



Appunti di Fisica \_I  
Secondo semestre

Termodinamica

## Sommario

|   |   |
|---|---|
| La temperatura.....   | 1 |
| Il termometro.....  | 1 |
| Operativamente come si procede?.....  | 2 |
| Cosa è la pressione?.....   | 4 |
| Perché i corpi rigidi e i fluidi non si comportano nello stesso modo? ..... | 5 |
| Pressione atmosferica.....  | 5 |
| Il principio di Archimede.....  | 6 |
| Ma come si spiega oggi la pressione?.....                                   | 7 |
| Nota sulla pressione.....   | 8 |
| Lavoro.....   | 8 |
| Fluido.....   | 9 |

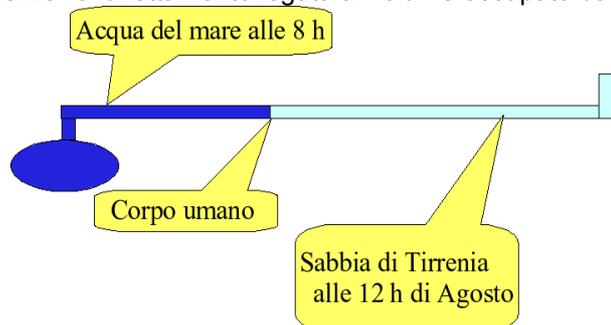
## La temperatura

La temperatura è quella entità che spiega la sensazione di caldo e di freddo che proviamo quando tocchiamo un oggetto. In passato la temperatura è stata confusa con il "fluido calorico" e solo due secoli fa' i nostri vecchi colleghi riuscirono a fissare un metodo razionale sfruttando il fatto che *alcuni sistemi cambiavano il loro stato con il variare della temperatura*, per esempio aumentavano di volume o di pressione.

## Il termometro

Si decise allora di fissare una procedura per misurare oggettivamente il valore della temperatura. Per esempio, si immagina un contenitore cilindrico (un tubo trasparente) con un fluido che occupa parte del tubo per una lunghezza  $l$ . Quella lunghezza è direttamente legata al volume occupato dal fluido e varia con il variare della temperatura. Immagina di mettere a contatto del "cilindro" oggetti di diversa temperatura e di registrare volta, volta con una tacca, la posizione del fluido quando l'oggetto e il "cilindro" sono in equilibrio termico.

Ogni tacca corrisponde ad uno stato termico noto e nel futuro potremmo dare lo stato termico di un altro oggetto accostandolo al "cilindro" e verificando la posizione raggiunta dal fluido.



È il principio per costruire il *termometro*, l'apparecchio che normalmente usiamo per misurare la temperatura di un corpo.



## Operativamente come si procede?

La temperatura si legge sulla scala del cilindro del "termometro". Tutti i corpi, che messi in contatto con il "termometro" forzano il fluido interno a posizionarsi in uno dei punti prima memorizzati, avranno giusto la temperatura corrispondente a quella dello stato termico del corpo usato come riferimento.

Bene, un buon passo e' fatto! Adesso esiste un metodo razionale per catalogare gli stati termici dei corpi riferendoci a stati noti. Ma forse si puo' fare meglio!

*Rivediamo.*

Quando mettiamo in contatto il termometro con un corpo, qualche cosa passa (calore) tra il sistema in esame ed il termometro e solo dopo quando si è raggiunto l'equilibrio, cioè quando il fluido nel cilindro si stabilizza in posizione, l'altezza della colonna raggiunge il punto che indica la temperatura del sistema in esame.

Il termometro è basato sul fatto, ripeto, che un gas (o alcuni liquidi come il mercurio), se riscaldati, variano il loro volume o la loro pressione. Va ricordato che il problema fu affrontato sperimentalmente e sistematicamente almeno tre secoli fa e Gay\_Lussac che finì con l'enunciare la seguente legge:

- Legge di Gay\_Lussac: *A pressione costante il volume di un gas "perfetto" varia linearmente con la temperatura e parimenti a volume costante la pressione varia linearmente con la temperatura.*

Nota: Gas "**perfetto**" un termine che useremo spesso e che sta ad indicare che le leggi enunciate sono una estrapolazione ideale delle osservazioni sperimentali.

La legge esprime qualche cosa in più di quanto abbiamo discusso prima. Indica la possibilità di una relazione continua e lineare tra la temperatura e il volume.

In effetti il problema sembra quello dell'uovo e della gallina: è "nata" prima la temperatura e poi si è verificata la proporzionalità o linearità indicata nella legge o prima si è guardato come varia per esempio il volume a pressione costante di un gas e poi si è definita la temperatura?

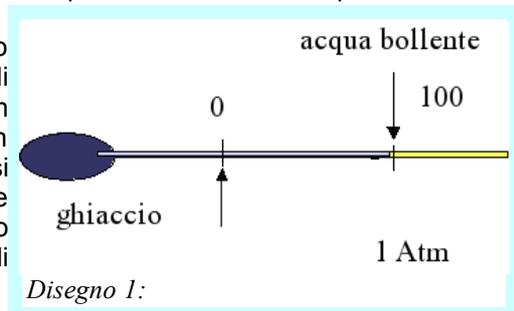
Direi che il metodo giusto è il secondo.

Capito che un gas varia, per esempio il suo volume, quando si riscalda, siamo passati a calibrare la misura della temperatura con due riferimenti naturali ben noti e particolarmente stabili e ripetibili ovunque: la temperatura *del ghiaccio fondente* e la *temperatura dell'acqua in ebollizione* il tutto alla pressione costante del livello del mare, una atmosfera. La prima fu chiamata temperatura  $0^\circ$  e la seconda temperatura  $100^\circ$ .

Il fluido del termometro sperimentale, messo in contatto con il ghiaccio fondente si ferma lungo la colonnina di espansione (*raggiunse l'equilibrio termico*) in un punto in cui si disegna la tacca 0 e poi messo in contatto con l'acqua bollente raggiunge un punto più lontano in cui si segna la tacca 100. Lo spazio tra lo 0 ed il 100 viene suddiviso in cento parti chiamati gradi Celsius. Possiamo poi continuare a fare tacche con lo stesso passo al di sotto dello zero e al di sopra di cento?...ma vediamo.

Tutti i corpi che messi in contatto con il nostro termometro

fanno fermare la colonnina nello stesso punto, naturalmente hanno per definizione la stessa temperatura, cosa che vuol dire anche che sono in equilibrio termico tra loro e con il termometro. Poiché tutto è stato tarato prendendo come riferimento temperature ben note a tutto il mondo, quando dico che hai la temperatura a  $38^\circ$  tutti i dottori, anche quelli duri, si rendono ben conto di che cosa vuol dire!... se sale ancora rischi di scottare!





Ora un pochino di matematica? quando la colonnina sale indica che il gas (perfetto!) si è espanso occupando un pò più di volume ( adesso si lavora a pressione costante). Scrivi allora che la variazione relativa di volume  $\Delta V = V - V_0$  rispetto al volume  $V_0$  a zero gradi è proporzionale o lineare, come dice Gay\_Lussac, alla temperatura  $C$ , cioè :

$$1) \quad (V - V_0)/V_0 = aC$$

dove "a" è una costante di proporzionalità che si calcola immediatamente (.. che Gay\_Lussac ha calcolato con i dati sperimentali..) visto che si sanno  $V$ ,  $V_0$  e naturalmente  $C$  letta sulla scala graduata a partire dalla tacca zero. Ecco quante vale: Gay\_Lussac misuro' una variazione del volume del gas del 36.63% per 100 gradi da cui scopri'

$$2) \quad a = 1./273^0 \quad ^\circ C^{-1} \quad (\text{oggi} = 1./273.15^0 \quad ^\circ C^{-1})$$

ha le dimensioni inverse della temperatura Celsius dato che nella (1)  $aC$  deve essere un numero puro.

La (1) si può scrivere anche come  $V = V_0(1 + aC)$  e tu ti devi domandare: se prendo per  $C$  temperature negative cosa accade?

Il volume  $V$  diminuisce fino a diventare zero (!) quando  $C$  è uguale proprio a  $-273.15^0$ , dopo non posso più scendere in temperatura altrimenti il Volume che è una quantità fisica ben definita diventa negativo, non ha senso! Quindi  $273.15^0$  è la *temperatura minima assoluta*, ed è la tacca più bassa che potremo fare sul nostro termometro. *Nota:* non c'è un limite matematico superiore!!

Anche qui il risultato, come vedremo in seguito, è un risultato ideale che vale per i gas perfetti perché i gas reali, per quanti gradi si scenda in temperatura, non potranno mai ridurre il proprio volume a zero visto che le molecole di cui il gas è fatto hanno un loro volume proprio irriducibile!

In omaggio al lord Kelvin è stata definita la temperatura assoluta in gradi Kelvin ( $^0K$ ) che pur avendo lo stesso passo della temperatura Celsius ha lo zero proprio al punto più' basso. La temperatura Kelvin che indichiamo con il simbolo  $K$  è banalmente legata a quella Celsius (quella usata tutti i giorni da noi):

$$3) \quad K = C + 273.15^0$$

Fine della storia sulle temperature? no in effetti c'è quella detta Fahrenheit ( $^0F$ ), (quella che appare anche sul display della mia auto per il condizionatore? accidenti a loro?), ma è solo una storia di zero e di passo? lo scopri da solo/a.. !!!!.

C'è ' anche una nuova definizione che va menzionata. In una conferenza dei Pesi e Misure del 1954 fu deciso di fissare come punto fisso campione *il punto triplo dell'acqua* ; quel particolare punto in cui l'acqua appare come liquida, ghiaccio e vapore d'acqua saturo contemporaneamente (come vedremo più' avanti). A questo punto fu assegnata arbitrariamente la temperatura di  $273.16 K$  che corrisponde a  $0.01$  gradi Celsius.

Ma è proprio finita? per il momento abbiamo definito la temperatura in modo *fenomenologico*, cioè basandoci su di un fenomeno fisico, la dilatazione dei gas e su dati sperimentali. Più avanti troveremo anche una spiegazione più profonda.

## Cosa è la pressione?

L'effetto macroscopico è ben noto, lo provi personalmente pompando una bicicletta! vedi la fatica che fai per vincere la pressione del gas e spingere l'aria nella gomma! la provi anche se vai troppo alto, in un aereo mal pressurizzato etc..

Dunque un corpo rigido è in equilibrio meccanico se la risultante delle forze e del momento delle forze sono nulle, ma per un fluido non è sufficiente.



Un sistema è costituito da un cilindro pieno di gas, per esempio fissato su di un cavalletto, con le due basi sostituite da due pistoni liberi di muoversi. I due pistoni sono spinti verso l'esterno; scopriamo che per tenerli fermi occorre applicarvi su ciascuno di essi una forza, in verità due forze di pari intensità, stessa direzione e senso opposto.

Se immaginiamo di praticare un'altro foro laterale e di applicarci un terzo pistone di pari area, scopriamo ancora di dover applicare una terza forza di pari intensità rivolta verso l'interno perpendicolarmente alla direzione di prima! Sperimentando ancora si scopre inoltre che la forza è essenzialmente proporzionale alla superficie del pistone e sempre diretta perpendicolarmente a questa.

Queste tre forze esterne da noi applicate ai tre pistoni non possono dare, almeno in questa configurazione, una risultante nulla e quindi il cilindro non potrebbe essere in equilibrio meccanico se non fosse bloccato sul cavalletto. Dobbiamo allora concludere che altre forze, necessarie per mantenere l'equilibrio, sono prodotte sulle pareti rigide del contenitore e via queste trasmesse sul cavalletto di supporto.

Per evitare di applicare quelle forze esterne possiamo bloccare il pistone, una volta definita la sua posizione, con uno o più spinotti alla parete stessa del corpo rigido. Nasce una reazione sugli spinotti che annulla identicamente la forza generata dal pistone. L'insieme del pistone più corpo rigido formano un sistema unico non più soggetto a forze esterne ed il sistema globale resta in equilibrio dinamico.

Queste osservazioni hanno indotto Pascal a scrivere il suo principio:

*Un fluido in equilibrio esercita su ogni parete del contenitore una forza diretta normalmente alla superficie di modulo proporzionale all'area della parte considerata.*

Così questo vale per qualsiasi superficie, anche non piana. In ogni punto esiste una intensità di *forza per unità di superficie* calcolabile come il limite del rapporto della forza applicata su un elemento di superficie così piccolo da tendere ad essere piano. Il coefficiente di proporzionalità tra la forza e l'elemento di superficie orientato secondo la normale esterna alla superficie, è la pressione  $P$  del fluido:  $\vec{F} = P \sigma \vec{n}$

*Nel sistema SI la pressione si misura in Pa (pascal) ed è pari 1 N/m<sup>2</sup>.*

*Un suo multiplo importante è il Bar = 10<sup>5</sup> Pa, che è anche molto vicino alla nostra vecchia Atmosfera (circa un kg/cm<sup>2</sup>).*

Questo parametro  $P$ , in condizioni di equilibrio meccanico, definisce tutte le forze tra il fluido e l'esterno. Nel caso di sistemi in moto (presenza di venti per esempio) quanto detto non è più vero, ma qui si sconfinava nella dinamica dei fluidi che adesso non trattiamo.

## **Perché i corpi rigidi e i fluidi non si comportano nello stesso modo?**

La ragione è che nei solidi i legami sono rigidi, mentre nei fluidi sono laschi e le varie parti (molecole) possono scorrere gli uni rispetto agli altri. Così, mentre un solido può trasmettere sollecitazioni in tutte le direzioni, un fluido può trasmettere forze solo nelle direzioni perpendicolari alla superficie.

Si noti anche una banale conseguenza del principio enunciato.

Se si considera una porzione interna del nostro sistema definita da una superficie chiusa (del resto arbitraria) e indichiamo come esterna l'altra parte del fluido, allora sulla superficie ideale di separazione si eserciterà una pressione, una verso l'interno e l'altra verso l'esterno pari ancora a  $P$ . Per dimostrare questo si immagini di sostituire la superficie chiusa ideale con una superficie reale (superficie, superleggera) vuota del fluido.



Si capisce immediatamente che per mantenere la superficie in posizione dovremo creare nell'interno del volume ridotto, con qualche altro fluido, una pressione pari a quella esercitata dal sistema esterno sulla superficie. Del resto esternamente, se togliessimo il fluido dovremmo creare ugualmente una pressione identica a quella interna per mantenere la superficie in posizione. Dunque le due pressioni sono identiche e pari alla pressione iniziale  $P$ .

Se immaginiamo un elemento di volume, per esempio un cubo, piccolissimo, una volta immerso nel fluido, sarà sollecitato dalla stessa pressione su tutte le sue facce ed in effetti sperimenterà una forza totale nulla. Possiamo allora dire che in ciascun punto del nostro gas, visto come limite di un cubo di dimensioni nulle, la pressione  $P$  pur costante e diversa da zero, genera una forza totale nulla!

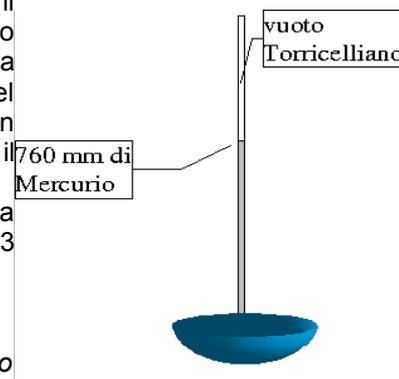
*La pressione è un parametro sempre positivo. Anche se si aumenta indefinitamente il volume del nostro fluido la pressione non si azzerà mai.*

Certo ci sono casi limite! Se abbiamo a che fare con un liquido, potremmo formare delle cavità (cavitazione) perdendo lo stato di equilibrio termodinamico; un gas, se lo comprimiamo troppo, può diventare liquido!

La separazione tra gas e liquido non è poi così netta, infatti alcuni gas a temperatura bassa, ma nemmeno troppo bassa, si trasformano in liquido, mentre altri materiali, come l'acqua appena superata la temperatura di 100 gradi in realtà si trasforma in uno stato di vapore gassoso proprio a pressione atmosferica.

## Pressione atmosferica

Per misurare la pressione dell'atmosfera si può usare, come fece Torricelli, un tubo trasparente pieno di un fluido, per esempio il mercurio, che dopo averlo riempito, viene immerso e tenuto verticale in una vaschetta dello stesso liquido in contatto con l'atmosfera. Un estremo, quello in alto, è ermeticamente chiuso, l'altro immerso nel liquido è libero. La colonnina del "mercurio" si abbassa, lasciando il vuoto (anche detto "toricelliano" poiché in effetti nel vuoto ci saranno i vapori di mercurio che avranno tuttavia una pressione residua trascurabile), finché il peso del mercurio nella colonnina restante non è controbilanciato dalla forza applicata sulla superficie inferiore della colonnina dalla pressione che è la stessa che si esercita sulla superficie esterna del mercurio. Si trova una altezza di 760 mm di mercurio, che oscilla in funzione della pressione esterna. In genere si *usava come unità* il Torr pari ad un millimetro di mercurio, ovvero un Torr =  $1/760$  Atm. Ricordando la densità del mercurio ( $1.36 \cdot 10^4$  Kg/m<sup>3</sup>) si trova per la pressione dell'aria esterna è  $1.0336$  kg/cm<sup>2</sup> corrispondente a  $1.013 \cdot 10^5$  Pa (Pascal), che poi è la definizione di Atmosfera; nota  $1$  Atm =  $1.013$  Bar.



*Dunque ... si faccia attenzione l'Atmosfera ed il Torricelli oggi sono illegali!!!!*

E se il barometro fosse stato realizzato con un tubo contenente acqua, che lunghezza avrebbe dovuto avere il tubo?

## Il principio di Archimede

Per il momento abbiamo solo immaginato di applicare forze esterne al nostro sistema comprimendo un pistone, ma in realtà c'è almeno un caso importante, quello delle *forze a distanza* generate dalla attrazione gravitazionale che dobbiamo discutere.



Prendiamo un cubo ideale di lato  $\sigma$  immerso in un fluido. Su di esso agiscono le forze dovute al fluido circostante. Le forze applicate sulle superfici laterali si annullano a coppie. La pressione sul lato inferiore invece è leggermente superiore poiché dobbiamo tener conto della forza peso  $mg$  della quantità di fluido contenuto nel cubo che genera una extra pressione che si somma a quella di prima:

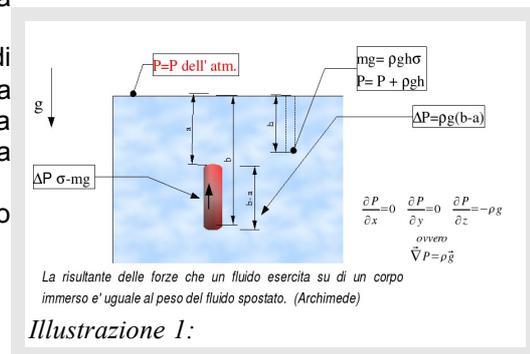
$$2) \quad F = F' + mg \equiv P \sigma = P' \sigma + \rho g h \sigma$$

dove  $P'$  è la pressione sulla superficie superiore,  $\rho$  la densità del fluido e  $h$  è l'altezza del cubetto. In effetti  $h$  è l'altezza della colonna di fluido di base  $\sigma$  che sovrasta il punto in cui vogliamo misurare la pressione. Così potremmo leggere la 2) dicendo che la pressione ad una profondità  $h$  è pari alla pressione sulla superficie superiore aumentata di  $\rho gh$ . Di solito si esprime lo stesso concetto matematicamente scrivendo

$$3) \quad \frac{\partial P}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

ovvero

$$\vec{\nabla} P = \rho \vec{g}$$



equazione differenziale che tiene conto anche del fatto che la densità del fluido può variare con la pressione stessa.

Una simpatica conseguenza è il principio di Archimede:

*La risultante delle forze che un fluido esercita su di un corpo immerso è uguale al peso del fluido spostato.*

Ora è banale dimostrarlo, basta generalizzare quanto sin qui detto.

Se si prende in esame il volume del fluido contenuto in un oggetto definito dalla sua superficie esterna chiusa immersa nello stesso fluido, allora in condizioni di equilibrio la risultante delle forze applicate sul volume dal fluido esterno deve controbilanciare il peso del fluido contenuto nel volume considerato. Se il volume è vuoto o contiene materia più leggera del fluido, la forza peso non controbilancia la spinta di pressione e tende a salire in alto; se è più pesante scende in basso.

*Da qui il principio di Archimede!*

Ora immaginiamo un pallone gonfiato con gas di minor densità dell'aria. Il pallone sale in cielo finché sente una spinta verso l'alto, ma in quota l'aria si rarefa (la densità dell'atmosfera infatti diminuisce con l'altezza) e il pallone finisce con il fermarsi a mezza aria quando il suo peso equivale al peso dell'aria spostata.

## Ma come si spiega oggi la pressione?

Meglio chiedere come nasce la pressione? .....

è la meccanica statistica che ci viene incontro e ci aiuta a capire meglio il legame tra la meccanica e la termodinamica.



Pensiamo ad un gas ideale contenuto in un recipiente.

La pressione deriva dall'interazione microscopica delle particelle di cui è composto il gas con la parete del contenitore. Nasce naturalmente dagli infiniti urti, che per il momento consideriamo elastici, delle nostre palline con la superficie. In ogni urto la pallina varia la sua quantità di moto; praticamente si inverte la direzione della componente normale di moto alla superficie. Io direi semplicemente che *rimbalza*.

La variazione di quantità di moto implica che per un tempo  $dt$  vi sia una forza che induce la variazione stessa secondo la nota formula  $\Delta mv = fdt$ .

La forza deriva dalle interazioni intime delle molecole di gas con le particelle della superficie urtata, forza mediamente diretta verso l'interno del recipiente e probabilmente di origine elettro-magnetica, ma non indagiamo oltre (vedi anche il primo capitolo), tanto basta che esista, per respingere la nostra particella.

Ora capito il processo, sei in grado di calcolare la forza 'f' media che si applica su di un elemento di superficie  $\Delta\sigma$ . Conta quante sono le particelle che in un intervallo  $dt$  sbattono contro l'elemento di superficie; ebbene sono tutte quelle che nell'intervallo  $dt$  raggiungono la superficie e che quindi non possono distare dalla superficie in esame più di  $v_n dt$  altrimenti arrivano dopo!  $v_n$  naturalmente è la componente normale di  $v$  alla superficie, le altre direzioni di moto parallele alla superficie non avvicinano la pallina alla superficie. Per semplicità suppongo che la superficie in esame sia perpendicolare a  $x$  così che la componente normale alla superficie non è altro che  $v_x$ .

Quindi le palline che in un certo istante colpiscono sulla superficie sono quelle contenute in un cilindretto di superficie di base pari a  $\Delta\sigma$  e di altezza  $v_x dt$  di volume elementare  $\Delta V = \Delta\sigma v_x dt$  e che hanno la direzione verso la parete, per simmetria saranno la metà di tutte le particelle che hanno la velocità in modulo  $|v_x|$ ; la variazione di impulso in un urto elastico corrisponde, come abbiamo detto, alla inversione della componente normale alla superficie che dà  $\Delta mv = 2mv_x$  per ogni urto.

In definitiva la variazione totale d'impulso totale in  $dt$  è dato dalla variazione elementare moltiplicata per il numero assoluto delle particelle utili contenute nel cilindretto. I passaggi matematici che mettono in relazione l'impulso elementare trasmesso alla parete sulla superficie  $\sigma = \Delta\sigma$  nell'intervallo  $dt$ , tenendo conto delle particelle con velocità  $v_x$ , è

4)

$$\Delta F dt = 2m v_x \frac{n_{v_x}}{2} = 2m v_x \frac{N_{v_x}}{2V} \Delta V = 2m v_x \frac{N_{v_x}}{2V} \sigma v_x dt = 2m \frac{v_x^2}{2V} \sigma dt N_{v_x}$$

dove  $V$  è il volume totale,  $N_{v_x}$  sono le particelle che hanno la velocità  $v_x$ . Dividendo per la superficie  $\sigma$  e il tempo  $dt$  si ottiene il contributo dato alla pressione dalle particelle di velocità  $v$ .

5)

$$P_x = P = 2m v_x^2 \frac{N_{v_x}}{2V} = \frac{2N_{v_x}}{V} \frac{1}{2} m v_x^2$$

La *pressione totale* si trova come somma dei contributi elementari di tutte le velocità. Se è nota la funzione di distribuzione di  $v$ ,  $\rho(v)dv$ , che ci fornisce la frazione di particelle dotate di velocità  $v$ , potremmo integrare la 5). In effetti non ci occorre conoscere la funzione di distribuzione per il momento esattamente, sappiamo solo che la forma della distribuzione è stata studiata da Maxwell e che per simmetria è la stessa per  $v_x$ ,  $v_y$  o  $v_z$ .

Sfruttando allora l'isotropia della distribuzione delle velocità possiamo facilmente scrivere:

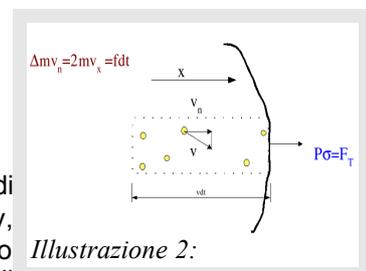


Illustrazione 2:



$$6) \quad P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left( \int \frac{1}{2} m v_x^2 \rho(v_x) dv_x + \int \frac{1}{2} m v_y^2 \rho(v_y) dv_y + \int \frac{1}{2} m v_z^2 \rho(v_z) dv_z \right)$$
$$P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} (\overline{E_c})$$

L'integrale su tutte le velocità equivale a mediare.

*La pressione è una espressione della energia cinetica media delle particelle del sistema.*

### Nota sulla pressione

La pressione ha un aspetto macroscopico che descrive l'aggressività dei fenomeni interni sulle superfici delimitate dal contenitore o immerse nel gas (vedi anche più su). Infatti la pressione non si evidenzia solo sulle pareti esterne, ma anche in ogni punto interno del volume occupato dal fluido. Inserisci un oggetto all'interno del contenitore e sulle pareti di questo si noterà immediatamente come la pressione tenda a comprimerlo, esso non si muove poiché la pressione si applica su tutte le pareti dell'oggetto perpendicolarmente alla sua superficie e la risultante totale della forza applicata è nulla. L'oggetto potrebbe, se non è abbastanza rigido, solo schiacciarsi sotto la forza di pressione! Tuttavia se il sistema è immerso in un campo di forze esterno che agisce sul fluido, come il campo gravitazionale, allora la pressione dipende anche dalla profondità ed in questo caso nasce una forza verso l'alto (Archimede), a causa proprio del differenziale di pressione, che tenta di portare a galla un qualsiasi oggetto immerso.

### Lavoro

Se ci sono delle forze di superficie e dei pistoni in movimento, spinti da quelle forze, deve esserci un lavoro da calcolare.

Il lavoro delle *forze esterne* applicate ad un pistone che tenta di comprimere il gas muovendosi di  $\Delta x$  in un cilindro si calcola facilmente ricordando che la forza applicata è essenzialmente quella che si oppone alla forza di pressione  $F = -P\sigma$ . Il segno dipende dal fatto che le due forze sono contrarie.

Il lavoro è  $L = -P\sigma\Delta x = -P\Delta V$ , essenzialmente dipende dalla variazione del volume. Nel caso di un grande spostamento, la pressione potrebbe variare e quindi la relazione diventa

$$7) \quad L = - \int P dV$$

*Da cui, il lavoro delle forze esterne è nullo se il volume non varia, è positivo se il fluido si comprime, è negativo nel caso di una espansione.*

Forse una rilettura del capitolo 26) potrebbe aiutare!

### Fluido

Abbiamo parlato spesso di fluido, purtroppo senza una chiara definizione, ma facendo leva solo sulla nostra intuizione. Adesso, anche per una migliore comprensione dei concetti già espressi o da illustrare, discutiamo una semplice, ma efficace, classificazione della materia.

Dunque gli stati della materia sono solitamente classificabili in tre classi o meglio come diciamo fasi: i **solidi** (fase solida), i **liquidi** (fase liquida) ed i **gas** (fase gassosa).



La parola unificante *fase* sta ad indicare che nonostante tutto uno stesso materiale può presentarsi in momenti diversi in una delle tre fasi su indicate. Non c'è una divisione netta tra lo stato solido e quello liquido o quello gassoso. È vero che noi siamo abituati a vedere le pietre come pietre, ben solide e immutabili, tuttavia diventano liquide appena la temperatura supera un valore, cioè il valore della temperatura critica di fusione del composto chimico molecolare di cui è costituita la pietra in oggetto. Una temperatura ancora più alta trasforma la nostra pietra in gas... L'acqua si presenta ai nostri occhi in uno o nell'altro stato poiché le sue temperature critiche di fusione ( $0^{\circ}$ ) o di vaporizzazione ( $100^{\circ}$ ) fanno parte dell'intervallo di temperature della nostra vita comune, mentre le migliaia di gradi necessari per la vaporizzazione di un solido sono fuori della nostra portata di vita di tutti i giorni.

Se si scende un po' più in dettaglio, possiamo capire questo comportamento della materia esaminando il comportamento delle molecole (o degli atomi) che formano le strutture cristalline dei nostri materiali. L'esperienza ci ha insegnato che le forze tra questi particelle sono attrattive a grande distanza, ma repulsive a brevissima distanza.

Se la agitazione termica (energia cinetica media) delle particelle non è molto elevata (temperature basse) le molecole si avvicinano fino al punto in cui la repulsione impedisce di accorciare ancora le distanze e infine si bloccano in una struttura cristallina *solida* che corrisponde ad una delle possibili posizioni più stabili della materia a quella temperatura.

Se la temperatura cresce, cioè l'agitazione termica aumenta, le molecole si distanziano e benché ancora continuano ad attirarsi reciprocamente, si muovono più liberamente scorrendo in tutte le direzioni. Il materiale si presenta piuttosto in una fase *liquida*, le molecole restano però ancora ben densamente raggruppate. La materia in questa fase è ancora praticamente incompressibile.

L'ultimo passo è determinato da un terzo valore della temperatura, quando le molecole sono in alta agitazione, le distanze aumentano tanto che i legami si rompono (ovvero le forze di attrazione diventano praticamente nulle) e le molecole volano liberamente... sono distanti. La materia si presenta allora in uno stato *gassoso*, poco denso e altamente compressibile (è quasi lo stato di gas ideale!).

Con questa storia possiamo dare una definizione più tecnica delle tre fasi in cui si trova la materia:

- *L'energia di interazione domina*: allora i legami sono forti e lo stato è **solido**
- *L'energia termica (energia cinetica media) domina*: allora lo stato è **gassoso**
- *Caso intermedio, energia di legame e termica confrontabili*: lo stato è **liquido**

Nei due casi, liquido e gassoso, le particelle sono libere di muoversi, e in quel caso possono *fluire* poiché non sono vincolate ad una posizione fissa. Ecco, *chiameremo fluido una sostanza che sia nella fase liquida o gassosa*.

Ma c'è anche una osservazione da fare, la materia in fase gassosa o liquida, non è in grado di reggere uno sforzo di taglio quando è in equilibrio; cioè lo sforzo tangenziale che non tende a comprimere in blocco il volume di contenimento del fluido, ma tende solo a fare scorrere (fluire) parte di molecole su le restanti. Per esempio accostiamo un dito ad una superficie d'acqua e tentiamo di spingere le molecole in una qualsiasi direzione, che accade? Queste fluiscono attorno al dito o scorrono via e nessuna forza si trasmette verso i bordi del contenitore; per un solido invece avremmo esattamente il contrario!

Quindi possiamo anche dire che un *fluido è una sostanza che non regge uno sforzo di taglio quando è in equilibrio*.

E con questa definizione si capisce perché le forze su di un fluido che agiscono attraverso una superficie sono solo perpendicolari a quella superficie, e ...tanti altri problemini di idrostatica.