	16.2	12.4	9.3	6.5	4.1	2.0
21.6	16.8	12.9	9.6	6.8	4.3	2.0
22.4	17.3	13.3	9.9	7.0	4.4	2.1
23.1	17.9	13.8	10.3	7.3	4.6	2.2
23.9	18.5	14.2	10.6	7.5	4.7	2.3
24.7	19.1	14.7	11.0	7.7	4.9	2.3
25.4	19.8	15.2	11.3	8.0	5.1	2.4
26.2	20.4	15.7	11.7	8.3	5.2	2.5
27.1	21.0	16.2	12.1	8.5	5.4	2.6
27.9	21.7	16.7	12.4	8.8	5.6	2.6
28.7	22.3	17.2	12.8	9.1	5.7	2.7
29.6	23.0	17.7	13.2	9.3	5.9	2.8
30.4	23.7	18.2	13.6	9.6	6.1	2.9

## Problema

- un vapore saturo puo' essere considerato un gas perfetto ?
- a che distanza fra loro stanno (mediamente) le molecole di acqua?

Suggerimenti:

calcolare la concentrazione numerica  $N/V$

e la distanza media  $d \sim (N/V)^{-1/3}$