

## FLUIDI → prof Fusi

Un fluido è una sostanza che non è in grado di «opporre resistenza» a uno sforzo di taglio (cioè una forza tangenziale che agisce su una superficie). Un fluido è una sostanza che non ha una forma propria (può cambiare forma e scorrere). I gas occupano tutto il volume disponibile. I fluidi sono costituiti principalmente da **liquidi e gas** (ma comprendono anche i plasmi)


- **LIQUIDI** essenzialmente incompressibili (senza gas all'interno incompressibili, con gas comprimibili)
- **GAS** comprimibili.
- **IDROSTATICA** Fluidi in quiete.
- **IDRODINAMICA** Fluidi in moto e forze che agiscono sui corpi in moto nei fluidi: moti dell'atmosfera, del mare, moti dei fluidi nel corpo degli esseri viventi, plasmi, spazio cosmico, ecc.

Se applico una forza ad un fluido che succede? Non si sposta perché se applico una forza ad un fluido mi si sposta solo un punto non il fluido. Ho bisogno di introdurre nuove grandezze.

DENSITÀ ⇒  $\rho = \frac{M}{V}$  scalare UNITÀ = Kg m<sup>-3</sup>

es.:  $\rho_{H_2O} = 10^3 \text{ Kg m}^{-3}$  ;  $\rho_{Hg} = 13.6 \cdot 10^3 \text{ Kg m}^{-3}$

PRESSIONE ⇒  $P = \frac{F_{\perp}}{A}$  scalare



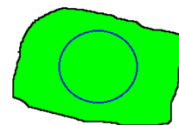
$F_{\perp} = F \cos \varphi$

$F_{\perp}$  = componente della forza normale alla superficie  
 $A$  = area della superficie su cui agisce la forza  
 UNITÀ ⇒ N m<sup>-2</sup> (S.I.)

Perché sono scalari? Perché non devo individuare direzione e verso? Perché la P (pressione) è una forza perpendicolare, quindi sappiamo già direzione e verso. Potrà solo essere o positiva o negativa. Individuata la superficie la direzione è perpendicolare e il verso lo attribuisco in base al segno. **+ = PRESSIONE - = DEPRESSIONE.**

Se fai un buco in un fluido, devi inserire una serie di FORZE tutte perpendicolari alla superficie in ogni punto. Dunque, all'interno di un fluido esistono delle forze (es. più ti immergi in acqua più ti senti compresso). Anche adesso siamo compressi dalla pressione atmosferica.

1 N m <sup>-2</sup>	=	1	Pa (Pascal)	
1 atm	=	1.013 · 10 <sup>5</sup>	Pa	} medicina fisiologica
	=	760	torr	
	=	760	mm Hg	} meteorologia
	=	1.013	bar	
	=	1013	mbar	



FLUIDO IN QUIETE



Le forze sostituiscono il fluido rimosso e sono perpendicolari alla superficie in ogni punto

## VISCOSITÀ

Nei fluidi reali esistono forze che tendono a opporsi al moto relativo delle particelle che li costituiscono. La capacità di trasmettere tali forze viene definita viscosità. Nel moto relativo di due strati di fluido, le forze che contrastano tale moto sono parallele alla superficie di separazione degli strati e quindi sono forze tangenziali rispetto alla superficie.

- **LIQUIDI:** la viscosità è dovuta principalmente alle forze di attrazione tra le molecole. (es. miele molto viscoso, acqua poco)
- **GAS:** la viscosità è dovuta principalmente alla diffusione delle molecole tra gli strati adiacenti.

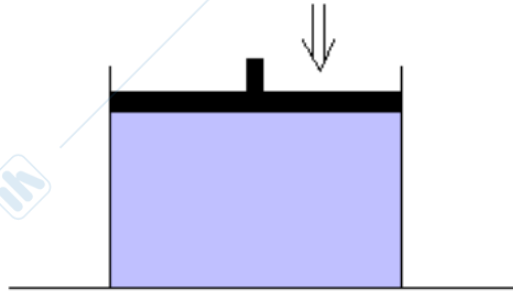
Perché se metto in frigo la nutella è dura? Perché raffreddandosi le molecole si avvicinano e dunque è più difficile separarle. Nel moto relativo di due strati di fluido, le forze che contrastano tale moto sono parallele alla superficie di separazione degli strati e quindi sono forze tangenziali rispetto alla superficie.

I gas, avendo molecole più distanti, c'è meno attrazione tra esse e quindi meno viscosità.

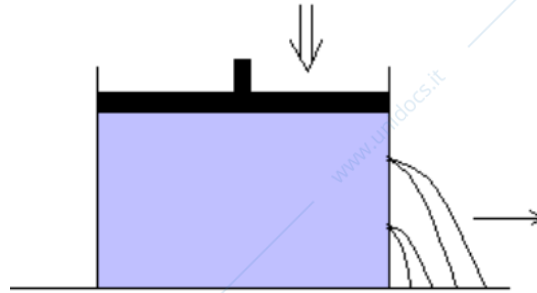
## IDROSTATICA

**Statica dei fluidi** non viscosi → **LEGGE DI PASCAL**.

Consideriamo un **recipiente** contenente un **liquido** (per esempio dell'acqua) dotato di un **pistone** ben aderente alla superficie interna del contenitore ed a contatto con il liquido. Supponiamo che sul pistone agisca una certa **forza**

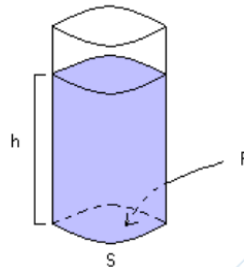


Supponiamo di praticare dei fori nel recipiente (e nel pistone stesso). Ovviamente, se si **aumenta la forza** che agisce sul pistone, il liquido fuoriesce con **maggior "intensità"** dal recipiente.



L'**esperienza** mostra quindi che la **pressione è aumentata** non solo sulla superficie a contatto con il pistone, ma anche in corrispondenza dei **fori**. **L'aumento di pressione è lo stesso** in tutti i punti del liquido e corrisponde a quello esercitato dal pistone. Il fenomeno è descritto dalla **legge di Pascal** → la pressione esercitata sulla superficie di un liquido si trasmette inalterata su tutte le superfici a contatto con il liquido".

**LEGGE DI STEVINO** → Consideriamo un **recipiente** cilindrico di area di base S riempito con un **liquido** (per esempio acqua) fino ad un'**altezza** pari ad h e vogliamo trovare la **pressione** che il liquido esercita sul **fondo** del recipiente.



La **pressione** è pari al rapporto fra il **peso** del liquido fratto la **superficie** del cilindro, ovvero:

Ricaviamo perciò: 
$$P = \frac{F}{S} \quad P = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S}$$

Dove m è la massa del liquido contenuto nel recipiente e g è l'accelerazione di gravità.

Esprimiamo ora la massa del liquido in funzione della sua densità.

Siccome: 
$$d = \frac{m}{V}$$

(dove V è il volume del liquido) si ha: 
$$m = dV$$

per cui, sostituendo, otteniamo: 
$$P = \frac{dVg}{S}$$

Poiché il volume del liquido (essendo il recipiente cilindrico) è dato da  $V = S \cdot h$ , ricaviamo: 
$$P = \frac{dShg}{S}$$

che, semplificata dividendo numeratore e denominatore per S, fornisce infine: 
$$P = dgh$$

Questa è la **legge di Stevino**. Essa esprime la pressione che un liquido esercita sul fondo di un recipiente in funzione della densità del liquido, dell'accelerazione di gravità e dell'altezza del liquido. La pressione risulta essere direttamente proporzionale alla densità ed all'altezza del liquido.

Osservando la formula, notiamo che la pressione non dipende dalla superficie della base del recipiente. Questo significa che **uguali colonne** di liquido di **superficie diversa**, esercitano sul fondo la **stessa pressione**. Se poi sul liquido agisce qualche altra pressione, per la **legge di Pascal**, essa deve essere **sommata** alla pressione del liquido. Spesso, nei casi particolari, sul liquido agisce la **pressione atmosferica**.  
La legge di Stevino va quindi completata nel seguente modo:  $P = dgh + P_0$

**LEGGE DI ARCHIMEDE** → **Teorema** dimostrabile grazie a Stevino.

La legge di Archimede è la seguente → **un corpo immerso in un liquido riceve una spinta dal basso verso l'alto pari al peso del liquido spostato**. Si raggiunge l'equilibrio quando la forza peso è uguale alla spinta di Archimede.

$$P = \text{peso del corpo} = mg = dVg$$

$$A = \text{spinta idrostatica} = d_0 Vg$$

$d_0 = m_a$  di un V di liquido uguale a quella del corpo.

Le forze laterali su un corpo immerso hanno lo stesso modulo. Le forze sulla superficie inferiori sono maggiori di quelle sulla superficie superiore. (in un corpo totalmente immerso). Dunque, riceve una spinta verso l'alto.

$$(d - d_0) Vg \rightarrow d > d_0 = \text{il corpo affonda} ; d < d_0 = \text{il corpo galleggia}$$

Perché se metto un metallo in acqua questo ruota affondando dalla parte più pesante (quella di ferro)? È dovuto dalla forza di gravità che riconosce le diverse masse.

**BARICENTRO** → punto dove posso vedere concentrata tutta la massa. Avrò due centri di gravità, uno nel ferro e uno nel legno. Nel caso della sfera la spinta idrostatica è applicata nel centro geometrico del corpo. Dunque, il mio oggetto ruoterà fino all'allineamento di tutte le forze con la spinta di Archimede.

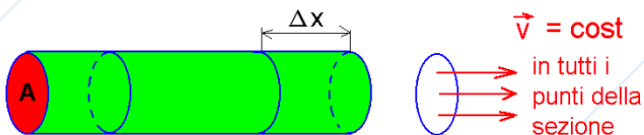
## IDRODINAMICA

- **FLUSSO STAZIONARIO** → la velocità del fluido è in ogni punto costante nel tempo. Preso come riferimento un punto, la velocità in quel punto non cambia. Se ho un punto nello spazio dove ho un fluido che scorre, in ogni punto rimane costante ma è diverso dal punto vicino alla velocità e nel punto vicino rimane costante nel tempo ma con un altro valore.
- **FLUSSO LAMINARE (non vorticoso)** → in ogni punto gli elementi fluidi hanno velocità angolare nulla attorno a quel punto. Preso un punto, lì la velocità è lineare, non c'è una componente rotazionale, vanno dritte.
- **FLUIDO INCOMPRESSIBILE** → densità costante (liquidi)
- **FLUIDO NON VISCOSO** (senza attrito interno) → senza forze tangenziali tra gli strati di fluido che scorrono gli uni sugli altri. Non c'è dissipazione di energia.

**LINEE DI FLUSSO** → le posizioni successive di una particella in moto formano una curva (traiettoria) che è tangente in ogni punto al relativo vettore velocità. Nel moto stazionario, l'insieme delle linee di flusso è fisso nel tempo.

**TUBO DI FLUSSO** → l'insieme delle linee di flusso passanti per una curva chiusa immersa nel fluido. Il fluido scorre in questo tubo come se fosse solido.

## EQUAZIONE DI CONTINUITÀ



La quantità di fluido che entra da una estremità deve uscire dall'altra estremità

$$\Delta x = v \Delta t$$

$$\Delta V = A \Delta x = A v \Delta t$$

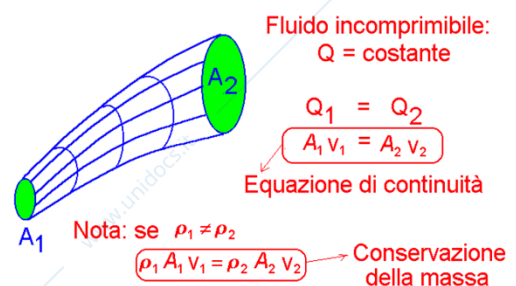
$$\text{Portata } Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = A v \quad \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

Definiamo come portata la quantità di volume di liquido che passa attraverso la sezione nell'unità di tempo la posso definire come il prodotto della sezione per la velocità.

Se il fluido non è comprimibile, non mi cambia di densità. La portata rimarrà sempre costante secondo l'equazione di continuità.

La quantità di fluido che entra da un'estremità deve uscire dall'altra. L'equazione vuol dire → **tanto liquido entra quanto liquido esce**.

Se in tutti i punti di una sezione ci passa la stessa quantità, la velocità nei punti della sezione è uguale.

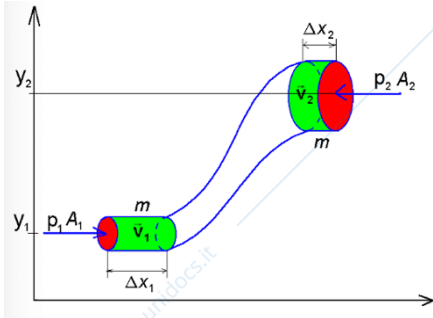


**TEOREMA DI BERNOULLI** → Consideriamo un liquido ideale che si muove in un condotto qualsiasi a pareti rigide senza brusche variazioni di sezione. Partendo dal principio di conservazione dell'energia, il teorema stabilisce una relazione tra pressione, quota e velocità del liquido in qualsiasi sezione del condotto

**FLUIDO** → **incomprimibile, non viscoso**      **FLUSSO** → **laminare, stazionario**

Il lavoro compiuto dalla forza risultante agente sul fluido uguaglia la variazione di energia cinetica e potenziale.  $\vec{v}(t) = \cos t$

Questo teorema considera un liquido ideale che si muove in un condotto qualsiasi dove le pareti rigide del condotto non hanno grosse variazioni di direzione.



1) - Lavoro fatto dalle forze di pressione

$$L = p_1 A_1 \Delta x_1 - p_2 A_2 \Delta x_2$$

$$L = (p_1 - p_2) \frac{m}{\rho}$$

Equazione continuità

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$A_1 v_1 \Delta t = A_2 v_2 \Delta t$$

$$A_1 \Delta x_1 = A_2 \Delta x_2 = m / \rho$$

2) - Variazione dell'energia potenziale

$$\Delta U = mg(y_2 - y_1)$$

3) - Variazione dell'energia cinetica

$$\Delta K = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

$$L = \Delta U + \Delta K$$

$$(p_1 - p_2) \frac{m}{\rho} = mg(y_2 - y_1) + \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

$$p_1 - p_2 = \rho g (y_2 - y_1) + \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2$$

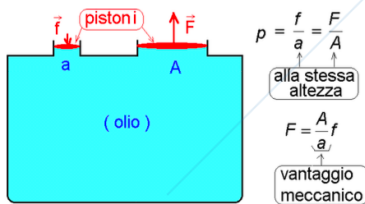
i pedici 1 e 2 indicano 2 sezioni qualsiasi

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = \text{cost}$$

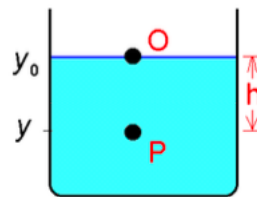
**EQUAZIONE DI BERNOULLI**

**LEGGE DI STEVINO** → La pressione p è uguale in tutti i punti alla stessa profondità: non dipende dalla forma del recipiente. **ρgh** è la pressione esercitata dal peso di una colonna di fluido sull'area (es. unitaria) di base della colonna di altezza h.

**PRESSA IDRAULICA**



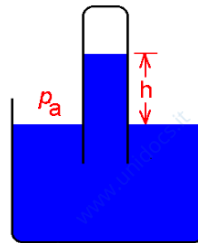
**FLUIDO IN QUIETE** ⇒ v=0



$$p_0 + \rho g y_0 = p + \rho g y$$

$$p = p_0 + \rho g h$$

$p_0$  = pressione atmosferica

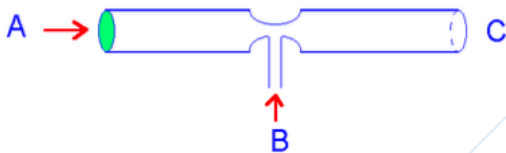


$$p_a = \rho g h$$

$\rho$  = densità mercurio

$$\rho g h = (13.6 \cdot 10^3 \text{ Kg m}^{-3}) (9.8 \text{ m/s}^2) (0.76 \text{ m}) = 1.013 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2} \text{ (Pa)}$$

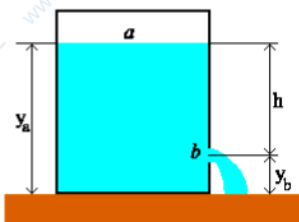
**ASPIRATORE IDRAULICO**



La diminuzione di pressione che si verifica in prossimità di una strozzatura viene sfruttata nell'aspiratore idraulico: il flusso A produce un risucchio dal condotto B. È possibile effettuare un moderato vuoto all'interno di un contenitore collegato a B, alimentando il condotto A con l'acqua del rubinetto. Se invece A è alimentato con aria compressa e B è collegato ad un

barattolo di vernice, si ottiene un congegno per spruzzare vernici attraverso l'orefizio C. L'esempio più antico è lo spruzzatore di profumi: con una pompetta in A ed il flaconcino del profumo in B si spruzza attraverso C. Analogamente funziona l'apparecchio per aerosolterapia

**TEOREMA DI TORRICELLI** → Da un foro posto ad una altezza (h) dalla superficie superiore di un fluido contenuto in un serbatoio, il fluido esce con una velocità pari a quella che avrebbe se scendesse in caduta libera per un tratto (h).



Ciò si dimostra applicando l'equazione di Bernoulli ai punti (a) e (b) della figura. Supponendo che il diametro del foro sia molto minore di quello del serbatoio, è possibile trascurare la velocità dell'acqua in superficie, ovvero nel punto (a). L'equazione di Bernoulli diventa:

$$p_a + \rho g y_a = p_b + \frac{1}{2} \rho v_b^2 + \rho g y_b$$

Essendo sia (a) che (b) in comunicazione con l'atmosfera,  $p_a$  e  $p_b$  saranno uguali e pari alla pressione atmosferica, quindi risolvendo rispetto  $v_b$ :

$$v_b^2 = 2g(y_a - y_b) = 2gh \quad v_b = \sqrt{2gh}$$

che è appunto la velocità che assumerebbe il fluido se cadesse da (a) a (b) nel campo gravitazionale.

## VISCOSITA'

I fluidi, per come sono definiti, non dovrebbero presentare resistenza al moto di scorrimento; invece nei fluidi reali tale resistenza è osservata. Questa resistenza è dovuta ad una forma d'attrito interno, detta viscosità, fra strati adiacenti di

fluido, che si oppone allo scorrimento dell'uno sull'altro. La capacità di trasmettere tali forze viene definita viscosità. Un fluido reale è pertanto caratterizzato da un coefficiente di viscosità ( $\eta$ ) definito operativamente come segue. La viscosità introduce importanti differenze nel moto di un fluido reale rispetto a quello di un fluido ideale. La portata per un fluido reale non può essere più calcolata come  $Av \rightarrow Q \neq Av$

un fluido ideale

un fluido reale

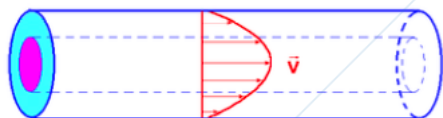


v costante nella sezione A  
 $p_A = p_B$  costante



v variabile nella sezione A  
 $p_A > p_B$

## FLUSSO LAMINARE IN UN TUBO CILINDRICO



C'è una caduta di pressione perché deve essere fatto un lavoro per vincere l'attrito viscoso, ed è proporzionale allo spostamento.

v = 0 sulle pareti  
v = max al centro

$$\bar{v} = \frac{1}{2} v_{MAX} \quad Q = A \bar{v} = \frac{1}{2} A v_{MAX} = \text{cost}$$

$\Delta p =$  caduta di pressione

(Il lavoro fatto per vincere le forze di viscosità è  $\propto l$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p \propto F_{visc} \propto \bar{v} \\ \Delta p \propto l \end{array} \right. \rightarrow \bar{v} \propto \frac{\Delta p}{l} \quad \left\{ \begin{array}{l} \bar{v} \text{ e } Q (= A \bar{v}) \\ \text{proporzionali} \\ \text{al gradiente} \\ \text{di pressione} \end{array} \right.$$

## LA LEGGE DI POISEUILLE →

La vel media è prop a  $\Delta p/l$  e dipende dal raggio R e dalla viscosità  $\eta$ , a parte un coeff numerico adimensionale  $\beta$

$$\bar{v} = \beta \frac{\Delta p R^4}{\eta l}$$

$\beta$  adimensionale  
potenze  $\left\{ \begin{array}{l} a \\ b \end{array} \right\}$

Mediante l'analisi dimensionale si trova che:

$$\beta = \frac{1}{8}$$

$$\bar{v} = \frac{\Delta p R^2}{8 \eta l}$$

$$Q = A \bar{v} = \pi R^2 \bar{v}$$

$$Q = \frac{\Delta p \pi R^4}{8 \eta l}$$

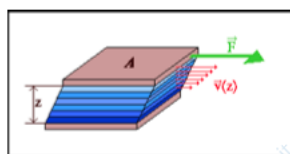
Legge di Poiseuille

(flusso laminare)

$$\eta \uparrow \quad Q \downarrow$$

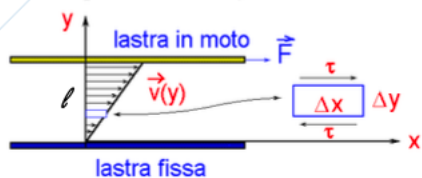
$$R \downarrow \quad Q \downarrow$$

## FLUIDI VISCOSI



$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (\text{legge di Newton})$$

Per  $v =$  costante, bisogna applicare  $F =$  costante e risulta  $F \propto \frac{vA}{l}$  con un coeff di proporzionalità  $\eta$  che dipende dal fluido  $\eta = Fl/Av$



$v =$  velocità tangenziale  
 $\tau =$  forza tangenziale per unità di superficie  $\Rightarrow$  sforzo di taglio

$$\tau = F/A$$

$$\eta = \frac{F/A}{\Delta v / \Delta l} = \frac{N \cdot s}{m^2} = \frac{dine \cdot s}{cm^2} = \text{poise}$$

Pascal

$$Q = \frac{\Delta p \pi R^4}{8 \eta l}$$

**Legge di Poiseuille**

(flusso laminare)

La quantità di liquido che attraversa una sezione del condotto per unità di tempo (Qu):

1. Diminuisce al crescere della viscosità ( $\eta$ )
2. Diminuisce al crescere della lunghezza del condotto (L)
3. Aumenta al crescere della differenza di pressione fra le estremità del condotto
4. Aumenta per condotti con sezione maggiore

**MOTO LAMINARE E MOTO TURBOLENTO**

Il passaggio dal moto laminare a quello turbolento è caratterizzato da un parametro detto **Numero di Reynolds**.

$\rho$  = densità del fluido

d = lunghezza caratteristica (per un tubo e per una sfera è il diametro)

**Numero di Reynolds  $N_R$**

$$v_c = N_R \frac{\eta}{\rho d}$$

Velocità critica

viscosità

**FLUSSO TURBOLENTO** (energia dissipativa maggiore)

Quando un flusso è laminare o turbolento?

$$N_R = \frac{2 \rho \bar{v} R}{\eta}$$

(adimensionale)

**Numero di Reynolds**  
Flusso in un tubo di raggio R

- $N_R < 2000$  flusso laminare
- $2000 < N_R < 3000$  flusso instabile
- $N_R > 3000$  flusso turbolento

**NOTE DI EMODINAMICA**

Poiché la legge di Poiseuille si può scrivere anche come  $\Delta P = (\text{costante}) \cdot Q_v$  (una volta fissato il fluido e le caratteristiche geometriche del condotto) è possibile definire una quantità detta **RESISTENZA IDRAULICA (R)** del condotto. La legge di Poiseuille, infatti, può essere interpretata come legge di proporzionalità tra la causa =  $\Delta P$ , che provoca il flusso, e l'effetto  $Q_v$  che ne segue, secondo una costante di proporzionalità R che dipende dalle caratteristiche geometriche del condotto e dalla viscosità del fluido

$$p_1 - p_2 = \frac{8\eta l}{\pi R^4} Q$$

Supponiamo moto stazionario. Nei vasi piccoli: flusso laminare ( $N_R \propto R$ ). Il sangue è un liquido viscoso: moto con gradiente di pressione. Questo gradiente è dovuto al  $\Delta p$  tra ventricolo sinistro e atrio destro

**Moto di un fluido reale in un condotto** → Per mantenere una portata costante, è necessario fornire energia attraverso una differenza di pressione  $\Delta p$  secondo Poiseuille.

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot l} \Delta p$$

**TEMPERATURA E CALORE**

La temperatura di un corpo è legata all'energia cinetica media degli atomi o molecole che compongono il corpo.

**Misura della temperatura** → Si sfruttano le variazioni di proprietà fisiche di materiali: es. volume di un liquido lunghezza di una sbarra metallica pressione in un gas resistenza elettrica di un filo colore del filamento di una lampada

**Dispositivo di misura** → termometro (bisogna definire le scale termometriche)

**Equilibrio termico** → la temperatura del sistema non varia nel tempo, quindi non c'è trasferimento di energia.

**DILATAZIONE TERMICA** → In genere i solidi aumentano di volume quando c'è un aumento di temperatura.

Considerando solo una dimensione lineare si ha una: **dilatazione lineare** (es. sbarretta di metallo sottile)

se l'aumento di temperatura  $\Delta t$  è abbastanza piccolo →  $\Delta l = \alpha l \Delta t$

$\alpha$  è il coefficiente di espansione lineare ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) o ( $\text{K}^{-1}$ ) →  $l = l_0 (1 + \alpha \Delta t)$

**DILATAZIONE DI VOLUME**

Se all'aumento di temperatura  $\Delta t$  è abbastanza piccolo →  $\Delta V = \beta V \Delta t$

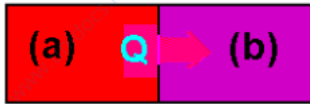
$\beta$  è il coefficiente di espansione volumica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) o ( $\text{K}^{-1}$ ) →  $\beta = 3\alpha$

$$l^3 = l_0^3 (1 + \alpha \Delta t)^3 = l_0^3 (1 + 3\alpha \Delta t + 3\alpha^2 \Delta t^2 + \alpha^3 \Delta t^3)$$

$$l^3 \cong l_0^3 (1 + 3\alpha \Delta t)$$

Anche i liquidi in genere si dilatano al crescere della temperatura (più dei solidi). L'acqua ha un comportamento anomalo Caratteristica importante per la vita acquatica (mantenimento della vita anche in acque ad elevate latitudini).

**CALORIMETRIA** → il calore è una forma di energia



Ta > Tb. Il corpo (a) si raffredda e il corpo (b) si riscalda. C'è passaggio di energia termica o calore Q. Q = quantità di calore

## CALORE

Misura dell'energia trasferita da un corpo all'altro a causa della differenza di temperatura tra i due corpi.

Misurare l'aumento di temperatura di un corpo che assorbe calore. L'UNITA' (di misura) del calore Q è (la **caloria** che rappresenta) la quantità di calore che bisogna fornire a 1 kg di acqua per innalzare la sua temperatura da 14.5 °C a 15.5 °C (Kcal).

$$1 \text{ Kcal} = 103 \text{ cal}$$

L'unità di misura S.I sono i JOULE (J) → 1 Kcal = 4186 J

Verifica sperimentale (Joule) dell'equivalenza tra lavoro meccanico e calore

**Tutte le forme di energia sono equivalenti.**

Non sempre si ha un aumento di temperatura fornendo calore → Es. mettendo a contatto un corpo caldo con ghiaccio fondente, si osserva che il corpo cede calore, il ghiaccio non aumenta la temperatura, ma si incrementa la fusione.

Talvolta si ha una variazione di temperatura senza fornire calore → Es. reazioni chimiche, espansione dei gas, attrito.

$$Q = c m \Delta T \quad (\text{Kcal})$$

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{calore specifico} \\ \text{della sostanza} \end{array} \right.$$

$$\text{Unità} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{kg K}}, \frac{\text{Joule}}{\text{kg K}} \quad (\text{S.I.})$$

**CALORE SPECIFICO (c)** → Il calore specifico è la quantità di calore Q (energia termica) necessaria per innalzare (o diminuire) la temperatura di una unità di massa di una sostanza di  $\Delta T$  (ad es. di 1 °C o 1 K).

$$C = cm = \frac{Q}{\Delta T} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Capacità termica} \\ \text{del corpo di massa m.} \end{array} \right.$$

$$\text{Unità} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{K}}, \frac{\text{Joule}}{\text{K}} \quad (\text{S.I.})$$

## CAPACITA' TERMICA (C)

La capacità termica è la quantità di calore Q (energia termica) necessaria per innalzare (o diminuire) la temperatura di una data massa m di una sostanza di  $\Delta T$  (ad es. di 1 °C o 1 K)

la capacità termica:

- Dipende dalla sostanza
- Dal modo con cui Q viene fornito
  - Cp = calore specifico a P = cost
  - Cv = calore specifico a V = cost

Con i solidi processo a P = cost (pressione atmosferica)

**MASSA MOLECOLARE** → Somma delle masse (espresse in uma) degli atomi che costituiscono la molecola.

**Esempio:**

$$M(\text{H}_2) = 2 M(\text{H}) = 2 (1.008) = 2.016 \text{ uma}$$

$$1 \text{ mole di H}_2 = 2.016 \text{ g di H}_2$$

$$\text{Massa molecolare di CO}_2 = 44 \text{ uma}$$

$$1 \text{ mole di CO}_2 = 44 \text{ g di CO}_2$$

**NUMERO DI AVOGADRO** → è il numero di molecole contenute in una mole

$$\mathbf{NA = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ molecole/mol}}$$

$$\text{in 1 mole di H}_2 (2 \text{ g}) 6,02 \cdot 10^{23} \text{ molecole}$$

$$\text{in 1 mole di CO}_2 (44 \text{ g}) 6,02 \cdot 10^{23} \text{ molecole}$$

## CAMBIAMENTO DI STATO

Stati di aggregazione della materia (fasi) (Solido, liquido, gassoso)

Cambiamenti di fase ⇒ passaggio da una fase all'altra.

Differenziazione tra le diverse fasi

**Microscopicamente:**

- A. **Fase solida** → atomi distanti  $\approx 1 \text{ \AA}$  ( $10^{-8} \text{ cm}$ ) ordinati separatamente (reticoli cristallini). Oscillano attorno alla loro posizione di equilibrio per effetto dell'agitazione termica.
- B. **Fase liquida** → molecole distanti  $\approx 1 \text{ \AA}$  ( $10^{-8} \text{ cm}$ ). Non sono ordinate separatamente. Si muovono disordinatamente pur restando a distanza ravvicinata.
- C. **Fase gassosa:** (Pressione atmosferica). Le molecole sono a grandi distanze (10 volte di più che in fase liquida). Si muovono disordinatamente. Interazioni mutue limitate.

I cambiamenti di fase avvengono a valori ben determinati della temperatura. La temperatura alla quale si verifica un cambiamento di fase dipende da altre variabili (es. pressione).

**CALORE LATENTE** → Quantità di calore che bisogna somministrare (o sottrarre) all'unità di massa per compiere un cambiamento di fase. (La quantità di calore, quindi, non corrisponde a un aumento di temperatura).

Unità	$\frac{\text{Kcal}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{Joule}}{\text{kg}}$	(S.I.)
-------	---------------------------------	----------------------------------	--------

**CALORE LATENTE DI FUSIONE:**

Energia assorbita durante il cambiamento di fase (necessaria per rompere i legami cristallini). Per l'acqua:  $Q_f = 79,7$  Kcal/kg

**Solidificazione** → processo inverso ( $Q_f$  ceduto)

**Evaporazione** (processo inverso 'condensazione') → Trasformazione dello stato liquido in gassoso (vapore).

**Vapor saturo** → vapore in equilibrio con il proprio liquido (numero di molecole di evaporazione = numero di molecole di condensazione)

Pressione di vapor saturo (PS) (tensione di vapore) → È funzione di T (K). Quando  $PS = P_{EST}$  (es.  $P_{ATM}$ ) si ha ebollizione (trasformazione che interessa tutto il liquido)

Per l'acqua →  $Q_E =$  calore evaporazione = 606,5 - 0,695 t; t = 100 °C (ebollizione dell'acqua);  $Q_E = 537$  Kcal/kg

H<sub>2</sub>O ha:

- elevato calore specifico
- elevato calore di evaporazione

Questi valori elevati permettono a tutti gli animali, nei quali l'H<sub>2</sub>O rappresenta una parte considerevole del corpo, di mantenere il proprio equilibrio termico.

Le grandi masse di H<sub>2</sub>O sulla terra riducono le escursioni termiche diurne e stagionali. Favoriscono lo sviluppo della biosfera.

### REGOLAZIONE TERMICA DEL CORPO UMANO

La temperatura interna vale 37 °C.

Il sistema di regolazione la mantiene costante. Il calore prodotto dai processi metabolici è uguale al calore disperso con i meccanismi seguenti:

- **convezione** → differenza di temperatura tra epidermide ed aria circostante ⇒ moti convettivi naturali. (ventilazione convezione forzata) ⇒ (dispersione termica ≈ 40%)
- **irraggiamento** → (t ≈ 37°C ⇒ onde E.M. infrarosso) (calore emesso ≈ 45%)
- **evaporazione** → il sudore evaporando assorbe calore (meccanismo controllato dall'interno dal sistema simpatico). L'evaporazione può fare variare la dispersione termica dal 2% all'80% del totale.

(Evaporazione anche attraverso la respirazione)

### PRINCIPIO ZERO DELLA TERMODINAMICA

"Se due sistemi sono in equilibrio con un terzo sistema sono in equilibrio termico anche tra di loro". Tra due corpi a temperatura diversa messi a contatto si ha un flusso di energia termica continua fino a raggiungere l'equilibrio termico. Per verificare l'esistenza dell'equilibrio termico fra i due corpi se ne può usare un terzo come riferimento, cioè usare un "termometro".

**SCALE TERMOMETRICHE** → Termometro a mercurio → basato sulla variazione del volume di mercurio al variare della temperatura.

### TERMODINAMICA

Studia le trasformazioni dell'energia da una forma all'altra e da un "sistema" all'altro.

- **Sistema** → porzione di materia separata dall'ambiente esterno.
- **Temperatura** → oggetto di studio della termometria
- **Quantità di calore** → oggetto di studio della calorimetria
- **Macroscopica** → grandezze osservabili quali la pressione, volume, temperatura, energia interna, entropia ecc. (variabili termodinamiche).
- **Microscopica** → si considera il sistema formato da atomi e molecole con le loro velocità, masse, energie, ecc

### SISTEMA TERMODINAMICO

Sistema macroscopico, chimicamente definito, composto da un gran numero di molecole (1 mole =  $6 \cdot 10^{23}$  molecole di gas, solido, liquido). È impossibile studiare lo stato dinamico del sistema considerando posizione, velocità, ecc. di ogni singola molecola dandone cioè una descrizione microscopica.

In certi casi: grandezza macroscopica ↔ grandezza microscopica

Es.: Gas Perfetto   
{

T → Valore medio  $K_m$  delle molecole  
P → Valore medio  $v^2$  delle molecole e numero di molecole per volume unitario

Si descrive il sistema termodinamico dal punto di vista macroscopico utilizzando grandezze che caratterizzano il sistema nel suo insieme (es. pressione, temperatura, volume, ecc.)

### COMPORTEMENTO DEI GAS PERFETTI

- Le leggi dei gas
- Il gas perfetto
- Temperatura assoluta
- Equazione di stato

### PROPRIETA' DEI GAS

Lo stato gassoso può essere considerato come lo stato fisico che la materia assume quando le particelle, con forze di attrazione molto deboli, sono libere di muoversi in condizioni di elevato disordine. Poiché le particelle si trovano distanti tra loro, la materia allo stato gassoso presenta una densità inferiore rispetto a quella che ha allo stato liquido e allo stato solido.

Tutti i gas hanno caratteristiche comuni e il loro comportamento non dipende dal tipo di sostanza, ma dalle condizioni sperimentali.

- **Non hanno forma propria** → un gas assume sempre la forma del contenitore che lo contiene e che occupa per intero
- **Possono espandersi** → il volume di un gas aumenta se aumenta il volume del suo contenitore
- **Possono essere compressi** → il volume di un gas diminuisce se diminuisce il volume del suo contenitore
- **Sono completamente miscibili** → due gas diversi nello stesso contenitore si mescolano completamente, l'aria è una miscela formata da numerose sostanze gassose.

Gli esperimenti mostrano che 4 variabili dette **GRANDEZZE DI STATO** (di cui solo 3 indipendenti) e sono sufficienti a descrivere completamente il comportamento di un gas.

- Pressione (p)
- Volume (V)
- Temperatura (T)
- Numero di particelle (n)

### PRESSIONE DEI GAS

Nei gas le particelle non sono legate, ma si muovono in modo caotico grazie all'energia di cui dispongono, urtandosi ripetutamente tra loro e contro le pareti del recipiente.

L'urto di una singola particella, date le sue piccole dimensioni, non ha un effetto apprezzabile, ma la somma degli urti di miliardi di particelle genererà su ogni unità di superficie una forza, il cui effetto macroscopico è proprio la pressione.

$$F_t = m \Delta v \text{ quindi } F = m \Delta v / \Delta t$$

La pressione  $p$  è data dal rapporto tra la forza  $F$ , che agisce perpendicolarmente sulla superficie, e l'area  $s$  della superficie stessa.

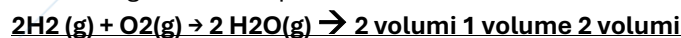
L'unità di misura della pressione nel S.I. è il pascal (Pa), pari a un newton (N) per metro quadrato ( $m^2$ ).  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / m^2$

### LEGGI EMPIRICHE DEI GAS

Le proprietà dei gas dipendono in maniera semplice da  $P$ ,  $V$ ,  $T$  e  $n$ . Quando due di queste grandezze sono costanti esiste una relazione semplice fra le altre due. Tali relazioni furono scoperte tra la metà del 1600 e del 1800 e sono note come leggi empiriche dei gas.

- Legge di Boyle →  $PV=K$
- Legge di Charles/Gay-Lussac →  $V=KT$
- Legge di Avogadro → Volumi uguali di qualsiasi gas, nelle stesse condizioni di temperatura e pressione, contengono lo stesso numero di molecole

Nel 1808 Gay-Lussac dopo alcuni esperimenti concluse che per reazioni in fase gassosa, alla stessa pressione e temperatura, i rapporti di volume dei reagenti sono espressi da numeri interi



Nel 1811 Avogadro interpretò questi risultati in quella che oggi è nota come la legge di Avogadro:

Volumi uguali di qualsiasi gas, nelle stesse condizioni di temperatura e pressione, contengono lo stesso numero di molecole. Una mole di ogni gas contiene lo stesso numero di molecole (il numero di Avogadro =  $6,022 \times 10^{23}$ ) e per tale legge deve occupare lo stesso volume ad una certa temperatura e pressione.

Il volume di una mole di gas è chiamato volume molare  $V_m$  e a  $0^\circ\text{C}$  ed  $1 \text{ atm}$  di pressione vale  $22,4 \text{ L/mol}$  (dipende quindi da  $T$  e  $P$  ma non dalla natura del gas).

Le condizioni di 0°C ed 1 atm di pressione sono spesso dette condizioni di temperatura e pressione standard (STP). (vale solo per i gas).

### **IL MODELLO PARTICELLARE DEL GAS IDEALE**

Come sappiamo, le leggi descrivono i fenomeni ed i modelli li spiegano

Per spiegare il comportamento dei gas, descritto dalle leggi già affrontate, è stato elaborato un modello generale, il modello particellare del gas ideale, secondo cui tutti i gas ideali, indipendentemente dalla loro natura chimica, presentano le seguenti caratteristiche:

- Le particelle del gas si muovono a grande velocità in tutte le direzioni dello spazio e la velocità è proporzionale alla temperatura.
- Le particelle sono puntiformi ed hanno quindi volume trascurabile rispetto a quello del recipiente che le contiene.
- Tra le particelle non esistono forze né attrattive, né repulsive.
- Le particelle si urtano tra loro, ed urtano le pareti del recipiente, in modo perfettamente elastico, ossia senza accelerare né rallentare. La frequenza degli urti sulle pareti determina la pressione del gas.

In realtà i gas reali non rispettano rigorosamente il modello: le particelle non sono infatti puntiformi, ma hanno dimensioni finite, anche se piccolissime; tra di loro si esercitano forze attrattive o repulsive, anche se infinitesime. Tuttavia, tanto più vi si approssimano quanto più sono rarefatti (a bassa pressione) e lontani dalla temperatura di liquefazione, per i gas, o di condensazione, per i vapori; ovvero quanto più sono distanti dalla transizione tra stato aeriforme e stato liquido

**LEGGE DI CHARLES E GUY LUSSAC** → se la temperatura aumenta, aumenta anche la velocità delle particelle di gas; per continuare ad urtare con la stessa frequenza le pareti del recipiente, mantenendo costante la pressione, esse hanno quindi bisogno di più spazio. Se il gas non è contenuto in un recipiente rigido, tenderà ad occupare uno spazio maggiore, cioè a dilatarsi.

**LEGGE DI GUY LUSSAC** → un aumento di temperatura del gas determina un aumento della velocità delle particelle; se lo spazio disponibile non può cambiare, gli urti contro le pareti sono più violenti e frequenti e si ha un aumento della pressione.

**LEGGE DI BOYLE** → a temperatura costante la velocità delle particelle non varia, se riduco il volume riduco lo spazio a loro disposizione ed aumenta quindi la frequenza degli urti con le pareti del recipiente, provocando un aumento della pressione. Viceversa, accadrà invece se il volume aumenta. **EQUAZIONE DI STATO DEI GAS IDEALI** →  $pV = nRT$

**LEGGE DI DALTON** → (pressioni parziali). Immaginiamo di mescolare  $m$  gas diversi, che non interagiscano chimicamente fra loro, in un contenitore di volume  $V$ . Sia perché la pressione parziale del gas  $k$ -esimo, cioè la pressione che il gas eserciterebbe in assenza degli altri gas. La legge stabilisce che la pressione risultante del miscuglio è la somma delle pressioni parziali:

$$p = \sum_{k=1}^m p_k$$

Questa legge può essere dimostrata semplicemente nel caso del gas ideale, partendo dal dato sperimentale che la pressione risulta uguale a:

$$p = \frac{RT}{V} \sum_{k=1}^m n_k$$

### **TRASFORMAZIONI TERMODINAMICHE**

Si ha una trasformazione termodinamica quando un sistema passa da uno stato iniziale ( $p_0V_0T_0$ ) a uno stato finale ( $pVT$ ) attraverso successivi stati di equilibrio. In genere questo fatto comporta variazioni di  $U$ ,  $Q$  e  $L$ , calcolabili in modo preciso se è ben specificato il tipo di trasformazione. Per definizione, se una forza  $F$  esercita la pressione  $p$  su di una superficie  $S$  e ne produce lo spostamento  $s$ , compie il lavoro:

$$L = Fs = pSs = p\Delta V.$$

Quindi il lavoro è nullo se  $\Delta V = 0$ , ossia nelle trasformazioni a volume costante.

- Trasformazioni reversibili: passaggio dallo stato iniziale allo stato finale attraverso una serie di stati di equilibrio essendo noti i parametri termodinamici ad ogni istante.
- Trasformazioni irreversibili: passaggio attraverso stati che non sono di equilibrio. Non sono definiti tutti i parametri ad ogni istante e non sono percorribili in senso inverso.

**Trasformazioni reali** ⇒ **irreversibili**

**Trasformazioni lente** ⇒ **≈ reversibili**

Esempi di trasformazioni:

- Isotermica ( $T = \text{cost}$ )
- Isobarica ( $p = \text{cost}$ )
- Isocora ( $V = \text{cost}$ )
- Adiabatica (sistema isolato termicamente)

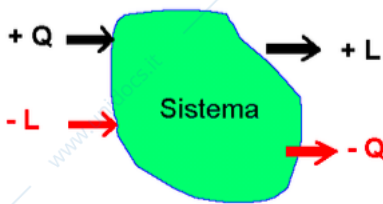
### LAVORO TERMODINAMICO

Nella trasformazione il sistema può compiere lavoro meccanico esterno (ad es. contro le forze esterne).

$$L = F\Delta l = pA\Delta l = p\Delta V$$

Quando si ha una espansione il lavoro è positivo. Quando si ha una compressione il lavoro è negativo. Il lavoro  $L$  rappresenta l'energia scambiata in modo meccanico. Il calore  $Q$  rappresenta l'energia scambiata (ad es. per effetto di una differenza di temperatura). Il lavoro dipende dal tipo di trasformazione compiuta e non solo dallo stato iniziale e finale. Il sistema può scambiare con l'ambiente circostante quantità di calore ( $Q$ ).  $Q$  è positivo se viene assorbito dal sistema.  $Q$  è negativo se viene ceduto dal sistema

### CONVENZIONI



Sperimentalmente si ricava che  $\rightarrow Q$  scambiata dal sistema con l'esterno dipende dal tipo di trasformazione compiuta e non solo dallo stato iniziale e finale. Lavoro e calore dipendono dalla trasformazione ma sono legati tra di loro. Infatti, la quantità  $Q-L$  dipende solo dallo stato iniziale e dallo stato finale del sistema e non dalla trasformazione. Si introduce una grandezza  $U$  (Energia interna del sistema) tale che assorba calore e che venga fatto il lavoro. L'**energia interna** di un sistema è una misura microscopica, a livello atomico o molecolare, della energia totale (cinetica più potenziale) delle

particelle costituenti il sistema:

$$U = EC + EP.$$

Lo scambio di una quantità di calore  $Q$  tra 2 corpi equivale ad una variazione  $\Delta U$  di energia interna di ciascun corpo

$$\Delta U = Q.$$

Ciò è conseguenza del fatto che il calore non è altro che una forma di energia, l'**energia termica** che, nei gas, è soprattutto energia cinetica. Il **primo principio della termodinamica** riguarda appunto la capacità di un sistema di compiere lavoro (ossia cedere parte della sua energia interna all'esterno, o assorbitarla dall'esterno).

La forma più generale di questo principio è

$$\Delta U = Q - L$$

Dove  $Q$  è la frazione di  $U$  che si trasforma in calore. L'energia interna è una **funzione di stato**, ossia dipende solo dallo stato del sistema e non da come questo è stato raggiunto; le singole grandezze  $Q$  e  $L$  dipendono invece dal particolare processo considerato. Il primo principio è quindi la forma più generale del principio di conservazione dell'energia.

$$\Delta U = Q - L$$

### 1° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

Ogni sistema termodinamico possiede un'energia interna  $U$ , funzione solo dello stato termodinamico in cui si trova il sistema.

$$\Delta U \equiv U_B - U_A \quad (J, Kcal); \quad Q \quad (J, Kcal); \quad L \quad (J)$$

È una generalizzazione del principio di conservazione dell'energia (tiene conto anche dell'energia termica).

- Per una trasformazione finita  $\rightarrow \Delta U = Q - L$
- Per una trasformazione infinitesima  $\rightarrow dU = \delta Q - \delta L$

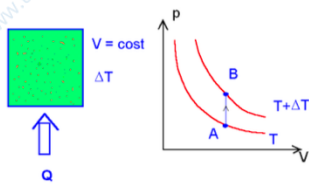
Trasformazioni principali in Termodinamica

- **isobare:**  $\Delta U = Q - L = nCP\Delta T - p\Delta V$
- **isocore:**  $\Delta V = 0, L = 0, \text{ da cui } \Delta U = Q = nCV\Delta T$
- **isoterme:**  $\Delta U = 0, \text{ da cui } Q = L = \int pdV = nRT \ln V_2/V_1$
- **adiabatiche:**  $Q = 0, \Delta U = -L, pV^\gamma = \text{costante}$

Lo stato di un sistema (per es. acqua solida, liquida o gassosa) è caratterizzato da rapporti ben definiti tra energia termica e potenziale delle particelle del sistema. I cambiamenti di stato (o **transizioni di fase**) avvengono a **temperatura costante**, in quanto tutto il calore (ceduto o assorbito dal sistema) viene utilizzato per cambiare questo rapporto. Il calore latente per unità di massa  $L = Q/m$  è definito come la quantità di calore necessaria a far compiere la transizione di fase alla massa  $m$ .

**CALORE SPECIFICO A VOLIME COSTANTE**

$$c_v = \frac{Q (V = \text{cost})}{n \Delta T} \quad \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right) \quad \left( \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right)$$



$$1^{\text{o}} \text{ Principio } \Delta U = Q (V = \text{cost}) \Rightarrow \begin{cases} \Delta V = 0 \\ L = 0 \end{cases}$$

$$c_v = \frac{Q (V = \text{cost})}{n \Delta T} = \frac{\Delta U}{n \Delta T}$$

$$\Delta U = n c_v \Delta T \quad \text{gas perfetto}$$

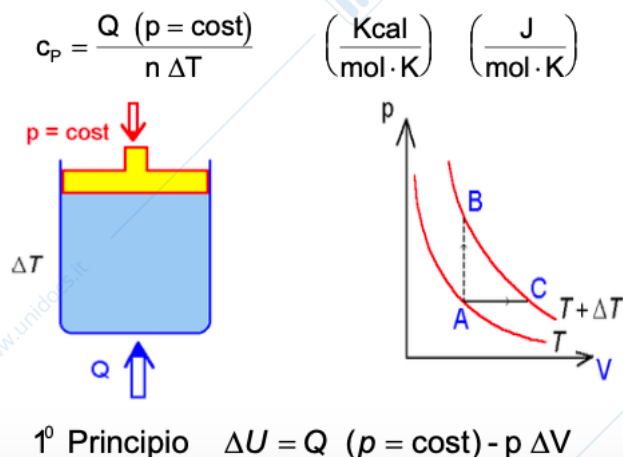
**CALORE SPECIFICO A PRESSIONE COSTANTE**

Per il gas perfetto U dipende solo da T.

Nelle due trasformazioni: (A → B V = cost e A → C p = cost).

si giunge alla stessa temperatura T + ΔT.

La variazione dell'energia interna (ΔU) nei due casi deve essere uguale.



$$1^{\text{o}} \text{ Principio } \Delta U = Q (p = \text{cost}) - p \Delta V$$

**CAMPIONAMENTO E QUANTIZZAZIONE**

Il processo di conversione analogico-digitale è fondamentale in molte applicazioni moderne, come la trasmissione audio e video digitale. Questo processo comporta due fasi principali: **campionamento** e **quantizzazione**. Di seguito, una spiegazione dettagliata con esempi.

**CONVERSIONE ANALOGICO-DIGITALE**

Un segnale analogico è continuo sia nel tempo sia nell'ampiezza, mentre un segnale digitale è discreto in entrambe le dimensioni. La conversione analogico-digitale consiste nel trasformare una variazione continua di tensione (segnale analogico) in un insieme di valori numerici che rappresentano il segnale in istanti discreti.

**Esempio:**

- **Segnale analogico di un microfono:** il segnale di tensione generato varia in modo continuo in base al suono registrato. Questo segnale sarà digitalizzato per essere utilizzato da un computer.

**QUANTIZZAZIONE**

La quantizzazione è il processo mediante il quale l'ampiezza del segnale analogico viene rappresentata da valori discreti. Questo introduce un errore chiamato **rumore di quantizzazione**, che diminuisce all'aumentare del numero di bit utilizzati per rappresentare ciascun valore.

**Dettagli:**

- Un valore continuo (ad esempio, 3.5678V) viene "arrotondato" a un valore discreto più vicino in una scala predefinita.
- Ogni livello discreto è rappresentato da una sequenza di bit.

**CAMPIONAMENTO**

Il campionamento consiste nel prelevare il valore del segnale analogico a intervalli regolari nel tempo. La velocità con cui si prendono i campioni è definita dalla **frequenza di campionamento**.

**Dettagli:**

- Maggiore è la frequenza di campionamento, più accurata sarà la rappresentazione del segnale.
- La frequenza di campionamento deve rispettare il **teorema di Nyquist**, ossia deve essere almeno il doppio della frequenza massima presente nel segnale.

**ALIASING**

L'aliasing si verifica quando la frequenza di campionamento è troppo bassa, causando un errore nella ricostruzione del segnale. Frequenze alte vengono "confuse" con frequenze più basse, generando un segnale alterato.

**Esempio:**

- **Segnale originale:** 1,000 Hz
- **Frequenza di campionamento:** 955 campioni/sec
- Si genera un segnale spurio (alias) di 45 Hz.

**FILTRO PASSA-BASSO**

Per evitare aliasing, si utilizza un filtro passa-basso che elimina le frequenze superiori alla metà della frequenza di campionamento (detta anche **frequenza di Nyquist**).

**Dettagli:**

- Il filtro rimuove tutte le frequenze indesiderate che potrebbero causare aliasing nel segnale campionato.
- È particolarmente utile per segnali audio e video ad alta qualità.

**APPLICAZIONI PRATICHE**

- **Audio digitale:** Conversione di musica analogica in file MP3 o WAV.
- **Video digitale:** Conversione di filmati per formati compressi come MP4.
- **Telecomunicazioni:** Campionamento di segnali vocali per la trasmissione su reti digitali.

**LA CONVERSIONE ANALOGICO DIGITALE****ELABORAZIONE NUMERICA DEI SEGNALI (DSP)**

L'elaborazione numerica dei segnali (DSP, Digital Signal Processing) è una disciplina relativamente giovane, che ha visto un grande sviluppo negli ultimi 25 anni grazie ai progressi nei componenti elettronici ad altissima integrazione e ai processori specializzati. L'analisi di un segnale analogico, caratterizzato da valori continui, richiede la sua conversione in un segnale digitale, cioè in una sequenza di soli valori binari (0-1), per consentire la sua elaborazione tramite una CPU. Questa conversione avviene tramite un convertitore analogico-digitale (A/D) inserito in un circuito che può essere rappresentato schematicamente.

**Esempio di Elaborazione per un Segnale Audio** → Un esempio pratico è la registrazione di un segnale acustico, come la variazione di pressione generata da una sorgente sonora. 1. Il segnale acustico viene trasformato in una debole tensione elettrica tramite un microfono, che agisce da trasduttore (un dispositivo che converte la natura del segnale senza modificarne la forma). 2. Questa tensione viene amplificata da un amplificatore. Entrambi i dispositivi operano in modo analogico. 3. Successivamente, il segnale viene convertito in digitale tramite un convertitore A/D.

**FASI DELLA CONVERSIONE ANALOGICO-DIGITALE**

La conversione A/D prevede due operazioni fondamentali:

1. **Campionamento:** Permette di ottenere una sequenza discreta di valori partendo dal segnale continuo. I valori del segnale vengono estratti a intervalli di tempo equispaziati (periodo di campionamento). La frequenza con cui si campiona è detta frequenza di campionamento, pari all'inverso del periodo di campionamento.
2. **Quantizzazione:** Consiste nel rappresentare i valori continui estratti durante il campionamento con un numero finito di livelli discreti, determinati dalla risoluzione in bit del convertitore.

**TEOREMA DI SHANNON** → Per evitare distorsioni durante il campionamento, il teorema di Shannon afferma che la frequenza di campionamento deve essere almeno il doppio della frequenza massima del segnale. La frequenza massima è detta anche frequenza di Nyquist. Se questa condizione non è rispettata, si verifica il fenomeno di aliasing, in cui componenti di frequenza superiore a quella di Nyquist appaiono come componenti a frequenza più bassa, creando distorsione.

**FILTRI ANTI-ALIASING E FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO**

I filtri anti-aliasing sono utilizzati per eliminare le frequenze superiori alla frequenza di Nyquist, prevenendo il fenomeno di aliasing. Filtri passa-basso ideali presentano un taglio netto delle frequenze indesiderate, ma quelli reali hanno una zona di transizione graduale. Per segnali ad alta risoluzione, si aumentano le frequenze di campionamento per ampliare l'area della banda utile.

**ANALISI DI FOURIER E FFT (FAST FOURIER TRANSFORM)**

Il teorema di Fourier afferma che qualunque funzione periodica può essere rappresentata come una somma di funzioni sinusoidali pure di opportuna ampiezza e frequenza multipla della frequenza

fondamentale. La trasformata di Fourier consente di analizzare i segnali nel dominio della frequenza e di tornare al dominio temporale tramite l'antitrasformata. Spettrogrammi rappresentano il contenuto spettrale delle funzioni, con la frequenza sull'asse delle ascisse e l'ampiezza sull'asse delle ordinate.

