

Fisica

Leonello Servoli

Leonello.servoli@pg.infn.it

Tel.: 0039-348-3345847

<http://www.fisica.unipg.it/~servoli>

8 novembre	5	
11 novembre	6	
15 novembre	7	
29 novembre	8	
6 dicembre	9	
9 dicembre	10	
13 dicembre	11	
20 dicembre	12	

TEMPERATURA E GAS (1)

Le masse degli atomi sono usualmente misurate in una scala (**uma**) nella quale la massa del carbonio ^{12}C è 12.

$$1 \text{ uma} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

Si definisce **mole** la quantità di sostanza la cui massa espressa in grammi è numericamente eguale agli uma.

$$M(\text{CO}_2) = M(\text{C}) + 2M(\text{O}) =$$

$$12 + 32 = 44 \text{ uma}$$



Una mole di CO_2
pesa 44 gr

Il numero di Avogadro

$6.02 \cdot 10^{23}$ molecole

TEMPERATURA E GAS (2)

Nella Termodinamica si cerca di costruire un modello al quale applicare i tre Principi della Dinamica (inerzia, forza ed azione&reazione) per calcolare le tre osservabili cinematiche: spazio, velocità ed accelerazione.

Dalla meccanica sappiamo che occorre conoscere le *condizioni al contorno* (spazio e velocità iniziali) e risolvere



Siamo di fronte ad una impossibilità, non teorica, ma pratica di risolvere, con gli strumenti della meccanica il problema termodinamico.

In un anno ci sono

$$60 \times 60 \times 24 \times 365 = 31536000 \approx 3.2 \cdot 10^7 \text{ s}$$

Supponiamo di riuscire, usando un computer, a risolvere 1000 $F=ma$ al secondo, quindi in un anno risolviamo

$$10^3 \text{ equazioni/s} \times 3.2 \cdot 10^7 \text{ s/anno} = 3.2 \cdot 10^{10} \text{ equazioni/anno}$$

Per risolverne un numero di Avogadro ci impiegheremmo

$$\frac{6.02 \cdot 10^{23} \text{ equazioni}}{3.2 \cdot 10^{10} \text{ equazioni/anno}} \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ anni}$$

Eta' stimata
dell'Universo

$1.5 \cdot 10^{10}$ anni

MICRO  MACRO

Si rinuncia ad una rappresentazione puntuale del Sistema (perché occorrerebbe risolvere $6 \cdot 10^{23} F=ma$) e si ricorre ad una *rappresentazione media dello stato del sistema*, cioè si usano variabili globali, macroscopiche dette **variabili di stato**

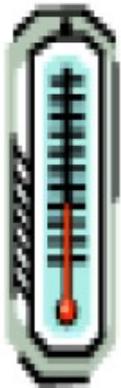
Volume  Posizione

Pressione  Forza

TEMPERATURA (1)

Un'altra importante variabile di stato è la

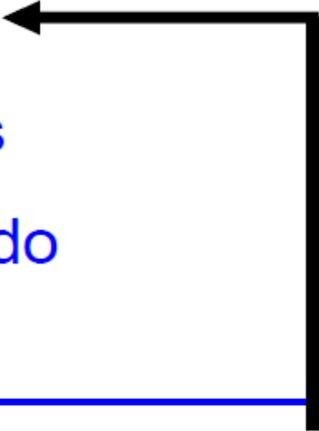
TEMPERATURA



TEMPERATURA (2)

Il corpo umano percepisce le variazioni di temperatura con le sensazioni di caldo e freddo

Molte grandezze fisiche variano al variare della temperatura

- volume dei corpi
 - pressione di un gas
 - viscosità di un liquido
 - resistenza elettrica
- 

È possibile usare una di queste grandezze fisiche per definire e misurare la temperatura

ESPANSIONE TERMICA

Quasi tutti i corpi si dilatano quando la temperatura aumenta

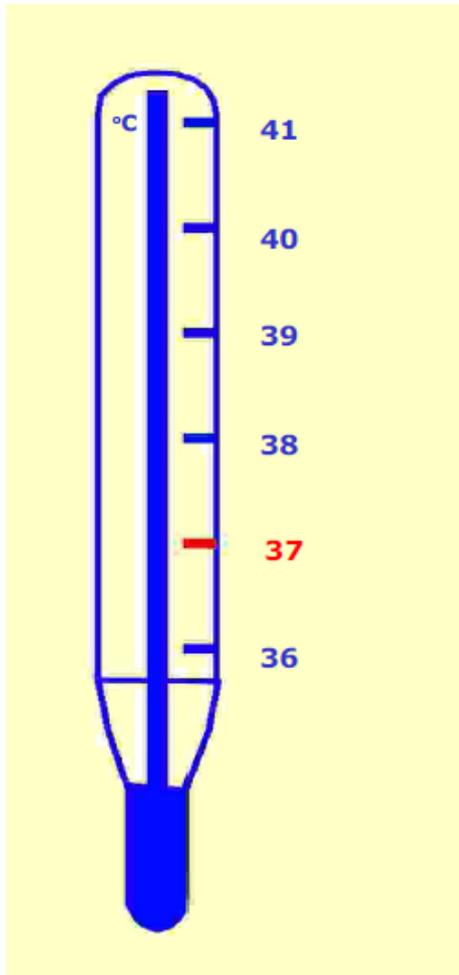
$$V = V_0(1 + \beta\theta)$$

β è il coefficiente di espansione cubica (di volume)

Sfruttando queste proprietà si può misurare la temperatura, ad esempio con termometro a mercurio: cioè un tubo di vetro riempito di mercurio. Quando sale la temperatura θ il volume del mercurio cresce molto più rapidamente di quello del vetro

$$\beta_{Hg} \gg \beta_{vetro}$$

MISURA DELLA TEMPERATURA



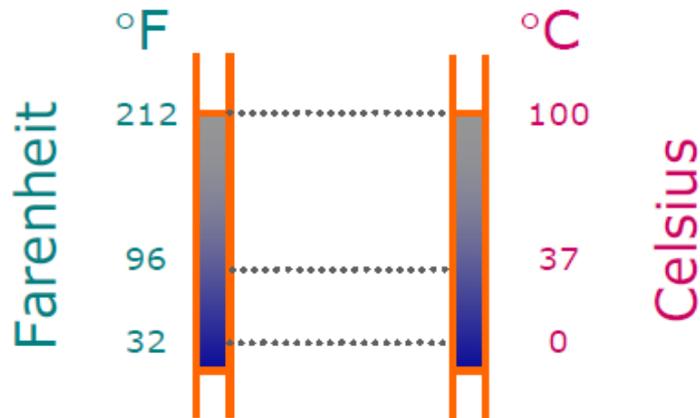
Per la misura della temperatura si usa il termometro: un bulbo riempito di mercurio che può espandersi in un capillare di vetro

Al variare della temperatura del bulbo il mercurio si espande nel capillare e le sue variazioni di lunghezza sono tradotte in misura della temperatura

La temperatura del corpo umano si misura con i termometri "a massima"

SCALE TERMOMETRICHE

PUNTI FISSI	CELSIUS	FARENHEIT
ghiaccio fondente	0°C	32°F
acqua bollente	100°C	212°F



cambiamenti di scala

$$\theta_F = 32 + \frac{9}{5} \theta_C$$

GAS PERFETTO

Usando il principio di semplicità, si definisce il sistema termodinamico più semplice: il gas perfetto composto da molecole che non interagiscono fra loro se non urtandosi. Sfere rigide che fanno urti perfettamente elastici fra di loro e contro le pareti del recipiente.

Per questo modello è possibile scrivere l'equazione di stato, cioè una relazione che leghi fra di loro le tre variabili di stato: P , V e T .

CONCENTRAZIONI IONICHE ALL'EQUILIBRIO

SONO UN GAS

PERFETTO

ESTERNO

K^+ 20 mM/l

Na^+ 440 mM/l

Cl^- 560 mM/l

M
E
M
B
R
A
N
A

INTERNO

K^+ 400 mM/l

Na^+ 50 mM/l

Cl^- 52 mM/l

LEGGI DEI GAS PERFETTI (1)

Isoterma $\Rightarrow t = \text{cost}$



$$pV = \text{cost}$$

Isobara $\Rightarrow p = \text{cost}$



$$V = V_0(1 + \alpha \cdot t)$$

Isocora $\Rightarrow V = \text{cost}$



$$p = p_0(1 + \alpha \cdot t)$$

Per tutti i gas perfetti risulta

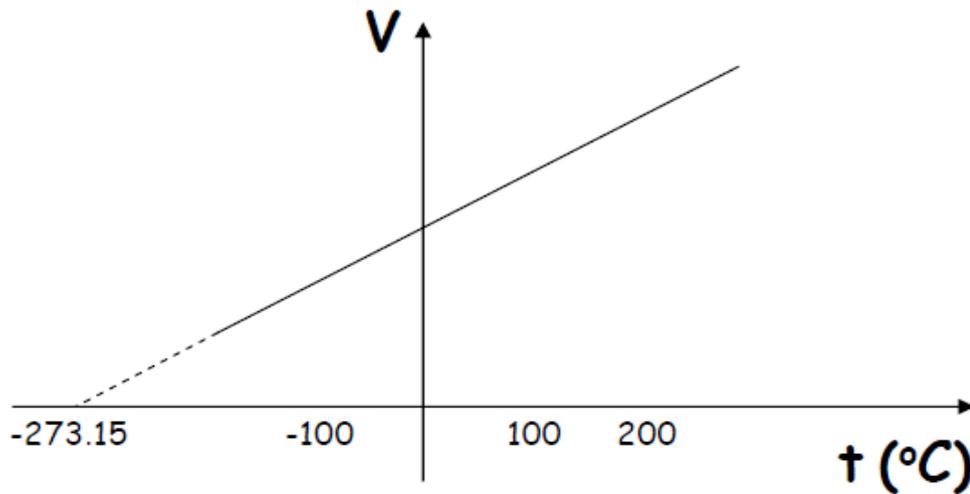
$$\alpha = \frac{1}{273.15^\circ\text{C}}$$

LEGGI DEI GAS PERFETTI (2)

Isobara $\Rightarrow p = \text{cost}$



$$V = V_0(1 + \alpha \cdot t)$$



Usando questo comportamento si può definire una nuova scala di temperatura: **la scala Kelvin o assoluta.**

0 °K è la temperatura minima assoluta o zero assoluto

$$T(^{\circ}K) = t(^{\circ}C) + 273.15$$

Lo zero assoluto non è raggiungibile, perché a questa temperatura il volume è zero e questo non ha significato fisico.

EQUAZIONE DI STATO

$$PV = nRT$$

n : numero di moli

R : costante universale

T : temperatura assoluta

$$R = 0.082 \frac{\text{litri} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot ^\circ K} = 1.98 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot ^\circ K} = 8.31 \frac{\text{joule}}{\text{mol} \cdot ^\circ K}$$

MACRO E MICRO

Dalla Meccanica conosciamo quale sono le variabili
Microscopiche che sono legate alle variabili macroscopiche

Variabili Macroscopiche

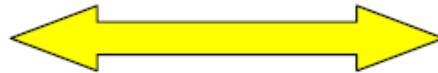
Variabili Microscopiche

Volume



Posizione

Pressione



Forza

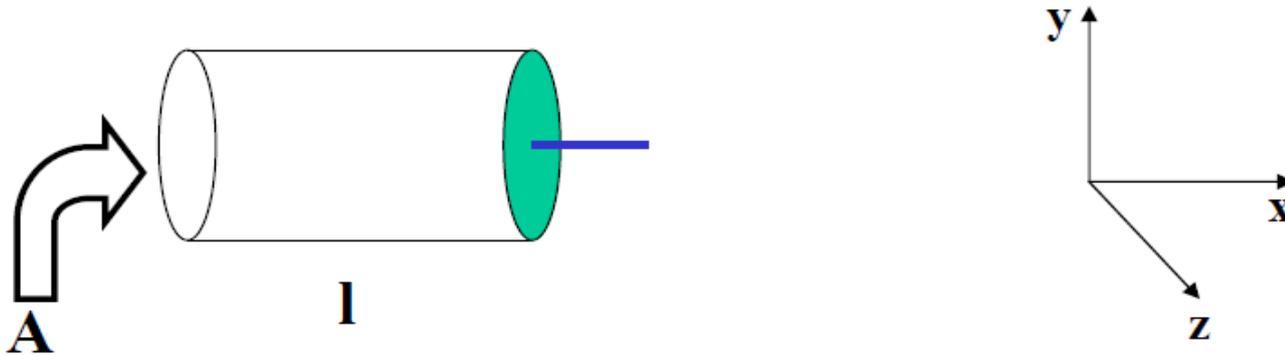
Temperatura



??????

EQUIPARTIZIONE DELL'ENERGIA (1)

Supponiamo di avere un gas perfetto monoatomico racchiuso in un cilindro con un pistone mobile



Il volume V del recipiente sarà

$$V = A \cdot l$$

e supponiamo che contenga nN_A molecole.

EQUIPARTIZIONE DELL'ENERGIA (2)

Ogni volta che una molecola urta il pistone, fa un urto



Perfettamente elastico e quindi il modulo della velocità, prima e dopo l'urto, non cambia. Nel nostro caso la v_x cambia di segno e la v_y rimane inalterata, quindi la variazione di quantità di moto per l'urto sarà $2mv_x$. Dal teorema dell'impulso avremo

$$F\Delta t = 2mv_x$$

Dove Δt è l'intervallo di tempo in cui tale variazione ha luogo, cioè il tempo che intercorre fra due urti successivi della molecola sul pistone.

EQUIPARTIZIONE DELL'ENERGIA (3)

Δt è pari al tempo che la molecola impiega a percorrere avanti ed indietro il cilindro

$$\Delta t = \frac{2l}{v_x}$$

da cui

$$F = \frac{2mv_x}{2l} v_x = \frac{mv_x^2}{l}$$

e poiché sono presenti nN_A molecole, la forza media sarà

$$F = \frac{nN_A}{l} (mv_x^2)_{medio}$$

e quindi per la pressione avremo

$$P = \frac{F}{A} = \frac{nN_A}{Al} (mv_x^2)_{medio} = \frac{nN_A}{V} (mv_x^2)_{medio}$$

EQUIPARTIZIONE DELL'ENERGIA (4)

Poiché il moto delle molecole è casuale non esiste una direzione privilegiata e quindi deve valere

$$\left(v_x^2\right)_{medio} = \left(v_y^2\right)_{medio} = \left(v_z^2\right)_{medio}$$

da cui

$$\left(v_x^2\right)_{medio} = \frac{1}{3}\left(v^2\right)_{medio}$$

Per la pressione avremo

$$P = \frac{nN_A}{V} \frac{1}{3} \left(mv^2\right)_{medio}$$

e quindi

$$PV = \frac{2}{3} nN_A \left(\frac{mv^2}{2}\right)_{medio} = \frac{2}{3} nN_A E_c$$

dove E_c è l'energia cinetica media delle molecole.

EQUIPARTIZIONE DELL'ENERGIA (5)

D'altra parte l'equazione di stato dei gas perfetti dice che

$$PV = nRT$$

E quindi

$$\frac{2}{3}nN_A E_c = nRT$$

Da cui

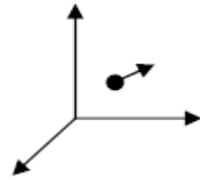
$$E_c = \frac{3}{2} \left(\frac{R}{N_A} \right) T = \frac{3}{2} KT$$

dove K è detta costante di Boltzmann e vale

$$K = \left(\frac{R}{N_A} \right) = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J } ^\circ K^{-1}$$

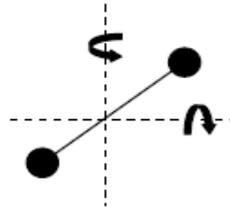
EQUIPARTIZIONE DELL'ENERGIA (6)

Monoatomico



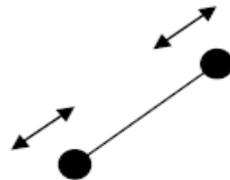
$$E_c = \frac{3}{2}KT$$

Biatomico a manubrio rigido



$$E_c = \frac{5}{2}KT$$

Biatomico a manubrio non rigido



$$E_c = \frac{7}{2}KT$$

$$E_c = \frac{\alpha}{2}KT$$

MICRO MACRO

Abbiamo la corrispondenza completa fra le variabili macroscopiche **volume, temperatura e pressione** e le variabili microscopiche **posizione, velocità e forza**.

Variabili Macroscopiche *Variabili Microscopiche*

Volume



Posizione

Temperatura



Velocità

Pressione



Forza

ENERGIA INTERNA

Per un gas perfetto la sola energia che può possedere al suo interno è l'energia cinetica. Supponiamo di avere un gas monoatomico, l'energia cinetica media delle sue molecole è

$$E_c = \frac{3}{2}KT$$

Supponiamo che ci siano N molecole, allora per la sua *energia interna* U possiamo scrivere

$$U = N \frac{3}{2}KT = \frac{3}{2}N \left(\frac{R}{N_A} \right) T$$

$$U = \frac{3}{2}nRT$$

L'energia interna U (dipende solo dalla temperatura) è una variabile di stato.

CALORE

Per il calore anticamente erano state proposte varie teorie. Una di queste, dovuta a J.J. Becher (1635-1682) era la teoria del flogisto (dal greco=combustibile).

Tale teoria postulava l'esistenza di una sostanza che era contenuta in tutti i corpi, il flogisto, e che veniva liberata per combustione di materiale organico o per trattamento dei metalli con il calore in aria libera (ossidazione).

Tale teoria dovette poi soccombere alle idee di Lavoisier (1743-1794) tramite i suoi studi sulle reazioni chimiche ed all'uso di una bilancia di precisione per pesare composti e reagenti.

Lavoisier, compiendo molti esperimenti, dimostra che durante la combustione non si crea né si distrugge materia. La combustione è una reazione di ossidazione in cui il corpo che brucia si combina con un gas presente nell'aria: l'*ossigeno* (etimologicamente generatore di ossidi).

Il rapporto fra il calore e l'anidride carbonica (CO_2) emessi da un animale è circa eguale al rapporto fra gli stessi emessi dalla fiamma di una candela.

Quindi da un punto di vista puramente chimico, la vita è sostenuta da una continua reazione di ossidazione analoga alla combustione.

Per la prima volta viene proposta una connessione, sostenuta da prove sperimentali, tra mondo vivente e mondo non-vivente.

Nel 1793 è arrestato, condannato a morte e ghigliottinato l'8 Maggio 1794 malgrado gli appelli di tutto il mondo scientifico.

Il giudice che lo condannò affermò:

“La République n'a pas besoin de savants!”

CALORE

Si chiama **calore** l'energia assorbita o ceduta da un corpo a livello molecolare, cioè l'energia direttamente assorbita o ceduta dalle molecole del corpo.

Il calore scambiato da un corpo può produrre:

- 1) una variazione di temperatura (variazione dell'energia molecolare);**
- 2) una variazione dello stato di aggregazione del corpo (modificazione dei legami molecolari, cioè dell'energia chimica).**

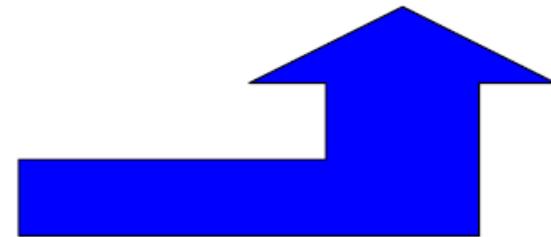
CALORE SPECIFICO

Si chiama **calore specifico c** la quantità di calore che bisogna fornire all'unità di massa di una sostanza per far aumentare la sua temperatura di un grado.

$$[c] = \frac{\text{cal}}{M \cdot \text{Temperatura}}$$

Quantità di calore necessaria per far aumentare la temperatura di ΔT per una massa m di materiale.

$$Q = cm\Delta T$$



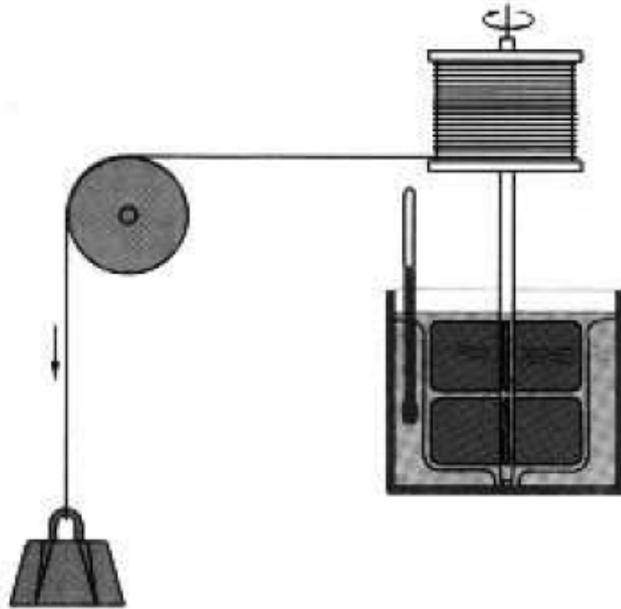
CALORE

kilocaloria (kcal) o grande caloria (Cal): quantità di calore necessaria per portare da 14.5 °C a 15.5 °C la temperatura della massa di 1 kg di acqua distillata.

caloria o piccola caloria (cal): quantità di calore necessaria per portare da 14.5 °C a 15.5 °C la temperatura della massa di 1 g di acqua distillata.

$$1 \text{ kcal} = 1 \text{ Cal} = 1000 \text{ cal}$$

EQUIVALENTE MECCANICO DELLA CALORIA



Il peso scendendo fa girare le palette immerse in un recipiente pieno di acqua. La temperatura dell'acqua aumenta a causa dell'attrito.
Paragonando il lavoro eseguito dalla discesa del peso con l'aumento di temperatura dell'acqua, Joule ricavò il valore dell'equivalente meccanico del calore.

Il calore è una forma di energia e nel S.I. si misura in joule (J).

$1 \text{ kcal} = 4180 \text{ joule}$
 $1 \text{ cal} = 4.18 \text{ joule}$

CALORE

Se lo scambio di calore non modifica lo stato di aggregazione di un corpo, il calore scambiato è

$$Q = C \cdot (\theta_f - \theta_i)$$

$Q > 0$ calore assorbito
 $Q < 0$ calore ceduto

C = capacità termica

Se il corpo è omogeneo $C = mc_s$

c_s è il calore specifico e la sua unità di misura è

$$1 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} = 1 \frac{cal}{g \cdot ^\circ C} = 4180 \frac{joule}{kg \cdot ^\circ C}$$

CALORE

Quando due corpi a diversa temperatura sono posti in contatto termico, si ha passaggio di calore dal corpo più caldo a quello più freddo fino a quando essi assumono la stessa temperatura (equilibrio termico).

$$m_1 c_1 (\theta - \theta_1) + m_2 c_2 (\theta - \theta_2) = 0$$

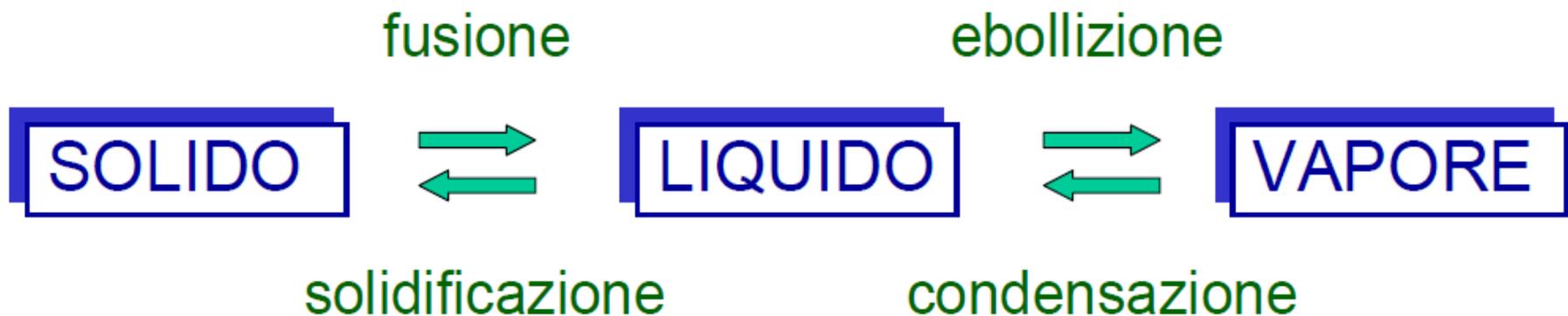
Temperatura
di equilibrio

$$\theta = \frac{m_1 c_1 \theta_1 + m_2 c_2 \theta_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$$

CAMBIAMENTI DI STATO

Il cambiamento di stato avviene ad una definita temperatura che dipende dalla sostanza e dalla pressione esterna

Il cambiamento di stato avviene isotermicamente ed è accompagnato da uno scambio di calore, legato alle variazioni dell'energia chimica di legame



CAMBIAMENTI DI STATO

Si definisce calore latente L la quantità di calore necessaria per far compiere *isotermicamente* all'unità di massa della sostanza un passaggio di stato

Calore necessario per il passaggio di stato di una massa m di quella sostanza

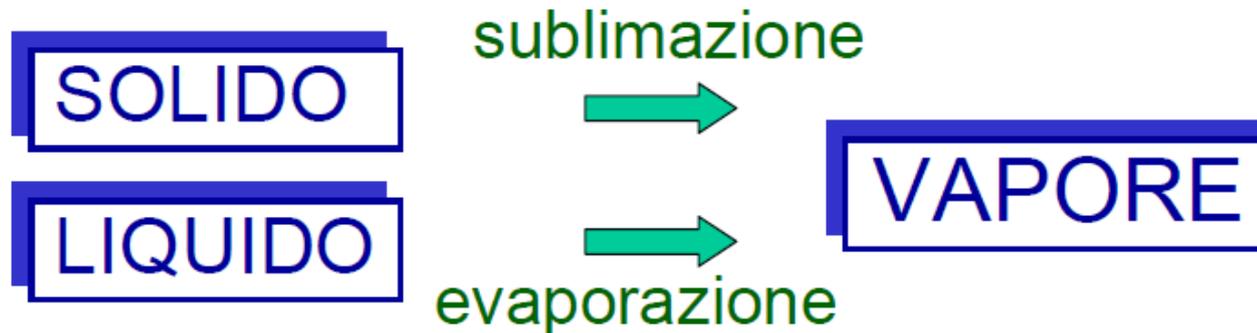
$$Q = m \cdot L$$

Per il passaggio di stato ghiaccio-acqua alla pressione atmosferica

$$L = 80 \frac{kcal}{kg} = 80 \frac{cal}{g}$$

CAMBIAMENTI DI STATO

Cambiamenti di stato che avvengono a tutte le temperature ed i rispettivi calori latenti dipendono dalla temperatura

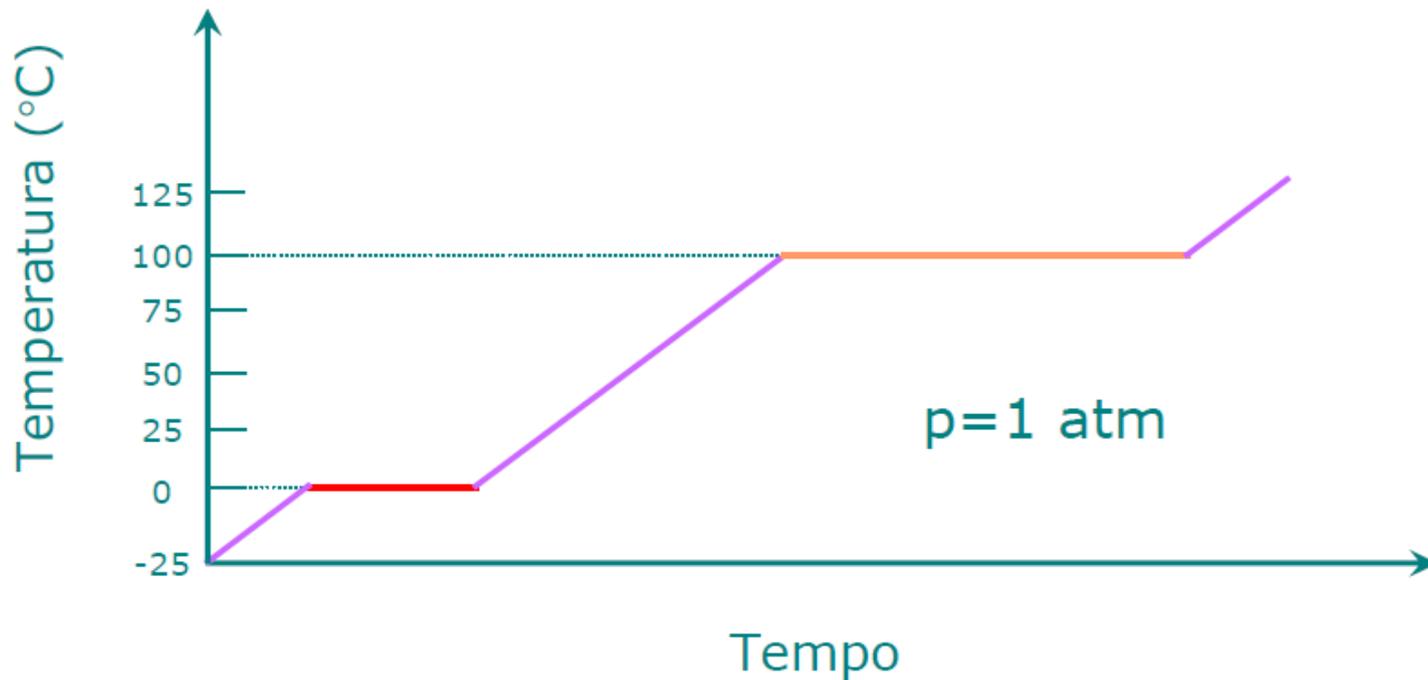


L'evaporazione avviene sino a quando l'ambiente non raggiunge la saturazione, cioè non può contenere altre molecole di quel liquido (vapore saturo)

La pressione o tensione di vapore saturo è caratteristica della sostanza ed è funzione crescente della temperatura

CAMBIAMENTI DI STATO

Temperatura di un campione di acqua in funzione del tempo quando viene somministrato un flusso costante di calore a pressione costante (1 atm).



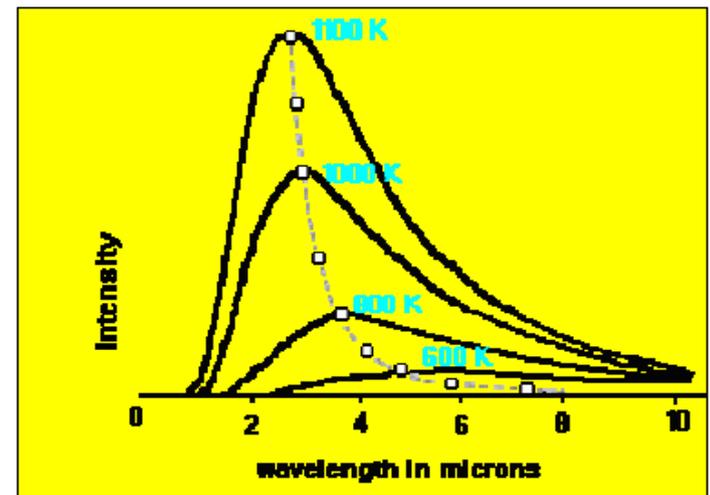
PROPAGAZIONE DEL CALORE

Il calore si propaga per

- ◆ conduzione (nei solidi senza movimento di materia)
- ◆ convezione (nei fluidi con movimento di materia)
- ◆ irraggiamento (per onde elettromagnetiche)

La temperatura della pelle varia da punto a punto e sensibili variazioni di temperatura hanno luogo quando esiste qualche anomalia circolatoria o cellulare.

Su questo principio si basa la *termografia*, in grado di rivelare variazioni di $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



TERMOREGOLAZIONE

La sorgente del calore corporeo è il metabolismo degli alimenti.

Un uomo di 70 kg in condizioni di riposo produce circa 70 kcal/h; durante un esercizio fisico la produzione di calore può essere anche 20 volte maggiore

La temperatura del corpo è rilevata da alcuni neuroni dell'ipotalamo, che sono sensibili alla temperatura del sangue circostante ed attivano alcuni meccanismi per mantenere affinché la temperatura rimanga costantemente uguale a 37 °C.

TERMOREGOLAZIONE

I meccanismi di termoregolazione possono favorire la cessione del calore (vasodilatazione, sudorazione, ...), ridurre (vasocostrizione) o produrre calore (brivido, ...).

L'equilibrio si raggiunge quando: $H_m = H_c + H_i + H_t + H_e$

H_m : calore prodotto dal metabolismo

H_c : calore dissipato per convezione

H_i : calore dissipato per irraggiamento

H_t : calore dissipato per traspirazione del sudore

H_e : calore dissipato per evaporazione polmonare

METABOLISMO DEL CORPO UMANO

L'energia utilizzata dall'organismo umano, per il suo funzionamento e per compiere una certa attività, è fornita dagli alimenti.

Ad esempio: esoso (glucide monosaccaride)



alla pressione di 1 atm occorrono 134.4 litri di ossigeno per liberare 666 kcal.

Contenuto energetico
del glucosio:

$$\frac{666 \text{ kcal}}{180 \text{ g}} = 3.7 \frac{\text{kcal}}{\text{g}}$$

Valore calorico
dell'ossigeno:

$$\frac{666 \text{ kcal}}{134.4 \text{ litri}} \cong 5 \frac{\text{kcal}}{\text{litro}}$$

METABOLISMO DEL CORPO UMANO

Misurando il consumo d'ossigeno è possibile calcolare la variazione di energia interna all'interno dell'organismo.

Metabolismo basale: consumo di energia per kg di peso corporeo e per secondo in condizioni di riposo.
In media i valori sono:

$$1.2 \frac{W}{kg} \quad \text{per gli uomini} \quad 1.1 \frac{W}{kg} \quad \text{per le donne}$$

METABOLISMO DEL CORPO UMANO

Valori approssimati delle potenze metaboliche per unità di massa relative ad un uomo di 20 anni durante lo svolgimento di varie attività in W/kg

Dormire	1.1
Giacere sveglio	1.2
Sedere eretto	1.5
Stare in piedi	2.6
Camminare	4.3
Rabbrividire	7.6

Pedalare	7.6
Spalare	9.2
Nuotare	11.0
Spostare mobili	11.0
Sciare	15.0
Correre	18.0

METABOLISMO DEL CORPO UMANO

Il calore prodotto viene solo in parte trasformato in lavoro. Il resto viene eliminato tramite i meccanismi di termoregolazione

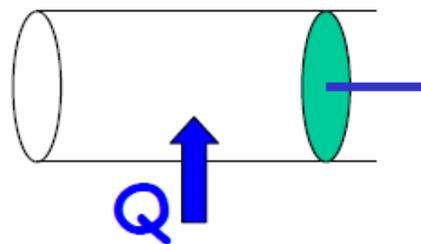
Efficienza con cui l'organismo utilizza l'energia chimica degli alimenti per compiere lavoro

$$\text{efficienza} = \frac{\frac{L}{t}}{\frac{\Delta U}{t} - \frac{\Delta U_b}{t}}$$

Spalare	3%
Sollevarre pesi	9%
Salire una scala	23%
Pedalare	25%
Camminare in salita	30%

PRIMO PRINCIPIO TERMODINAMICA (1)

Consideriamo alcuni dati sperimentali:



Pistone
fermo



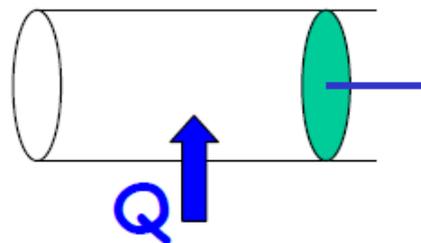
Aumenta l'energia
interna



Pareti isolanti

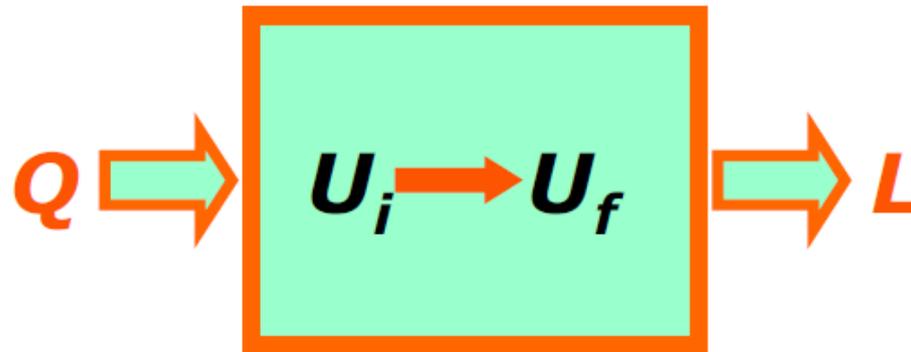


Il lavoro è eguale
all'aumento della
energia interna



Il pistone si
muove verso
l'esterno

PRIMO PRINCIPIO TERMODINAMICA (2)



$$L = Q - \Delta U$$

Q è positivo se CEDUTO AL SISTEMA

L è positivo se FATTO DAL SISTEMA

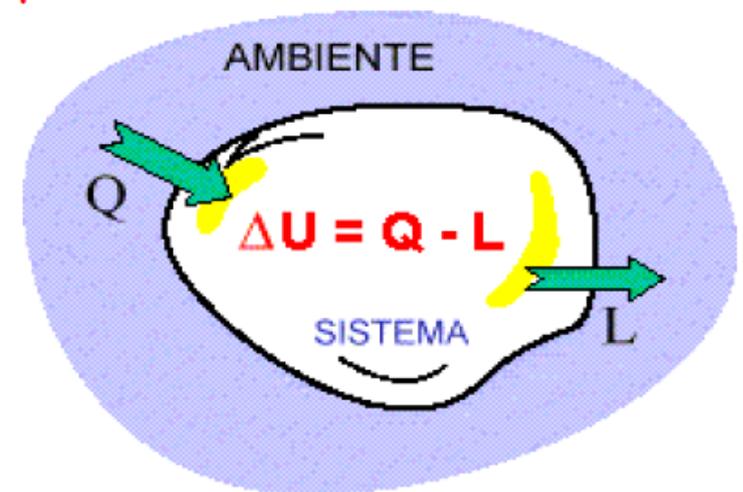
PRIMO PRINCIPIO TERMODINAMICA(3)

Il primo principio della termodinamica fornisce una precisa definizione del calore identificandolo come una forma di energia che può essere convertita in lavoro meccanico ed essere immagazzinata sotto forma di energia interna.

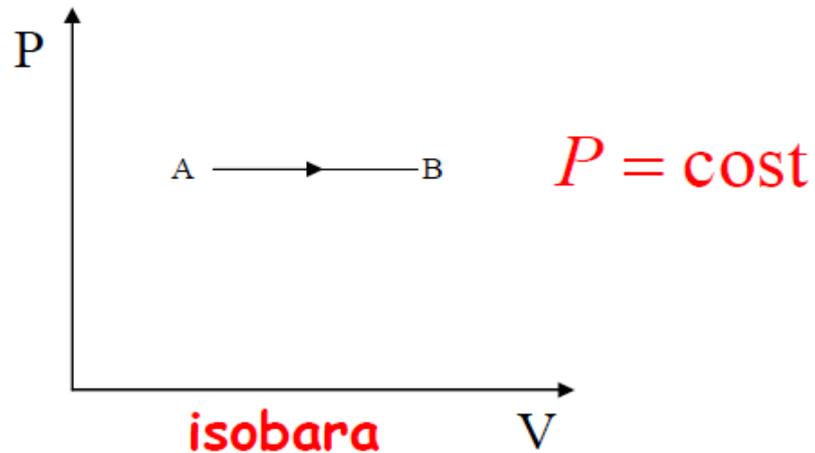
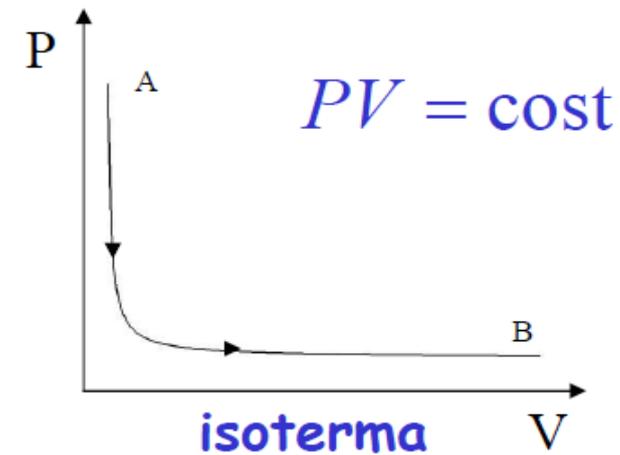
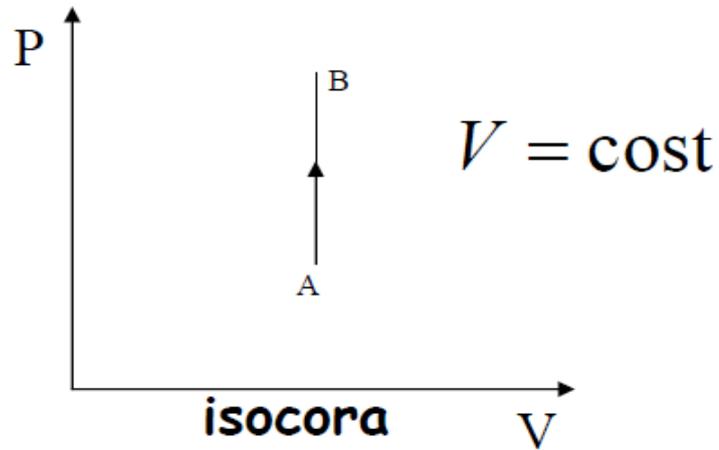
Il primo principio è dunque un principio di conservazione dell'energia. Esso afferma che, poiché l'energia non può essere né creata né distrutta, la somma della quantità di calore ceduta a un sistema e del lavoro compiuto sul medesimo deve essere uguale all'aumento dell'energia interna del sistema stesso.

Calore e lavoro sono i mezzi attraverso i quali i sistemi si scambiano energia.

$$\Delta U = Q - L$$



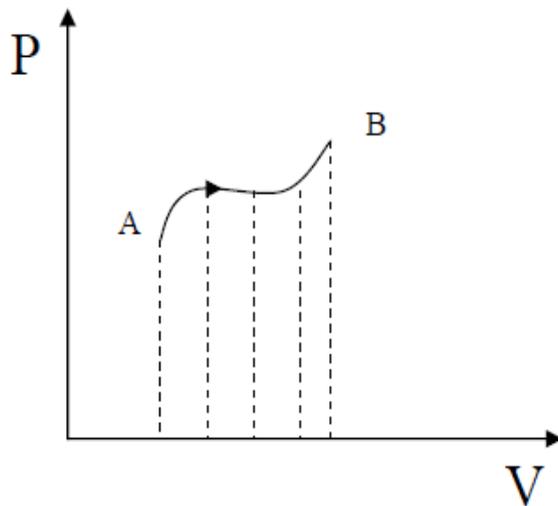
TRASFORMAZIONI TERMODINAMICHE (3)



TRASFORMAZIONI TERMODINAMICHE (4)

Poiché il lavoro nel caso della pressione può essere scritto come

$$L = \int_A^B P dV$$



esso è nel piano P-V l'area sottesa dalla curva che rappresenta la trasformazione