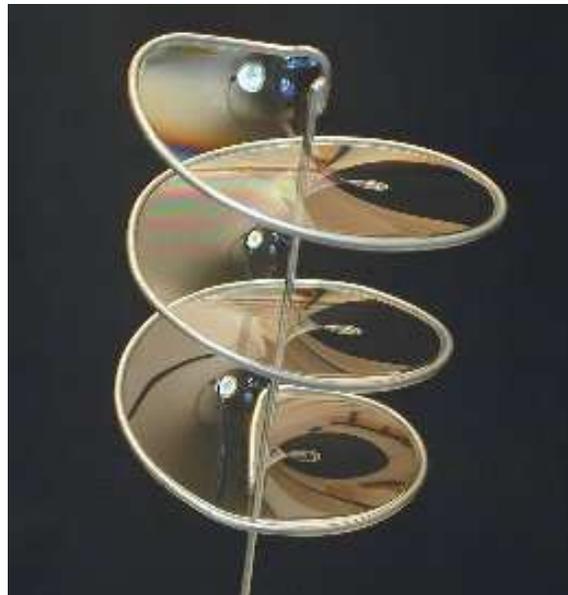




Meccanica dei Fluidi



Corso di Fisica per CQPS
AA 2008/09



Stati della materia (fasi)

- **solido** (atomi in posizione relativa quasi fissa; con struttura regolare, cristallo, o meno, vetro; vibrazioni intorno alla posizione di equilibrio; difficilmente compressibile)
- **fluidico** (non ha forma propria)
 - **liquido** (atomi/molecole liberi di muoversi, ma molto vicini fra loro; difficilmente compressibile)
 - **gas** (atomi/molecole liberi di muoversi, molto lontani fra loro, volume occupato dal gas quasi vuoto; facilmente compressibile)
- [plasma (gas di particelle cariche, atomi ionizzati, elettroni)]



Fluidi

- i fluidi sono pensati come sistemi continui
- non hanno forma propria e quindi non sostengono sforzi tangenziali (staticamente)
- per trattarli dovremo sostituire alle grandezze massa, lavoro, energia ... le corrispondenti **densità**

– **densità (di massa)** media

$$\rho = m/V$$

– pressione $p = \frac{F}{A} \left(\frac{\times s}{\times s} = \frac{L}{V} \right)$ (**densità di lavoro-energia**)

– **densità di energia potenziale**

$$\frac{mgh}{V} = \rho gh$$

– **densità di energia cinetica**

$$\frac{1/2 mv^2}{V} = \frac{1}{2} \rho v^2$$



Densità (di massa)

- **densità assoluta**

$$\rho = m/V$$

(massa divisa il V che occupa, media)

$$[\rho] = [M/V] = [ML^{-3}]$$

unità SI: kg/m^3

CGS: g/cm^3

$$1 \text{ g/cm}^3 = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

altre unità: $\text{kg/l} = \text{g/cm}^3$; $\text{g/l} = \text{kg/m}^3 \dots$ ($1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3 = 10^3 \text{ cm}^3$)

- **densità relativa**

$$d_r = \rho/\rho_{\text{rif}}$$

(numero puro)

(riferimento: H_2O distillata a 4°C , $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$)

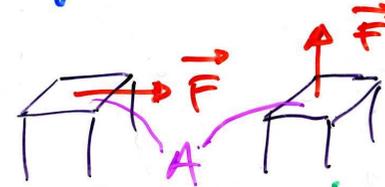
→ $\rho = d_r \rho_{\text{rif}} = d_r \rho_{\text{H}_2\text{O}}$



Sforzo e pressione

- solidi
(forma propria)

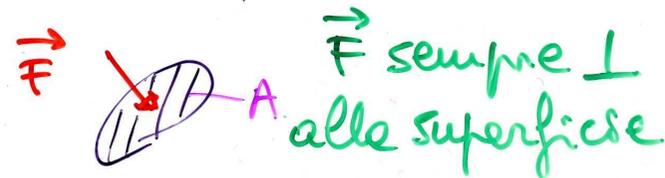
$$\frac{F}{A} \text{ sforzo - vettore}$$



dipende dall'orientazione

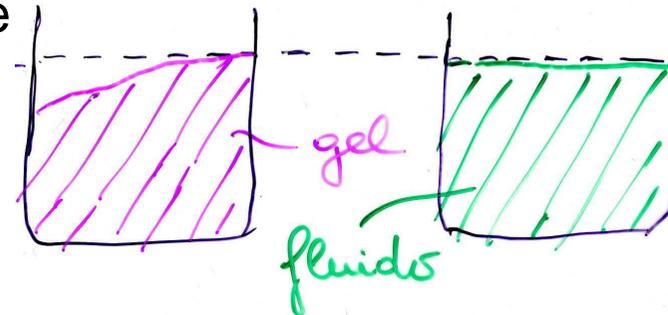
- fluidi
(senza forma propria)

$$p = \frac{F}{A} \text{ pressione - scalare}$$



- gel
(~ senza f.p.)

equipotenziale





Pressione

- la pressione (in un fluido) è una grandezza scalare, non dipende dall'orientazione della superficie su cui la forza è applicata – basta prendere **un punto di un fluido in quiete: risultante nulla** → $p = F/A$ è uguale in tutte le direzioni
- $[p] = [F/A] = [ML^{-1}T^{-2}]$
 - unità SI: N/m² ovvero pascal (Pa)
 - CGS: 1 dyne/cm² = 10⁻⁵ N/10⁻⁴ m² = 0.1 Pa (baria)
 - altre unità: 1 atm = 1.01325 10⁵ Pa
 - 1 bar = 10⁵ Pa
 - 1 millibar = 10² Pa
 - 1 mmHg = 1 torr = 1/760 atm = 1.33 10² Pa(vedi definizioni successive per atm, mmHg)



Pressione (2)

- altri esempi di pressione:
 - un blocco di massa m e peso $\mathbf{F (= P)} = m\mathbf{g}$ appoggiato sulla base di area A esercita una pressione p
$$p = F/A$$

(anche una persona esercita sul pavimento una pressione)
- se conosciamo la pressione p e l'area A possiamo calcolare la forza F corrispondente
$$F = pA$$

quindi per una data pressione la forza aumenta in modo \propto area



Fluidostatica



Liquidi e gas(*)

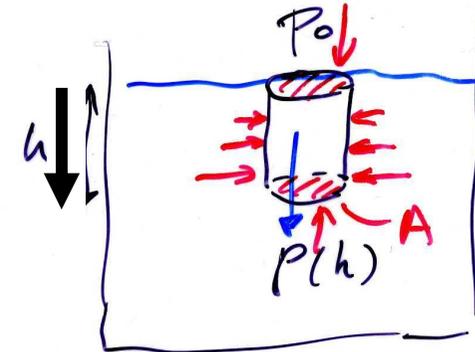
- nei fluidi lo sforzo ha carattere di pressione
- i liquidi sono poco compressibili (vedi Meccanica pag. 103, tabella dei moduli di elasticità): $B_{\text{liq}} \sim B_{\text{sol}}$ – cioè servono grandi sforzi per piccole variazioni di volume: $\Delta V/V = - (F/A)/B = -\Delta p/B$ (nei liquidi le molecole sono vicine ~ come nei solidi e $\rho \sim \text{cost.}$, indipendente da p)
- i gas invece sono molto compressibili, B_{gas} è molto piccolo (le molecole del gas sono lontane fra loro, il volume occupato è quasi vuoto e ρ dipende da p)

(*) facoltativo



La pressione nei liquidi: legge di Stevino

- **liquidi**: incompressibili $\rightarrow \rho \sim$ costante (\sim indipendente da p)
 - **gas**: compressibili $\rightarrow \rho$ varia
- consideriamo un cilindro di fluido (liquido) in equilibrio
 - lungo la verticale: $\Sigma_i F_i = 0 = p_0 A + \rho h A g - p(h) A$ (*)
dove $m = \rho V = \rho h A$ è la massa del fluido
e h è la profondità nel fluido (+va verso il basso)
 - le forze sul mantello si elidono a due a due per simmetria
- eliminando A nella (*) e risolvendo per $p(h)$ si ottiene la legge di Stevino in forma integrale



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

dove p_0 è la pressione sulla superficie superiore (se è la sup. libera del liquido, $p_0 = p$ atmosf.): **p aumenta con h**



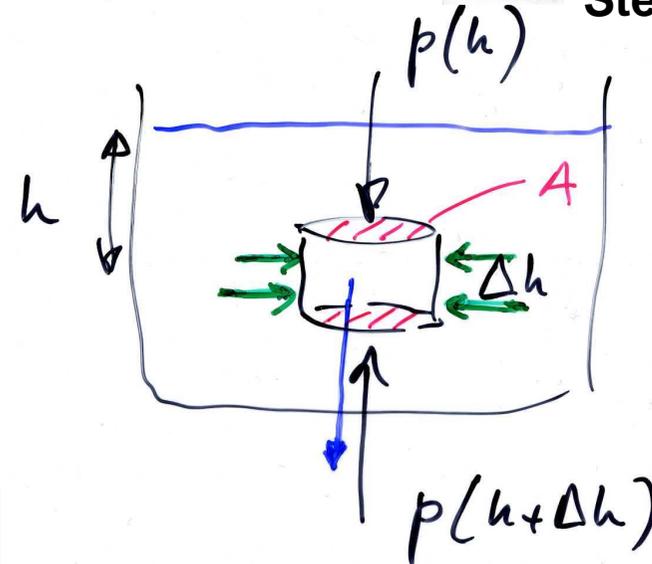
Legge di Stevino (2)(*)



Stevino

- in generale consideriamo un volumetto in equilibrio all'interno di un fluido ($\sum_i \mathbf{F}_i = 0$)
 - f. orizzontali si elidono a 2 a 2
 - f. verticali

$$Ap(h+\Delta h) = Ap(h) + A\rho g\Delta h$$



- ossia

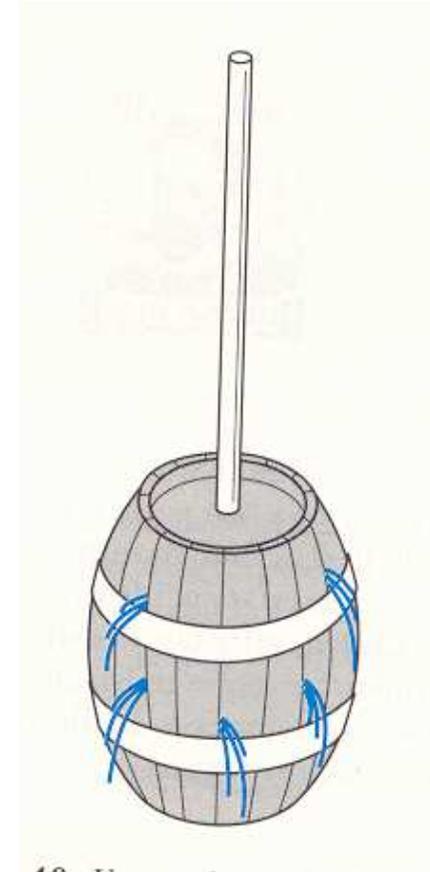
$$\Delta p = p(h+\Delta h) - p(h) = \rho g\Delta h$$

che, al limite per $\Delta h \rightarrow dh$, è la legge di Stevino in forma differenziale e vale anche per i gas (ad es. con $\rho_{\text{gas perfetto}} = M/(RT)\rho$, vedi più avanti)



Pressione idrostatica(*)

- pressione idrostatica: la pressione esercitata sulla base da una colonna di fluido in quiete ($\rho g \Delta h$)
- non dipende dalla forma del contenitore
- per un liquido dipende solo da Δh non dalla profondità nel fluido
- **non dipende dalla m del fluido** – ad es.1 un tubicino sufficientemente lungo inserito in una botte sigillata e riempita di liquido la fa scoppiare! – ad es.2 un cuscino d'aria alla p di 20 bar sostiene una colonna di Fe di uguale sezione ed alta 26 m

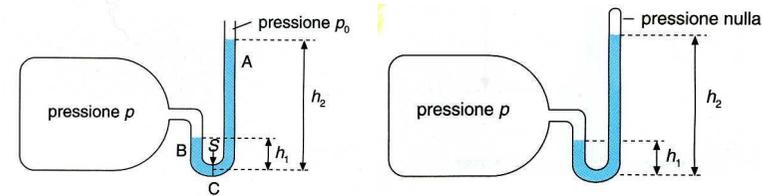


(*) facoltativo



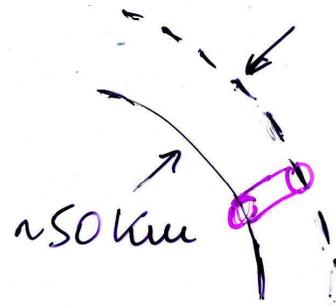
Misura della pressione, pressione atmosferica

- p si misura con manometri (ad H_2O , per piccole Δp , altrimenti a Hg), elettromanometri



- pressione atmosferica p_0 (cfr. esperienza di Torricelli, barometro: la pressione dell'aria è ~ quella di **76 cm di Hg**) – la “pressione normale” dell'aria è quella di 76.0 cm di Hg a 0 m s.l.m., 45° di latitudine e 0 °C, **$p_0 = 101325 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$**

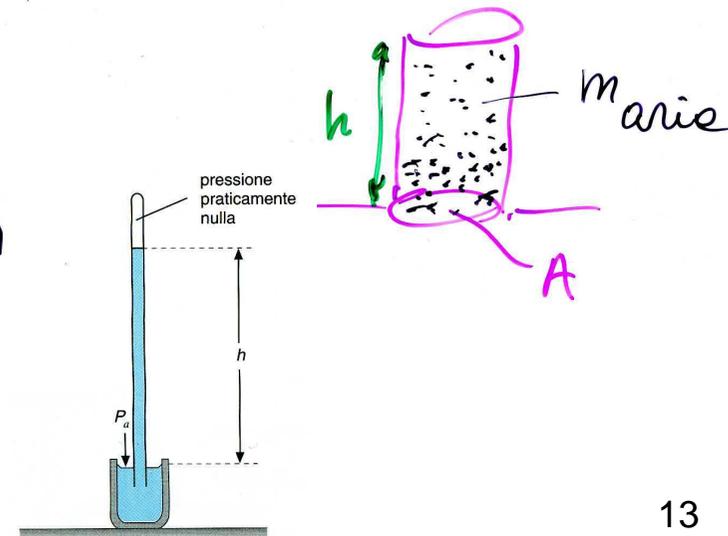
- l'atmosfera è spessa ~ 50 km



- la densità decresce con h

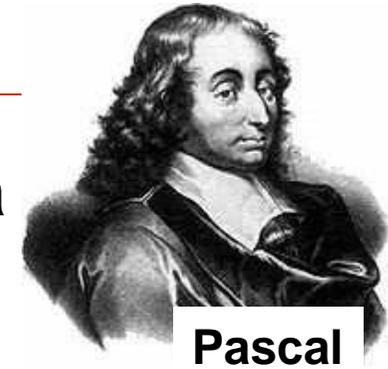
- $P_{\text{aria}}/A = m_{\text{aria}}g/A$

- $p \sim \frac{1}{2} p_0$ per $h \sim 5400 \text{ m}$





Legge di Pascal(*)

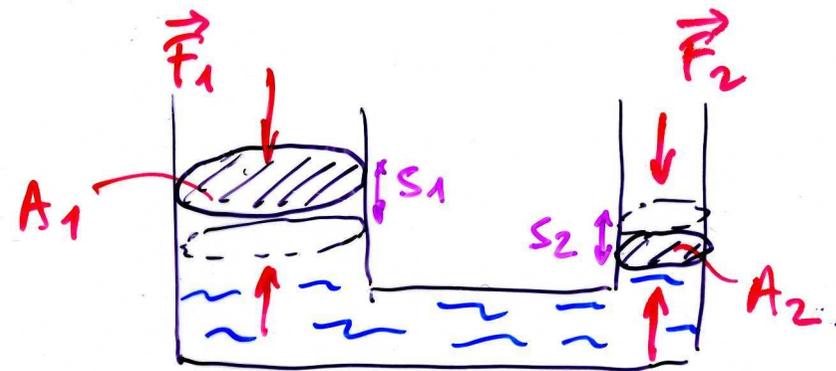


- dalla legge di Stevino, se la pressione esterna varia di $\Delta p_0 = p_0' - p_0$, varierà anche la pressione all'interno di un liquido di $\Delta p = \Delta p_0$
- in genere per un fluido incompressibile una variazione di p esterna si trasmette inalterata a tutto il fluido (“principio” di Pascal)
- ad es. pressa o torchio idraulico

$$\Delta p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$F_1 = F_2 \frac{A_1}{A_2} > F_2$$

(*) facoltativo



(ma il lavoro è: $F_1 s_1 = F_2 s_2$!)

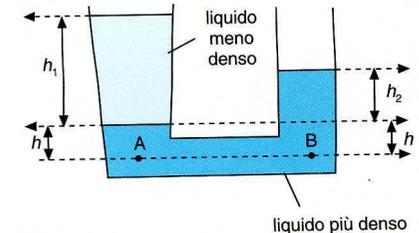


Altre conseguenze della legge di Stevino(*)

- es. 1 due fluidi immiscibili con $\rho_1 \neq \rho_2$ in recipienti comunicanti: sia h_1 l'altezza del meno denso rispetto alla sup. di separazione e h_2 quella del più denso, si avrà

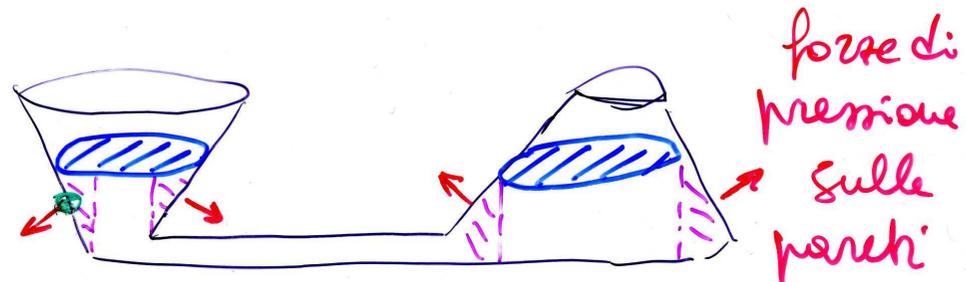
$$p_0 + \rho_1 g h_1 = p_0 + \rho_2 g h_2; \quad \rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$$

$$h_1/h_2 = \rho_2/\rho_1$$



- es. 2 “paradosso idrostatico”: p dipende solo dalla profondità h

- le pareti “sostengono” il fluido
- il fluido “sostiene” le pareti



(*) facoltativo



Spinta idrostatica

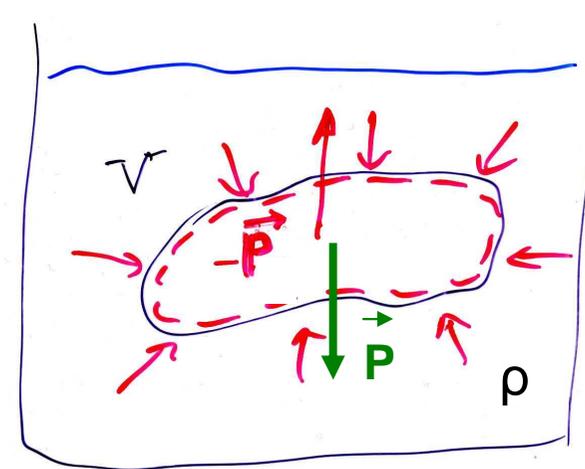
- prendiamo un volume V di fluido (liquido o gas) in quiete, il suo peso $\mathbf{P} = m\mathbf{g} = \rho V\mathbf{g}$ dovrà essere equilibrato da una f. $-\mathbf{P}$ dovuta al resto del fluido
- sostituiamo il fluido con un corpo di uguale V , esso subirà quindi una spinta diretta verso l'alto

$$F_s = -\rho Vg$$

dovuta al fluido circostante (spinta idrostatica)

- sul corpo agisce quindi (ρ' densità del c.) una f. totale

$$F_{\text{ris}} = P + F_s = P - \rho Vg = \rho' Vg - \rho Vg = (\rho' - \rho)Vg$$



“Tipica” spinta idrostatica:
corpi parzialmente
immersi nel Mar Morto,
 $\rho \sim 1.24 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ (cfr.
con acqua di mare aperto,
 $\rho \sim 1.02\text{-}1.03 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)





Spinta idrostatica (2)

- se il c. è immerso solo parzialmente, $V' = fV$, si avrà

$$F_{\text{ris}} = P - \rho V'g = \rho'Vg - \rho fVg = (\rho' - f\rho)Vg$$

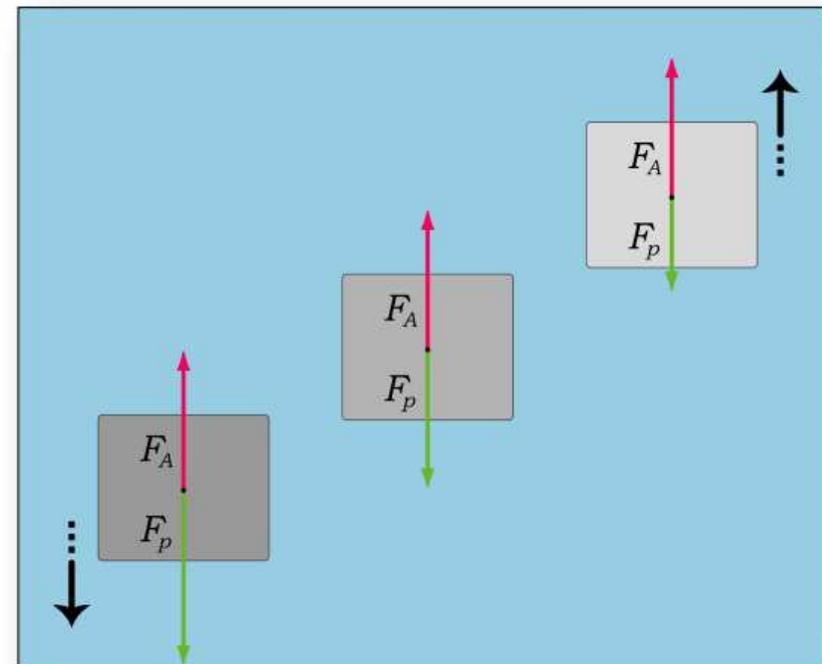
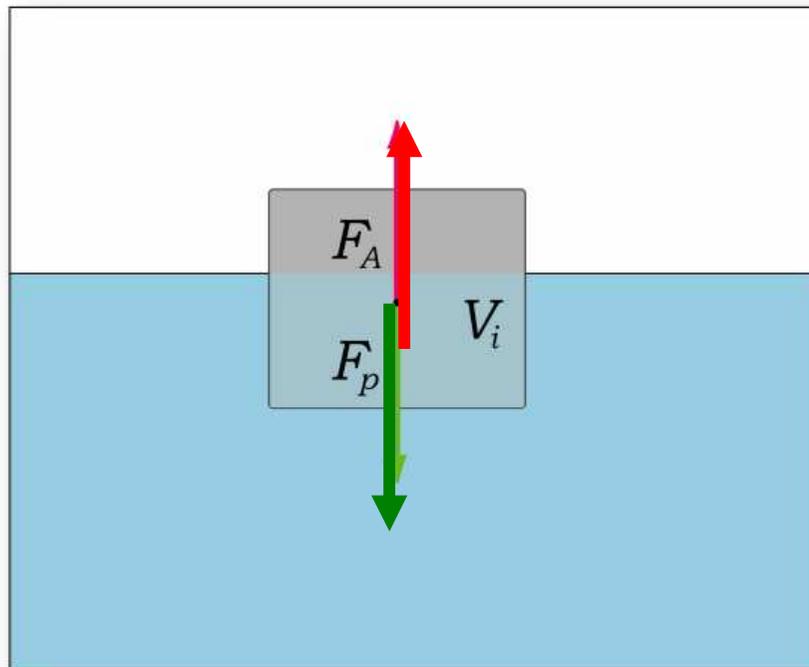
con $0 < f \leq 1$

-  un corpo, immerso anche parzialmente in un fluido, è soggetto ad una spinta uguale e contraria al peso del fluido spostato – si dimostra in modo alternativo considerando le f. di pressione su un c. di geometria semplice, ad es. cilindro verticale (si usa la legge di Stevino)
- c. totalm. immerso: se $F_{\text{ris}} > (<, =) 0$, il c. andrà a fondo (salirà a galla, sarà in equilibrio indifferente)
- c. parzialm. immerso: se $F_{\text{ris}} = 0$ il c. galleggia
 $f = V'/V = \rho'/\rho$



Spinta idrostatica (3)

- FP (P) è applicata nel baricentro del corpo, FA (FS) in quello della parte immersa (centro di spinta)



- se il corpo è omogeneo e totalmente immerso, i due punti coincidono

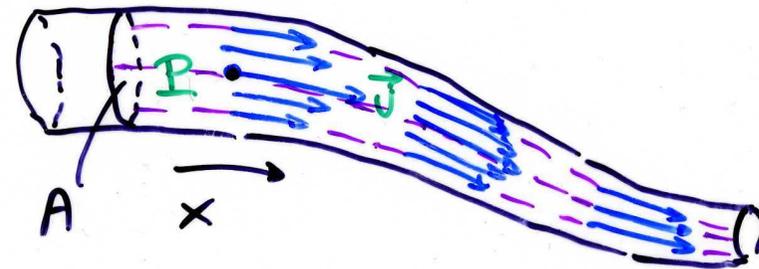


Dinamica dei fluidi



Moto stazionario

- Particelle di fluido: in generale si ha un campo di velocità $\mathbf{v} = \mathbf{v}(P, t)$ – se il moto è stazionario $\mathbf{v} = \mathbf{v}(P)$ non varia con t



- Linee di corrente: traiettorie descritte dalle particelle fluide (in P \mathbf{v} è tangente alla l.d.c.)
- Moto laminare: le l.d.c. non si intersecano (linee o strati o filetti “paralleli”)
- Portata: $Q(x) = A(x)v(x)$ (in volume)



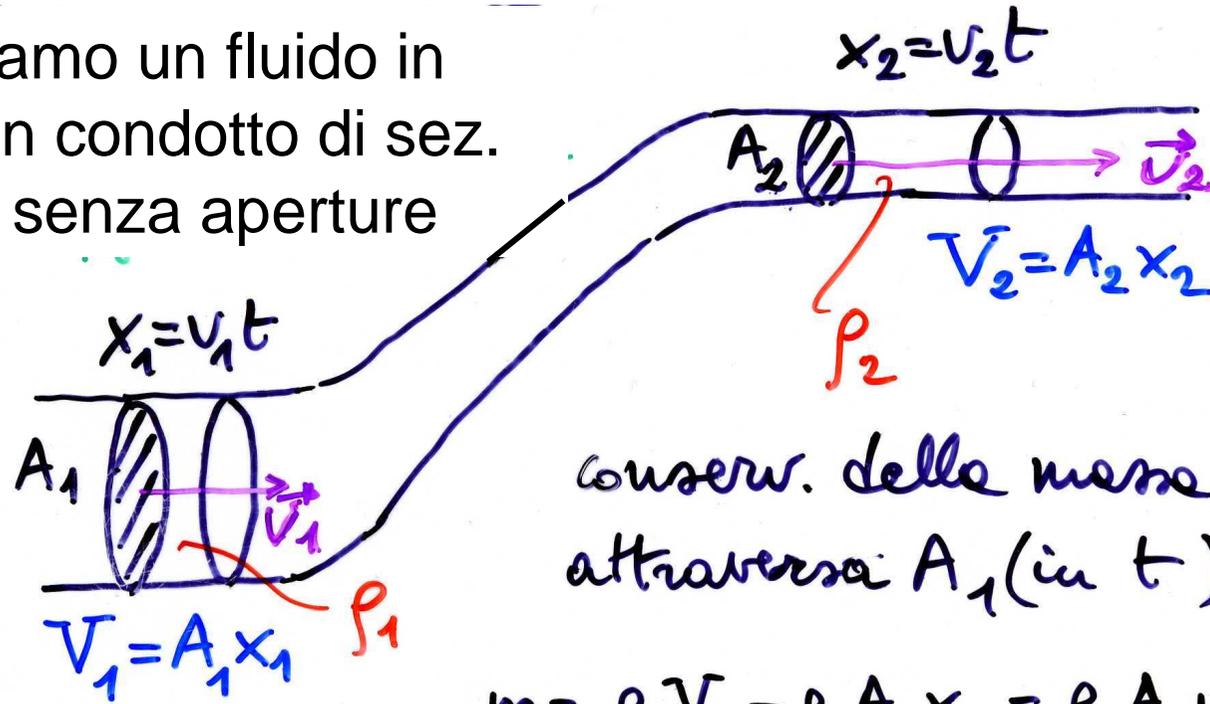
Fluido ideale o perfetto

- per definire un f. ideale o perfetto sono necessarie **due** condizioni e da queste si ottengono **due** leggi
 1. **incompressibilità** → **conservazione della portata** (ad es. i liquidi sono poco compressibili)
 2. **assenza di viscosità (attrito interno)** → **teorema di Bernoulli, cons. en. meccanica applicata ai f.** (vale per molti liquidi; per i gas se $v < v_{\text{suono}}$ nel gas; si può usare in prima approssimazione anche per f. viscosi)



Equazione di continuità(*)

consideriamo un fluido in moto in un condotto di sez. variabile, senza aperture



conserv. della massa \Rightarrow
attraversa A_1 (in t):

$$m = \rho_1 V_1 = \rho_1 A_1 x_1 = \rho_1 A_1 v_1 t$$

attraversa A_2 : stessa $m = \rho_2 V_2 = \rho_2 A_2 x_2 = \rho_2 A_2 v_2 t$

$$\Rightarrow \boxed{\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2} \quad \text{eq. continuit\`a}$$



Conservazione della portata

- se il f. è incomprimibile ($\rho = \text{cost}$) l'eq. precedente diviene

(m/t =) $\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2$ ossia

$$A_2 v_2 = A_1 v_1 \quad (\text{conservazione della portata in volume})$$

- **fluido non-viscoso** e incompressibile (ideale)

$$Q = Av = \text{cost}$$

v è la stessa in tutti i punti di A (niente attrito)

- **fluido viscoso** e incompressibile

$$Q = A\underline{v} = \text{cost}$$

$\underline{v} = Q/A$ dove la media delle v . è sulla sezione A

- in ogni caso, se A cresce, v (o \underline{v}) diminuisce e viceversa

$$v_2 = v_1 A_1 / A_2$$

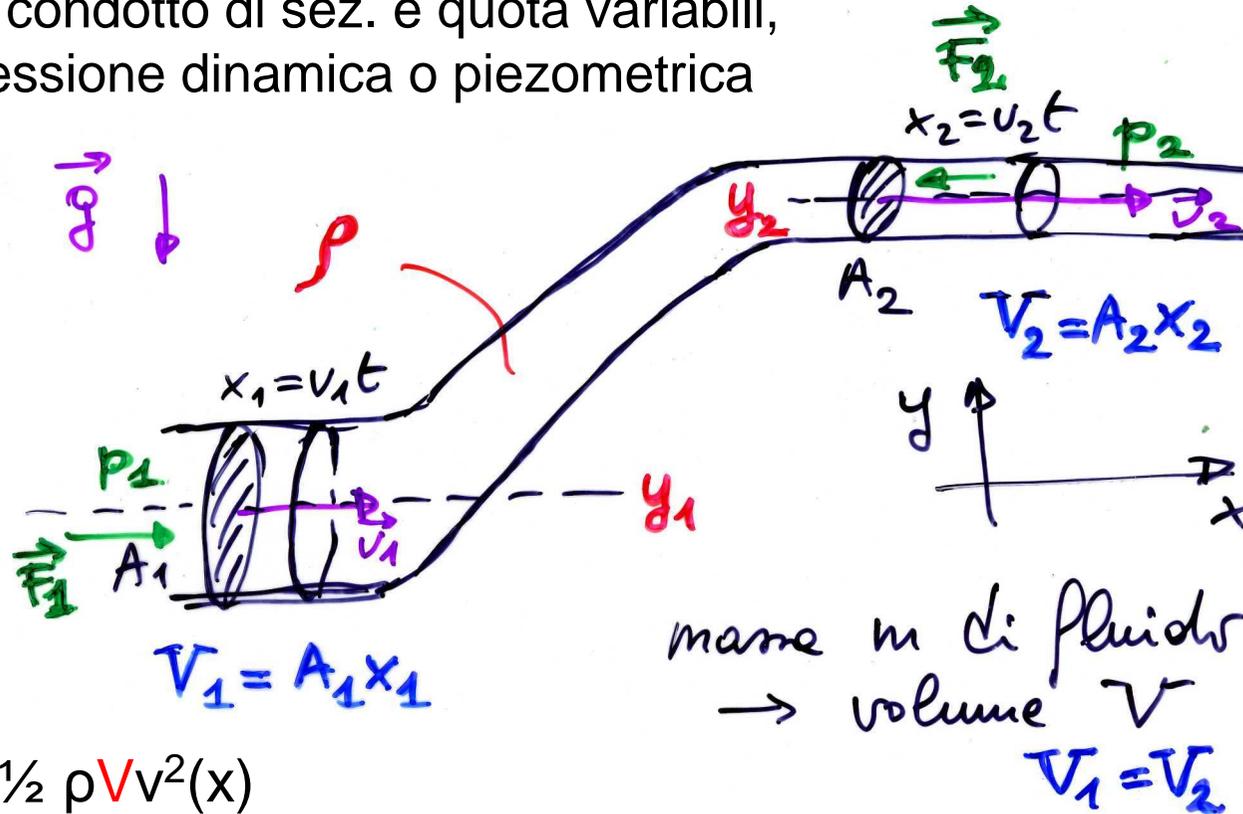


Teorema di Bernoulli(*)



Daniel Bernoulli
1700-82

f. ideale, condotto di sez. e quota variabili,
p è la pressione dinamica o piezometrica



$$K = \frac{1}{2} \rho V v^2(x)$$

$$W(y) = \rho V g y$$

$$\mathcal{L}_p = p_1 A_1 x_1 - p_2 A_2 x_2 = (p_1 - p_2) V \quad (\text{fluido})$$

(*) senza dimostrazione



Teorema di Bernoulli (2)

- usiamo il teorema dell'en. cinetica

$\frac{1}{2}\rho V(v_2^2 - v_1^2) = \rho Vg(y_1 - y_2) + (p_1 - p_2)V$ ottenendo la cons. dell'en. meccanica applicata ad un f.

- semplificando il V e riarrangiando

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

teorema di Bernoulli: la somma della pressione dinamica o piezometrica, della densità di en. potenziale (pressione di gravità) e della densità di en. cinetica (pressione cinetica) è costante

- se il liquido è fermo manca il termine cinetico e si ritrova la legge di Stevino, $p_1 + \rho g y_1 = p_2 + \rho g y_2$ ossia

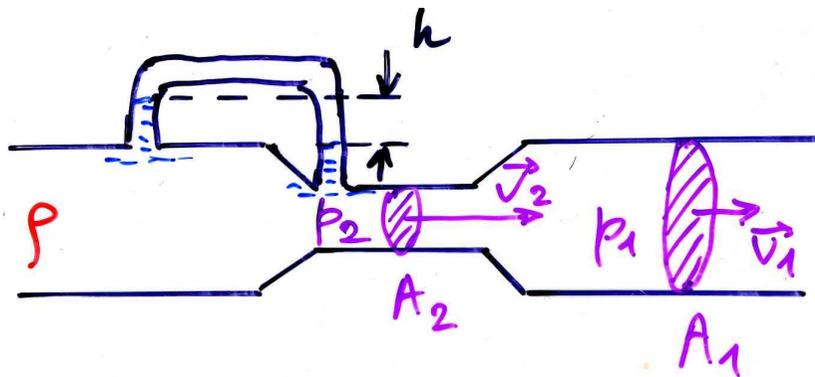
$$p_2 = p_1 + \rho g(y_1 - y_2)$$



Applicazioni: tubo di Venturi



- tubo orizzontale: $y_1 = y_2 \rightarrow p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{cost}$
- cons. della portata: $Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \rightarrow v_2 = v_1 A_1 / A_2 > v_1$
- eq. di Bernoulli: $p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$



nella strozzatura v cresce ($Q=\text{cost}$)
e p diminuisce ($E_0/V=\text{cost}$)

il manometro usa il fluido
stesso come f. manometrico

$$p_1 - p_2 = \rho g h$$

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2}\rho v_1^2 (A_1^2 / A_2^2 - 1) > 0$$

che si può risolvere per $v_1^2 \rightarrow$ misura della velocità del f.



Altre applicazioni delle leggi dei fluidi

- **aneurisma**

$$A' > A \rightarrow v' < v$$

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

$$\rightarrow p' > p$$

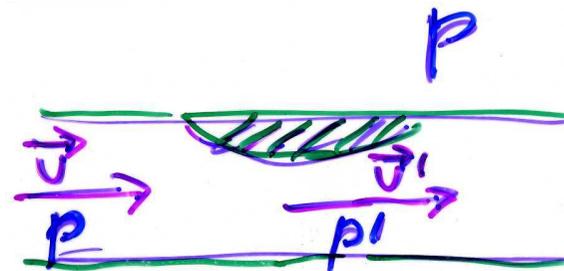
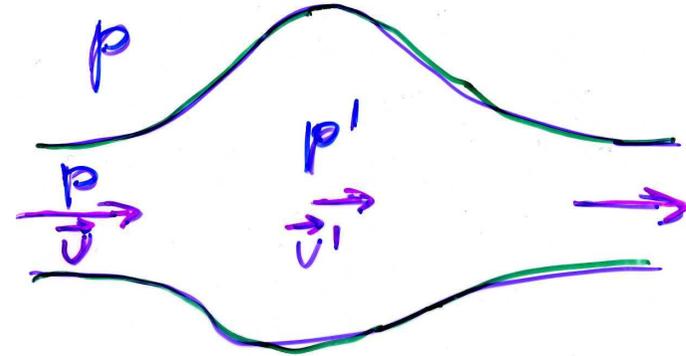
$p' - p > 0$ tende a dilatare
ulteriormente il vaso

- **stenosi** (anche placche
aterosclerotiche, forma
comune di arteriosclerosi)

$$A' < A \rightarrow v' > v$$

$$\rightarrow p' < p$$

$p - p' > 0$ tende a chiudere
ulteriormente il vaso



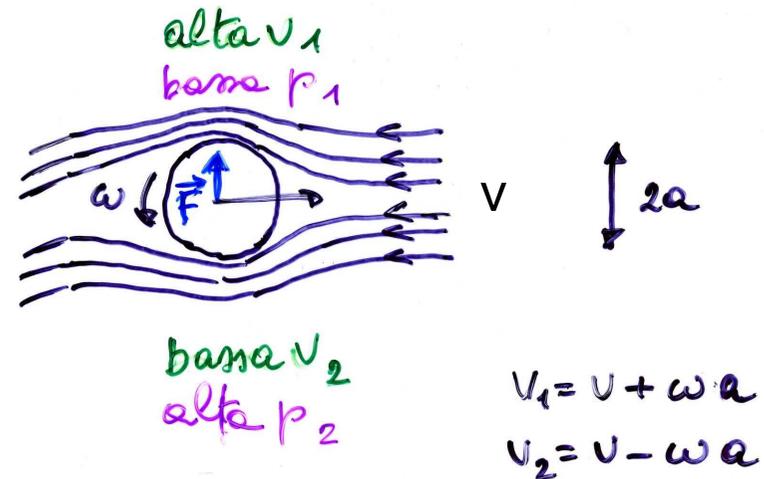
la stenosi si può
curare inserendo
uno stent: $A' = A$



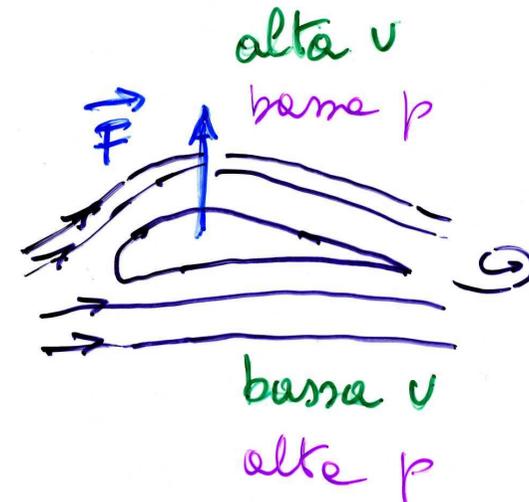
Altre applicazioni di $\frac{1}{2}\rho v^2 + p = \text{cost}^*$

- effetto Magnus, la rotazione della pallina varia la v . del fluido intorno

$$v_1 > v_2 \rightarrow p_1 < p_2 \rightarrow \mathbf{F}$$



- portanza di un'ala: il profilo è tale che in alto la v . è maggiore (percorso del f. più lungo in tempo uguale)

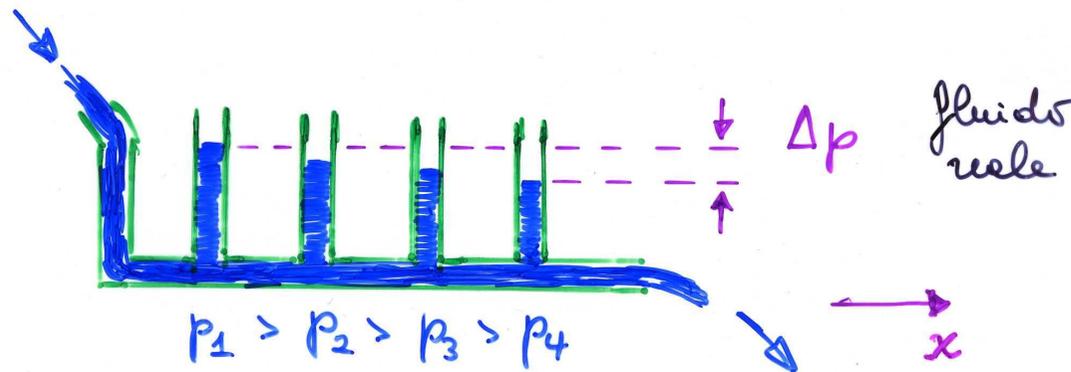


(*) facoltativo



Fluidi reali, viscosità

- se ho un f. in un condotto orizzontale di sez. cost., per l'eq. di Bernoulli la pressione dinamica deve essere costante, invece si osserva che per un f. reale la quota piezometrica decresce → una perdita di en. meccanica



- il gradiente $\Delta p/\Delta x$ misura il tasso di perdita di en. meccanica ($v=\text{cost}$, la pressione cinetica è cost; $y=\text{cost}$, la pressione di gravità è cost)



Coefficiente di viscosità

- applichiamo \mathbf{F} ad una tavoletta sulla superficie di un f. reale: la reazione \mathbf{F}_a è dovuta agli attriti e a regime la tav. si muoverà con v cost. (invece di accelerare con \mathbf{F})

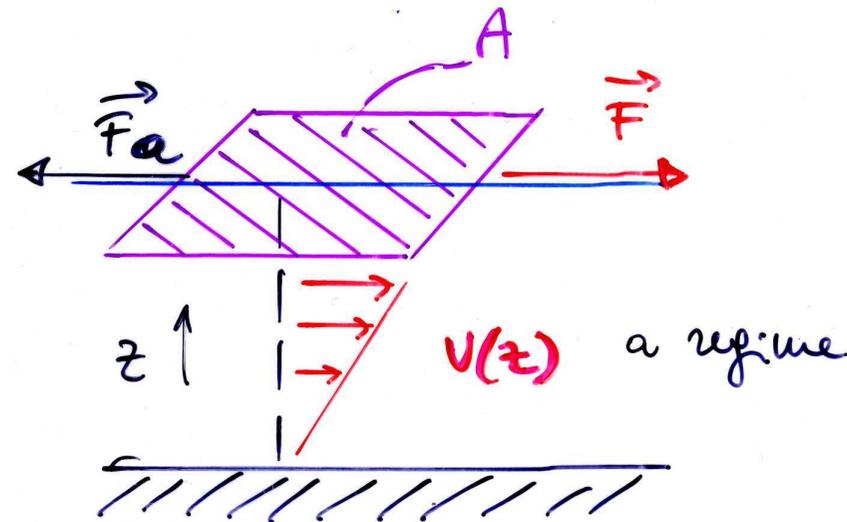
- il coefficiente di viscosità del f. η è definito da

$$F/A = \eta \Delta v / \Delta z$$

$$\begin{aligned} \text{con } [\eta] &= [FL/AV] = \\ &= [ML^{-1}T^{-1}] \end{aligned}$$

unità SI: Pa·s

$$\text{CGS: } 1 \text{ gcm}^{-1}\text{s}^{-1} = 1 \text{ P(oise)} = 10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

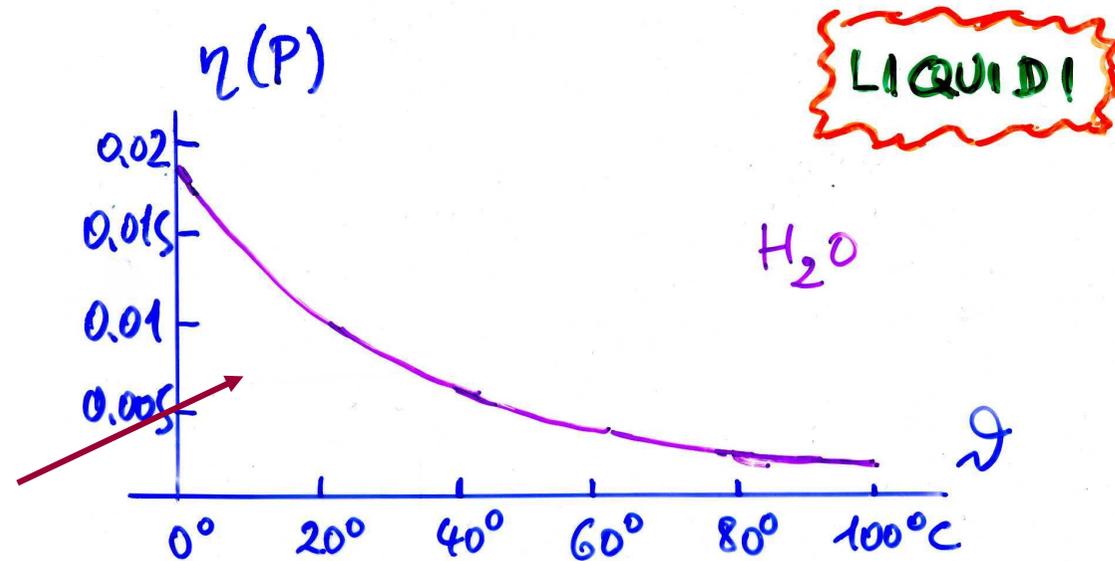




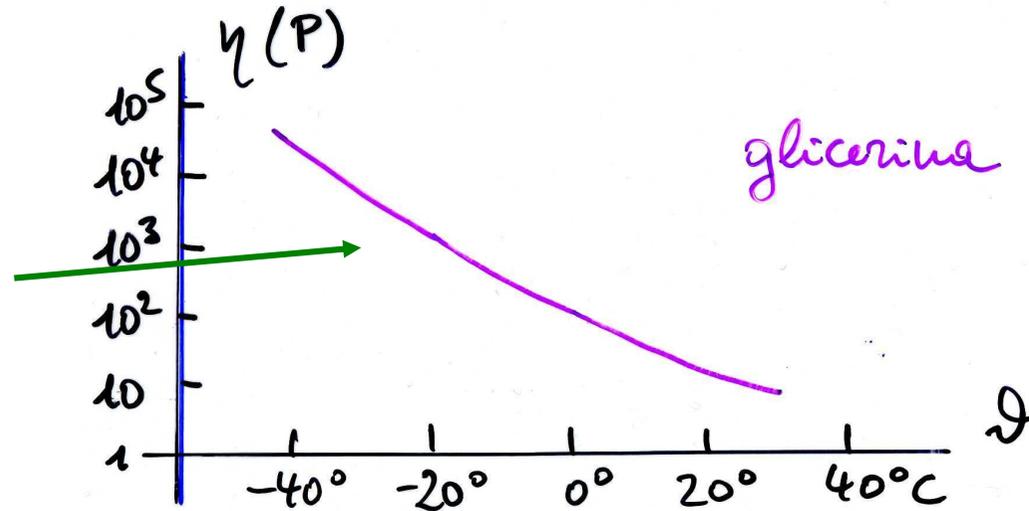
Viscosità dei liquidi

- dipende molto dalla temper.,
decrece con la temper.

poco viscosa



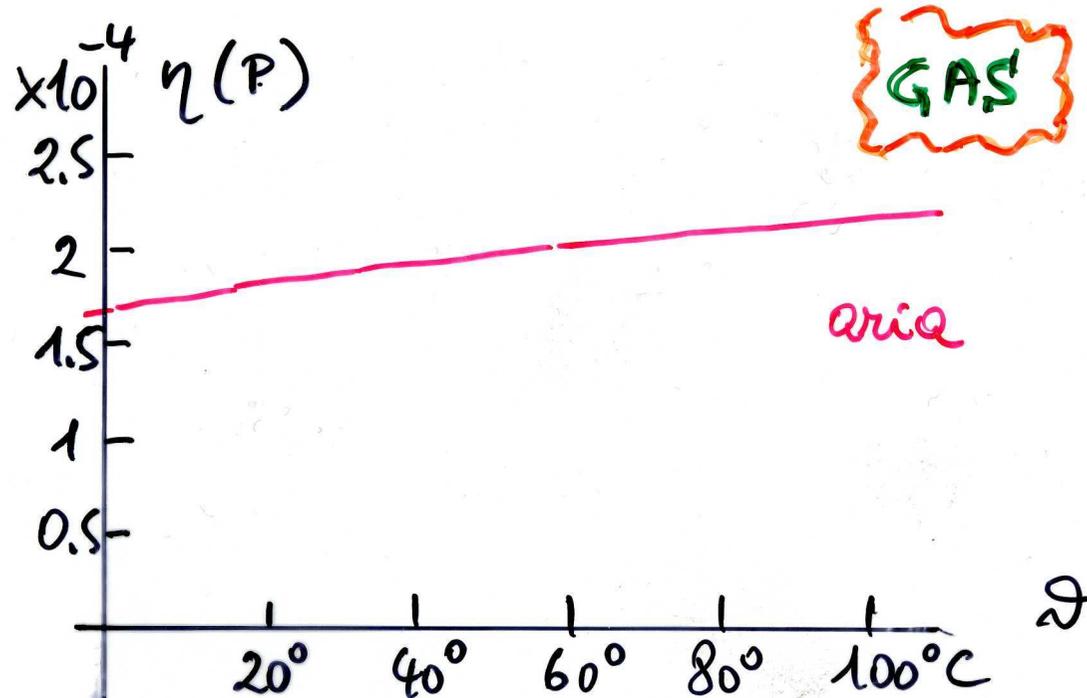
molto viscosa





Viscosità dei gas

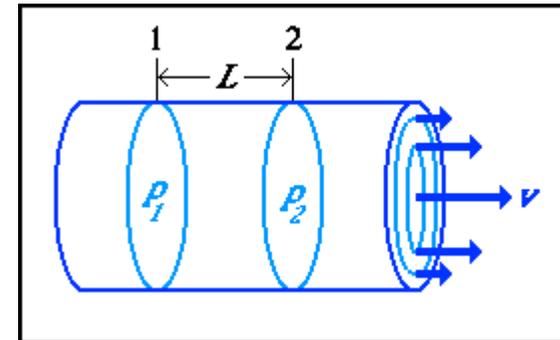
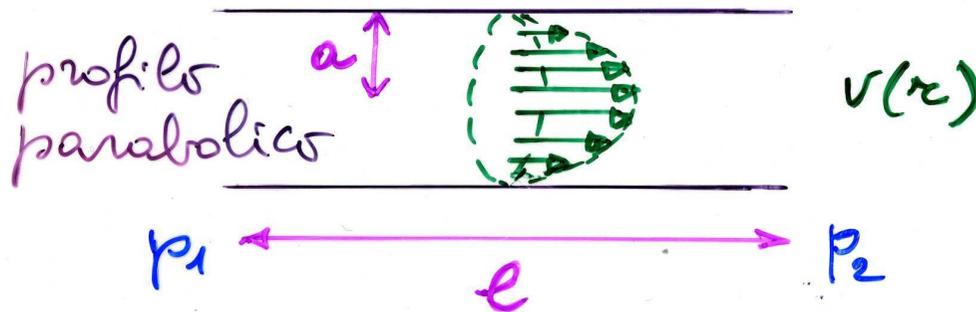
- la viscosità dei gas è molto debole e cresce lievemente con la temperatura





Scorrimento laminare, legge di Poiseuille

si può mostrare che se il moto è laminare, in un capillare il profilo delle velocità è parabolico con v max al centro



la portata è $\propto \Delta p/l$ (gradiente di pressione), a^4 , $1/\eta$

$$Q = A\bar{v} = \frac{\pi a^4}{8\eta} \frac{p_1 - p_2}{l}$$

legge di Poiseuille-Hagen

\bar{v} può essere ottenuta da $Q/(\pi a^2)$

un f. è newtoniano se $\eta = \text{cost} \forall p$, $Q \propto \Delta p/l$



Poiseuille



Legge di Poiseuille(2)

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

\mathcal{R} : ciò che si oppone al moto

il fluido viscoso si muove sotto l'azione di una differenza di pressione

$$= 1/\mathcal{R}$$

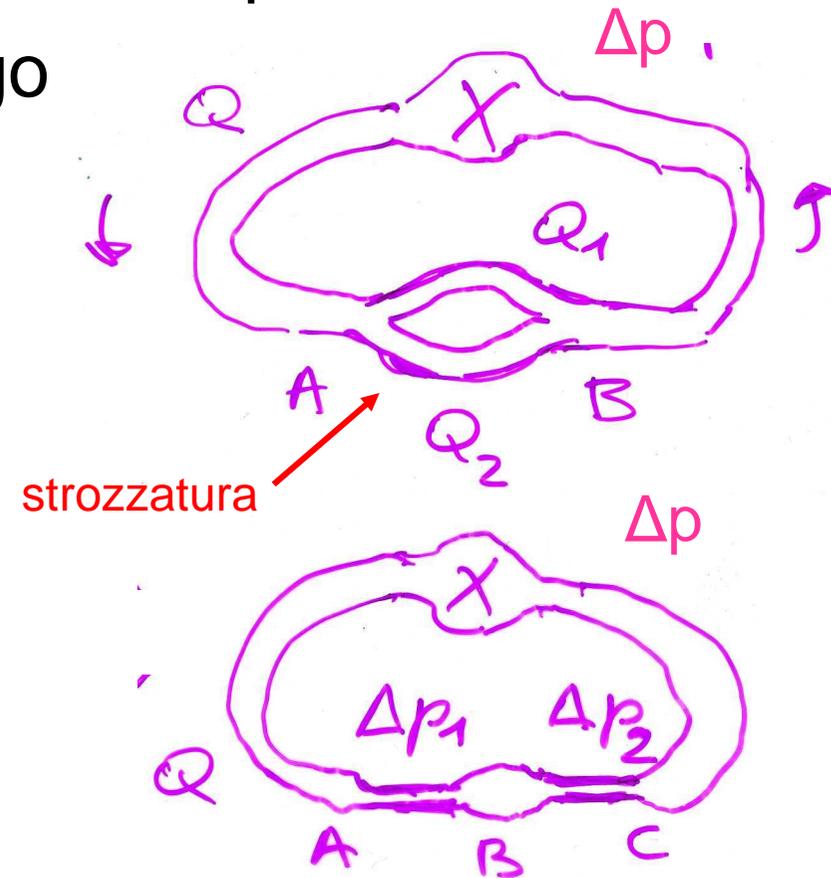
$$Q = (p_1 - p_2)/\mathcal{R} = \Delta p/\mathcal{R}$$

confronta con $I = (V_1 - V_2)/R = \Delta V/R$
(correnti elettriche, vedi più avanti,
legge di Ohm, per R costante)



Applicazioni(*)

- per far scorrere un f. reale in un circuito occorrerà una pompa che fornisce la diff. di pressione
- il comportamento è analogo ai circuiti elettrici in parallelo ($Q=Q_1+Q_2$) ed in serie ($\mathcal{R}=\mathcal{R}_1+\mathcal{R}_2$) con $\mathcal{R} = 8\eta l/\pi a^4$ e $Q = \Delta p/\mathcal{R}$ (vedi circolazione del sangue, elettricità)



(*) facoltativo



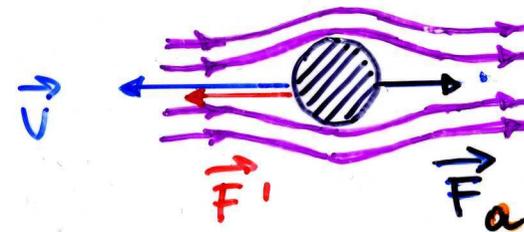
Moto di un corpo in un fluido, resistenza viscosa



- corpo che si muove sotto l'azione di una F' in un liquido viscoso (gravità, spinta idrostatica, elettrica etc.): al moto inizialmente accelerato si oppone una f. di attrito

$$F_a = k\eta v$$

forza di Stokes, dove k dipende dalla forma e l è una dimensione lineare



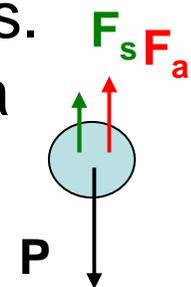
(il moto è relativo)

$2a$

caratteristica del c. (6π e raggio a per una sfera) – la legge di Stokes è valida per numeri Reynolds piccoli (vedi oltre)

- siccome F_a cresce con v al limite uguaglierà F' , per es. corpo sotto l'azione del peso e della spinta idrostatica

$$P + F_s + F_a = 0$$





Sedimentazione

- all'equilibrio (dinamico) F_a uguaglia la differenza $P-F_s$ ed il corpo si muove con v costante (**I princ. dinamica**)
- se $m = \rho'V$, $P = \rho'Vg$ e $F_s = \rho Vg$

$$k\eta v = \rho'Vg - \rho Vg$$

$$v = V(\rho' - \rho)g / k\eta$$

$$[= 2a^2(\rho' - \rho)g / 9\eta \text{ per un c. sferico}]$$

è la **velocità limite** o di **sedimentazione** con cui il c. va a fondo (se $\rho' - \rho > 0$): frazionamento di un sistema costituito da corpuscoli diversi in sospensione, si rimuove via via il sedimento

- ad es. velocità di eritro-sedimentazione v.e.s. → stati patologici (v di sedimentazione dei globuli rossi)
- svantaggio: g fissa, t lunghi, ad es. $a = 1\mu\text{m}$, $\rho' = 1050\text{kg/m}^3$ in H_2O a $20\text{ }^\circ\text{C}$, $v \sim 10^{-5}\text{cm/s}$ → $t \sim 10^5\text{s}$ per percorrere 1cm !



Centrifugazione

- per aumentare v , occorre sostituire P con una $f.$ più grande: **si usa $m\omega^2R$ cui è soggetto un $c.$ che si muova su una traiettoria circolare ($f.$ centripeta)**

- $F_c = \rho'V\omega^2R$

in parte fornita dal fluido in rotazione: $p = p_0 + \rho gh + \rho\omega^2R^2/2$ (invece di $p = p_0 + \rho gh$, in quiete) – p varia in funzione di R , distanza dall'asse di rotazione: il $c.$ sente una $f.$ maggiore nei punti più lontani dall'asse, insufficiente a tenerlo su una circonf. di raggio R se $\rho' > \rho$, la $f.$ risultante è

$$F' = F_c - F_r = (\rho' - \rho)V\omega^2R$$

diretta verso l'esterno, dove F_r è la $f.$ radiale del fluido; al limite F' sarà equilibrata dalla $f.$ di Stokes ed il $c.$ sedimenterà verso l'esterno (della provetta)



Centrifugazione (2)

- la v di sedimentazione è ora

$$v' = V(\rho' - \rho)\omega^2 R / k \ln \quad [= 2a^2(\rho' - \rho)\omega^2 R / 9\eta \text{ per un c. sferico}]$$

e si guadagna rispetto alla sedimentazione naturale

$$v'/v = \omega^2 R / g$$

ad es. $R=10\text{cm}$, 10k giri/min , $\omega=2\pi/T=2\pi v=1.05 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$,

$$\omega^2 R = 1.1 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2 \text{ e } v'/v = 1.1 \cdot 10^4$$

→ industria chimica/alimentare, medicina/biologia

con $\sim 100\text{k giri/min}$ (ultacentrifughe) si arriva fino a $\sim 10^6 \text{ g}$

→ separazione di corpuscoli (ad es. $a < 1\mu\text{m}$, virus, macromolecole)

- limitazioni: volumi provette piccoli $\sim 1\text{cm}^3$, blindaggio della centrifuga (ω), attriti → raffreddamento/vuoto etc.



Centrifuga(*)

- ad es.

Impiego fino a **22.600 giri/minuto** con valore di **g. preselezionabile** fino a **20.000**: preselezione dunque non della velocità di rotazione ma del valore di **g** che viene raggiunto e mantenuto costante indipendentemente dal tipo di rotore in uso, grazie alla possibilità di preimpostazione del diametro del rotore stesso.

Applicazioni speciali nei seguenti campi:

- ricerche sul cancro e sull'AIDS
- separazione di enzimi
- studi di ingegneria genetica e microbiologia
- precipitazione di batteri da colture
- recupero di piccole quantità di sostanza con la tecnica delle «hard pellets»

Rotore collocato in un alloggiamento in acciaio inossidabile, che rende possibile una semplice pulizia mentre permette la necessaria sicurezza.

Possibilità di preimpostare il tempo nel quale viene raggiunto il valore di **g** desiderato; un particolare sistema elettronico provvede a far sì che il tempo di decelerazione al termine del trattamento sia uguale a quello di accelerazione iniziale. Questo contribuisce a rendere i trattamenti di centrifugazione estremamente ripetibili.

Vasta gamma di rotori disponibili per provette di capacità compresa tra i 10 e gli 0.25 ml, per un massimo di 48 posti. Importanti i rotori tipo «slide» caratterizzati dall'inserzione orizzontale di provette provviste di tappo; possono accogliere provette di capacità diversa.

Sistema di refrigerazione di elevata qualità, per un lungo funzionamento senza operazioni di manutenzione, permette di selezionare la temperatura tra i **-2°** e i **+15°**, a seconda delle esigenze applicative.

Timer elettronico, preimpostabile tra i **10 secondi** e i **30 minuti**, fornisce istante per istante l'indicazione del tempo mancante al termine del trattamento di centrifugazione.

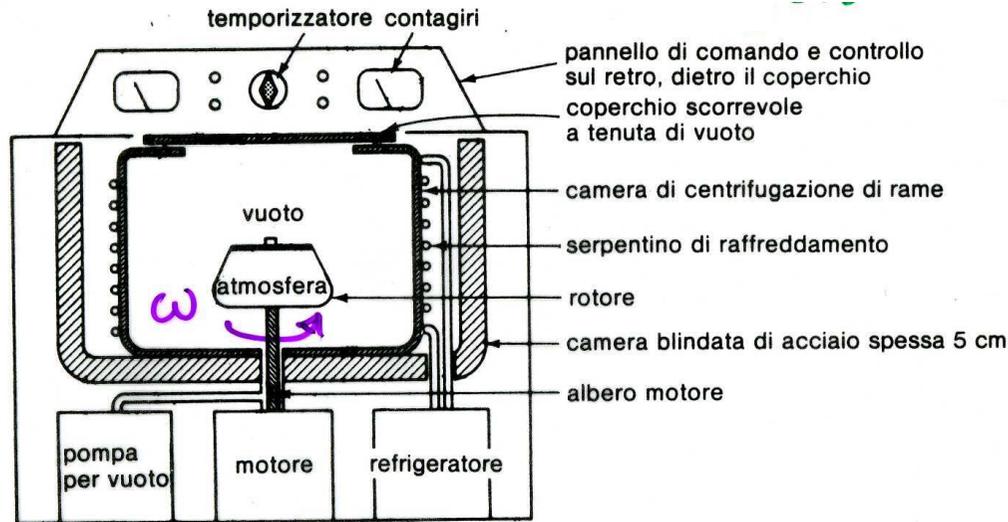
(*) solo la figura !



Centrifuga (2)

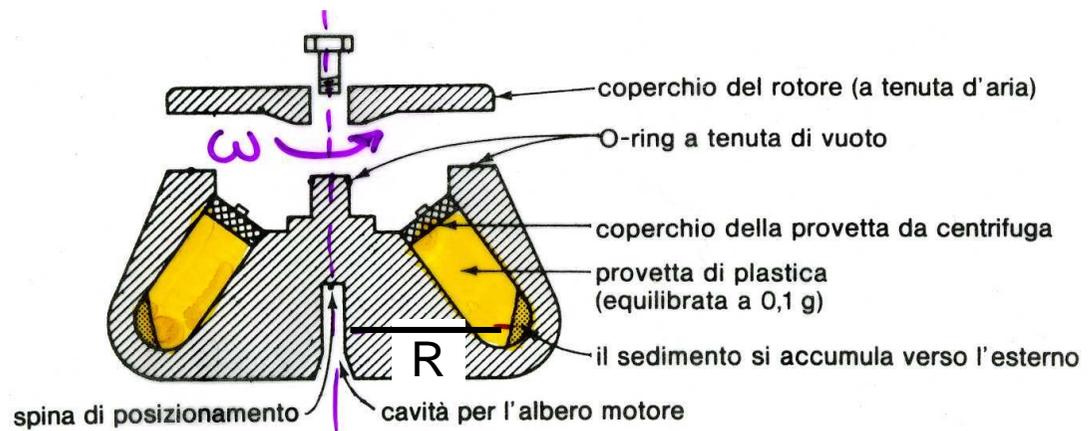


T. Svedberg



per 30k giri/min
 $\omega^2 R = 1.5 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-2}$
 $m = 1 \text{ g}$ pesa 1500 N !

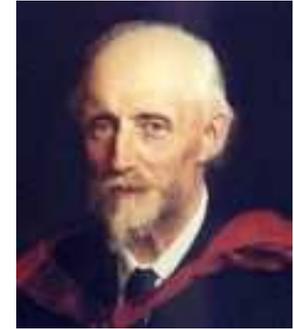
Volume utile provetta
limitato $\propto (1/\omega)^2$





Regimi laminare e turbolento: n.ro di Reynolds

- per v piccola si ha scorrimento laminare del fluido in un tubo di flusso o relativamente ad un corpo
- per v grande lo scorrimento diviene turbolento con presenza di scia e vortici
- si costruisce una lunghezza tipica del fluido in moto: $\eta/\rho v$ dove ρ , η sono del fluido, v è la velocità del corpo o quella media del fluido (con l'analisi dimensionale)
- il rapporto fra l , una lunghezza tipica del corpo o del condotto, e questa lunghezza è il numero di Reynolds



$$N_R = \rho v l / \eta \quad (\text{adimensionale})$$

che permette di distinguere i due regimi: N_R piccolo (grande) corrisponde al regime laminare (turbolento), con limiti che sono diversi nei due casi



Numero di Reynolds (2)

- per un corpo in moto nel fluido con N_R piccolo la f. viscosa è data da $k\eta l v$, forza di Stokes; se il c. è sferico $l=2a$ e $N_R < 0.4$ corrisponde al regime laminare, mentre $N_R > 2000$ implica regime turbolento, con una f. resistente $\propto v^2$; per valori intermedi si ha instabilità
- per un fluido che scorre in un condotto di sez. circolare $l=2a$, diametro del c., con velocità media \underline{v} ,

$$N_R = 2\rho \underline{v} a / \eta$$

e si ha moto laminare per $N_R < 1000$, mentre il flusso diviene vorticoso per $N_R > 3000$; il valore critico è ~ 2300 , ma per valori fra 1000 e 3000 i risultati sperimentali sono instabili



Numero di Reynolds (3)(*)

- N_R può essere visto come rapporto fra f. inerziali e viscosi nel fluido: quando prevale la f. viscosa il regime è laminare e viceversa

- il moto è stazionario, $v = \text{cost}$; m/t non è altro che ρQ e

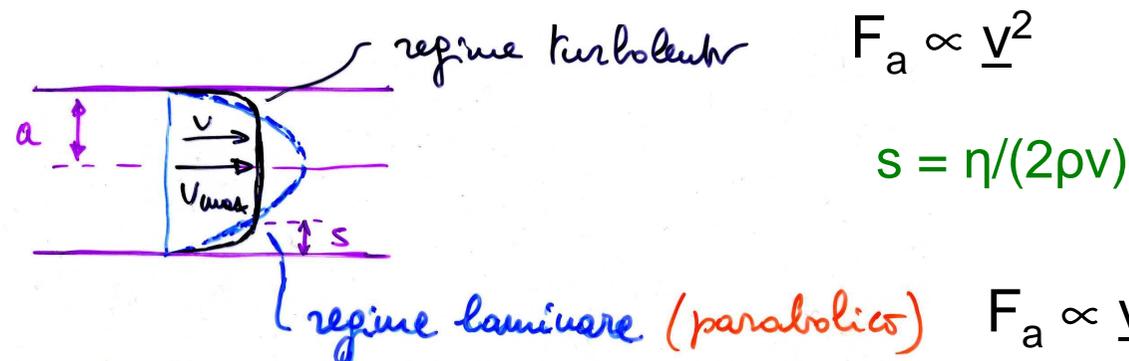
$$F_i = \Delta(mv)/\Delta t = v\Delta m/\Delta t \approx v(\rho Av) = \rho Av^2 \quad (\text{forza inerziale})$$

- usando la def. di viscosità (o usando Poiseuille)

$$F_v \approx A'\eta v/l \quad (\text{forza viscosa})$$

con l lunghezza tipica

- $F_i/F_v \approx \rho Av^2/(A'\eta v/l) \approx \rho vl/\eta = N_R$



(*) facoltativo



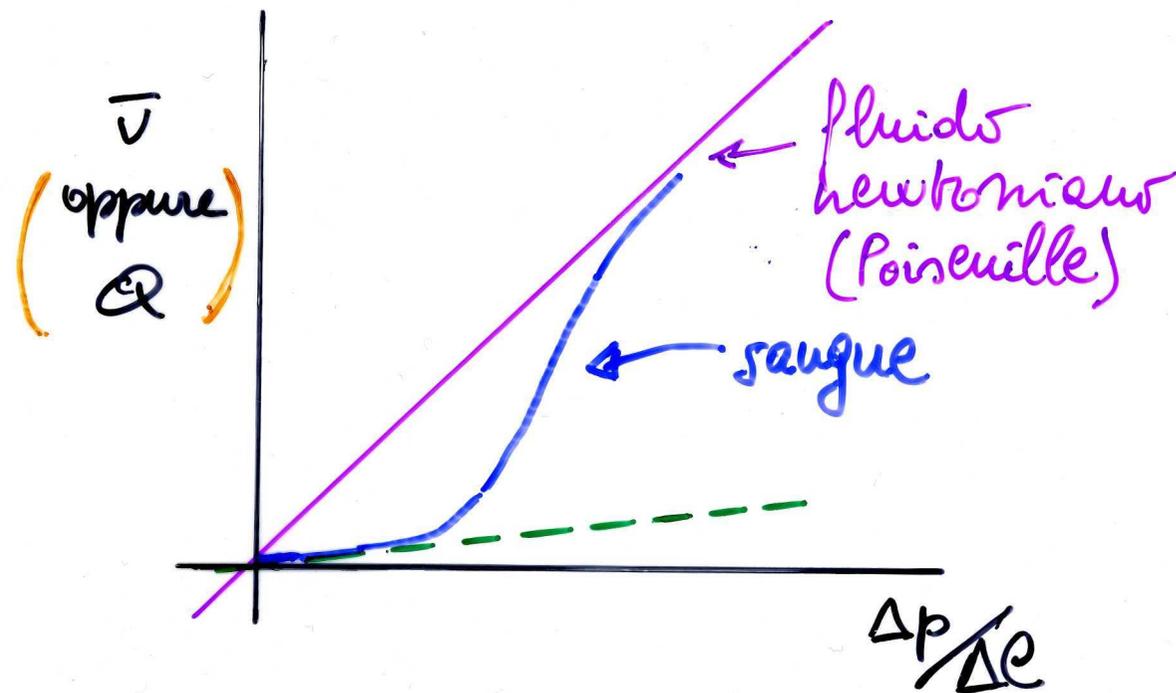
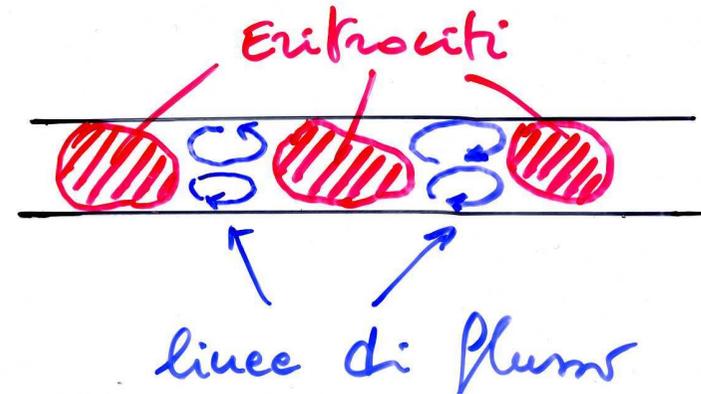
Un liquido non newtoniano: il sangue

- il s. è un liquido complesso, soluzione acquosa di elettroliti e non elettroliti, globuli rossi ($8 \mu\text{m}$ \emptyset , $2 \mu\text{m}$ spessore) e bianchi in sospensione, particelle colloidali (proteine)
- η decresce poco all'aumentare degli elettroliti, aumenta molto all'aumentare di corpuscoli e part. colloidali
- a $\theta = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $\eta_{\text{siero}} \sim 1 \text{ cP}$; $\eta_{\text{sangue}} \sim 4 \text{ cP}$
(cfr $\eta_{\text{H}_2\text{O}} = 0.7 \text{ cP}$)
- η decresce con θ che aumenta (febbre): $\sim 3\%/ \text{grado} \rightarrow$ facilita la circolazione
- disordini circolatori e ipertensione: $\eta \nearrow$, aumenta $\mathcal{L}_{\text{cuore}}$
- situazioni patologiche: varia $\eta \rightarrow$ VES+conteg.corpusc.



Viscosità del sangue

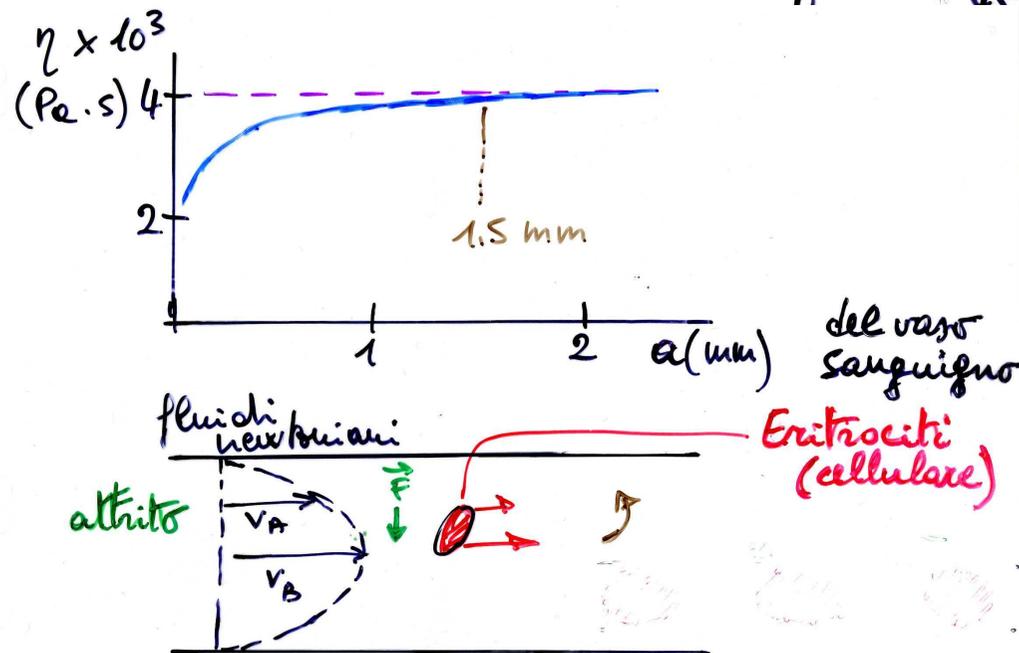
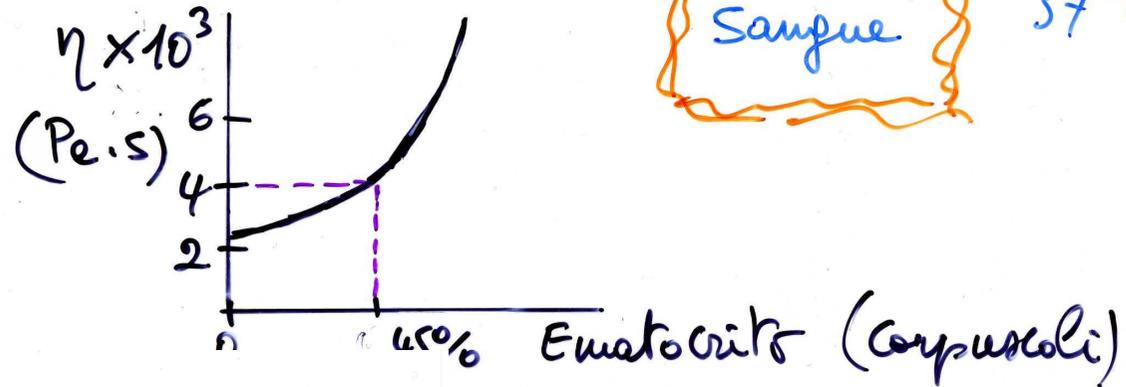
- gli eritrociti passano appena nei capillari, fino a $\sim 8 \mu\text{m}$ \emptyset
- η varia al variare del gradiente di pressione a differenza di un fl. newton.





Viscosità del sangue (2)

Sangue 37°C



l'allineamento dei corpuscoli giustifica il comportamento di η con la pressione



Pressione arteriosa

- i valori di p sono sempre relativi alla p . esterna
- in corrispondenza delle arterie del capo, torace e piedi (c,t,p): p è la stessa per una persona sdraiata, molto diversa se in piedi – trascurando la viscosità

$$p_c + \rho g y_c + \frac{1}{2} \rho v_c^2 = p_t + \rho g y_t + \frac{1}{2} \rho v_t^2 = p_p + \rho g y_p + \frac{1}{2} \rho v_p^2$$

i termini cinetici $\frac{1}{2} \rho v^2$ sono piccoli [$\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$, aorta, $v \sim 0.3 \text{ m/s}$, $\frac{1}{2} \rho v^2 \sim 47 \text{ Pa} \sim 0.5 \text{ mbar} \ll 150 \text{ mbar}$],

quindi

$$p_c + \rho g y_c = p_t + \rho g y_t = p_p + \rho g y_p$$

- se la persona è sdraiata $p_c \approx p_t \approx p_p$ ($y_c \approx y_t \approx y_p$)
- se la persona è in piedi interviene la p idrostatica

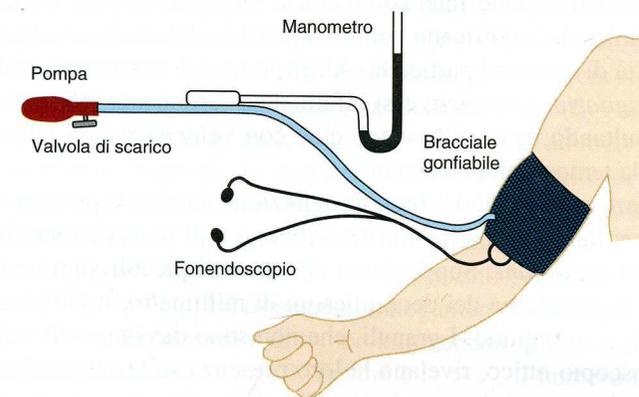
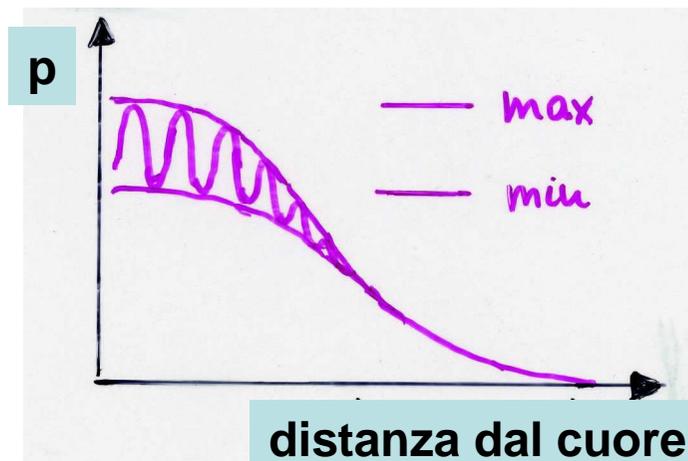


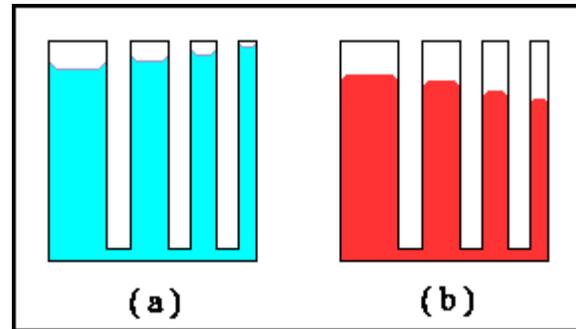
Misura della pressione arteriosa

- in un'arteria $N_R = 2\rho v a / \eta = 2\rho Q / (\pi \eta a)$ è < 1000 , flusso laminare, silenzioso
- se aumento v (riducendo a , senza ridurre Q) aumenta $N_R \rightarrow$ flusso vorticoso \rightarrow rumore
- se chiudo l'arteria il rumore cessa – la p corrisponde a quella sistolica (max)
- lasciando riaprire l'arteria quando il moto ridiviene laminare la p corrisponde a quella diastolica (min)



Stephen Hales





Fenomeni molecolari in meccanica dei fluidi

- Diffusione
- Tensione superficiale



Agitazione termica nei fluidi: diffusione(*)

- ad es. goccia di soluzione colorata in un liquido, il colore diffonde col tempo; gas in un altro gas; O_2 + sostanze nutrienti \rightarrow cellule \rightarrow scorie
- diffusione: conseguenza diretta del moto termico casuale delle molecole (vedi teoria cinetica)

v - velocità media termica

$\underline{\ell}$ - cammino libero medio

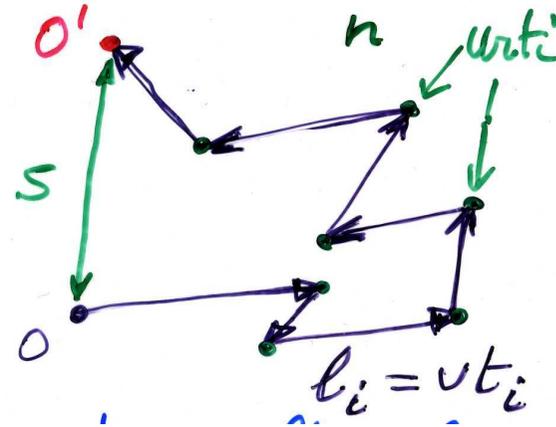
$$s = \underline{\ell} \sqrt{n}$$

$$L = \sum_i |l_i| = n \underline{\ell} = s^2 / \underline{\ell}$$

$$t = L/v = s^2 / (v \underline{\ell})$$

H_2O liq. $\underline{\ell} \sim 10^{-10}$ m, $v \sim 10^2$ m/s

$$s = 1 \text{ cm} \quad t = 10^4 \text{ s}; \quad s = 10^{-3} \text{ cm} \quad t = 10^{-2} \text{ s}$$



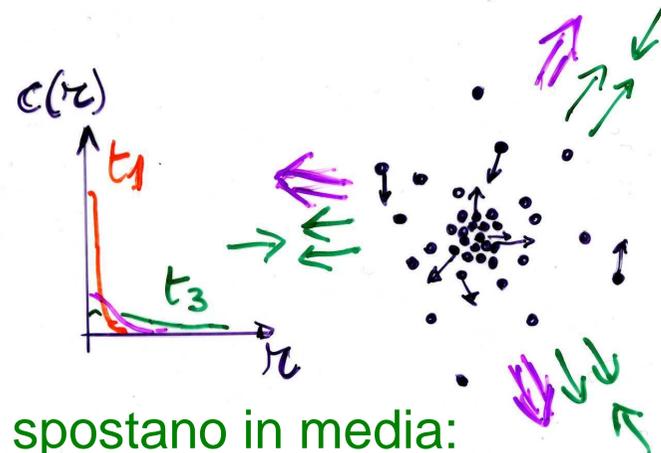
(random walk, ubriaco, moto browniano)

(*) facoltativo



Concentrazione e diffusione

- $c = m/V$ concentrazione (= m di soluto/ V di soluzione), omogenea con una densità, in kg/m^3
- la diffusione è evidenziabile quando si parte da una concentrazione non uniforme: al passare di t c'è la tendenza all'uniformità
- il risultato dipende fra l'altro dalla geometria: ad es. una concentrazione 'puntiforme' diffonderà sfericamente: la v media è la stessa, **le molecole migreranno più numerose da dove c è maggiore**

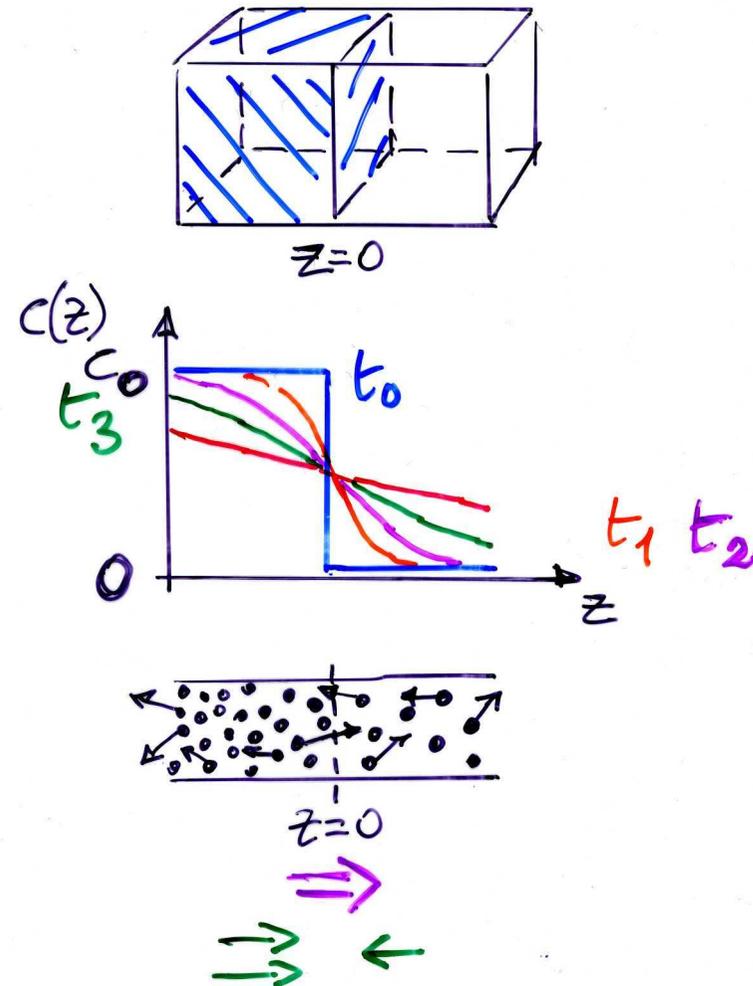
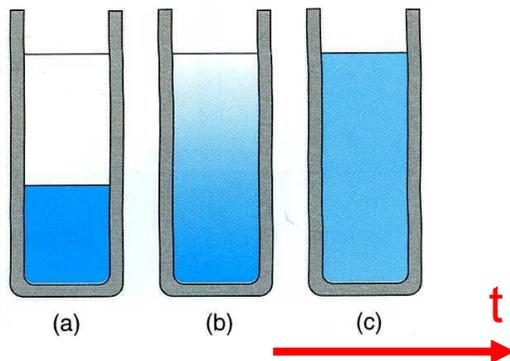


→ si spostano in media:
è un processo statistico



Concentrazione e diffusione (2)

- cambiando la geometria il fenomeno resta lo stesso ma variano le apparenze
- le molecole migrano tutte casualmente: **quelle che si trovano dove c è maggiore migrano in maggior numero**
- figure: espansione di un gas nel vuoto, soluzione separata inizialmente dal solvente



le m. si spostano in media:
è un processo statistico



Fenomeni di trasporto

1. scorrimento viscoso (à la Poiseuille)
2. diffusione
3. [conduzione del calore (vedi oltre)]
4. corrente elettrica (vedi oltre)

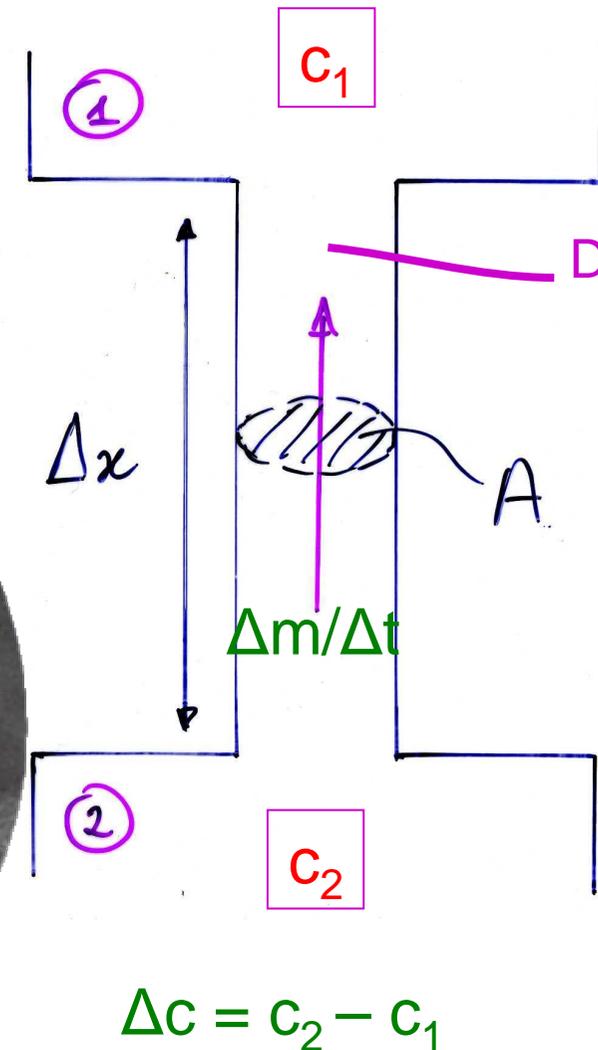
sono tutti fenomeni di trasporto, descrivibili con leggi analoghe: alla radice dei fenomeni c'è un gradiente, variazione per unità di distanza, o una differenza (rispettivamente: **pressione**, **concentrazione**, **temperatura**, **potenziale elettrico**) che genera il trasporto (rispettivamente: **fluido**, **soluto**, **calore**, **carica elettrica**)

- ci limitiamo al caso stazionario, gradienti cost.



Diffusione: legge di Fick

- diffusione in una soluzione: trasporto di materia fra due regioni a conc. diversa (caso stazionario, valori costanti nel tempo, 'serbatoi'): da c_2 , maggiore, a c_1 , minore
- $D = D(\text{soluzione}, T, c)$ è il coefficiente di diffusione
[D] = [L²T⁻¹] unità: m²/s
- legge di Fick (1855)





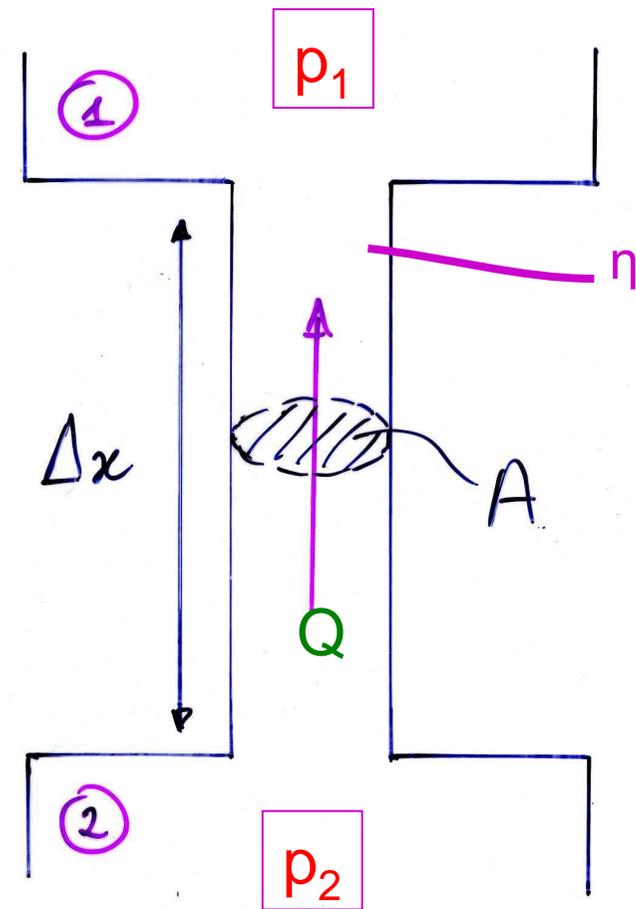
cfr.: moto di un fluido viscoso(*)

- riscriviamo la legge di Poiseuille (1842) per lo scorrimento viscoso in un capillare di area $\perp A = \pi a^2$

$$Q = \frac{\pi a^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x} = \left(\frac{a^2}{8\eta}\right) A \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

sono evidenti le analogie con la legge di Fick

- la legge di Poiseuille descrive il trasporto di fluido fra due regioni a p diversa - p_1, p_2 cost.
– $\eta = \eta(\text{fluido}, T, \Delta p)$



$$\Delta p = p_2 - p_1$$

(*) facoltativo

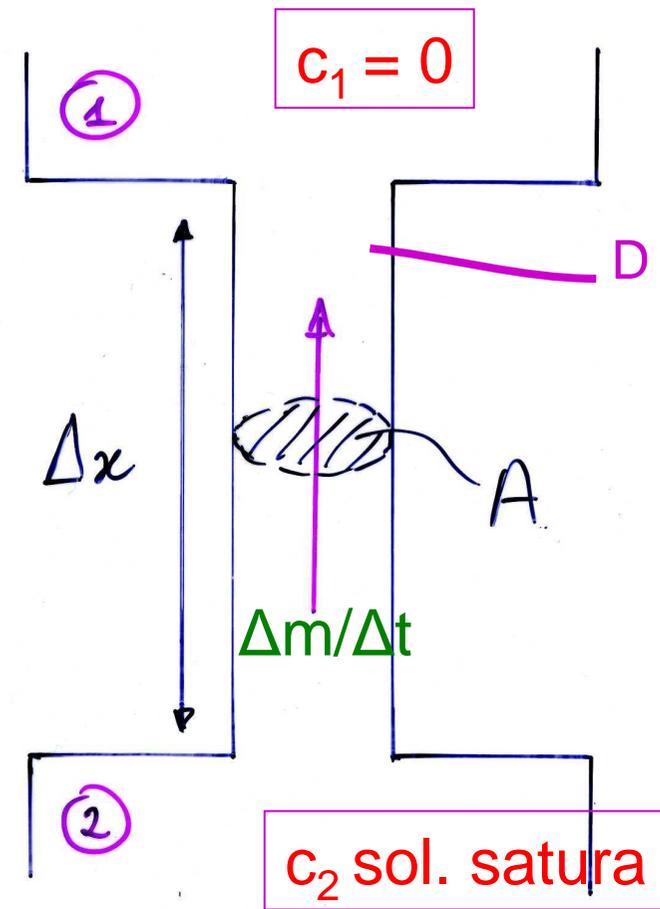


Un esempio di diffusione stazionaria(*)

- nella cella di Clack (1924)
ad es., c_2 corrisponde ad una soluzione satura, un sale in equilibrio con la soluzione, c_1 a puro solvente (un flusso di H_2O che rimuove il soluto)

- $$D = \frac{\Delta m / \Delta t}{\Delta c / \Delta x} \frac{1}{A}$$

$\Delta c / \Delta x$, costante, si misura con metodi ottici [$n = n(c)$]



$$\Delta c = c_2 - c_1$$

(*) facoltativo



Coefficiente di diffusione(*)

- la formula di Stokes-Einstein vale per le soluzioni liquide e dà la dipendenza da T e dal raggio a

$$D = kT/(6\pi\eta a)$$

(ma si ricordi che $\eta = \eta(T)$!)

- per molecole sferiche di soluto

$$M = 4/3\pi a^3 \rho \propto a^3$$

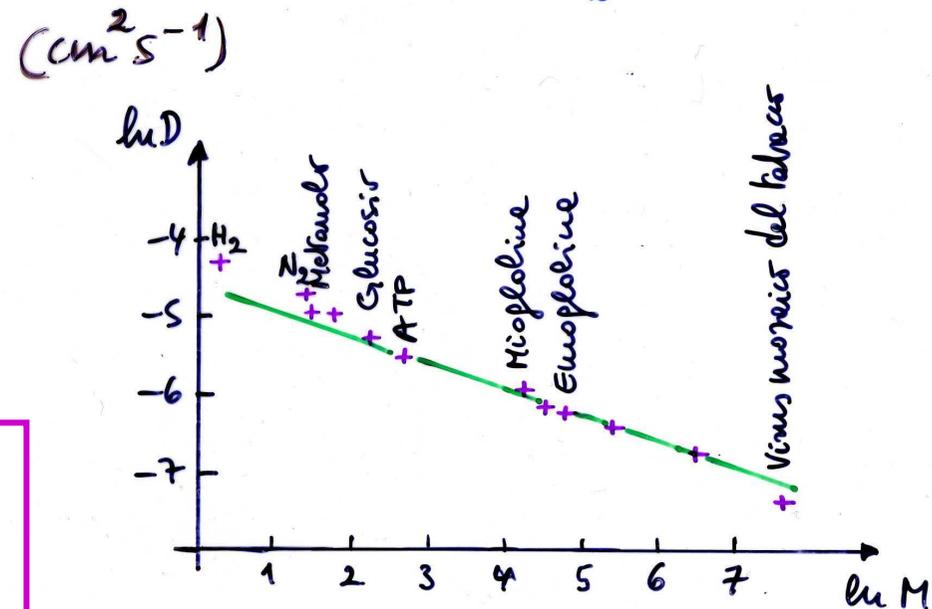
e, a parità di solvente,

$$D \propto (M)^{-1/3}$$

$$\ln D \propto -1/3 \ln M$$

- D in m²/s (in H₂O 20 °C)

glucosio	180 uma	$5.7 \cdot 10^{-10}$
emoglobina	64 kuma	$6.3 \cdot 10^{-11}$
v.mosaico t.	$4.1 \cdot 10^7$ uma	$4.6 \cdot 10^{-12}$



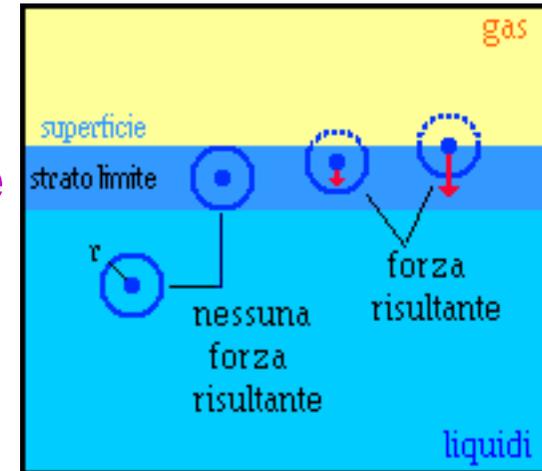
(uma)

(*) facoltativo



Tensione superficiale

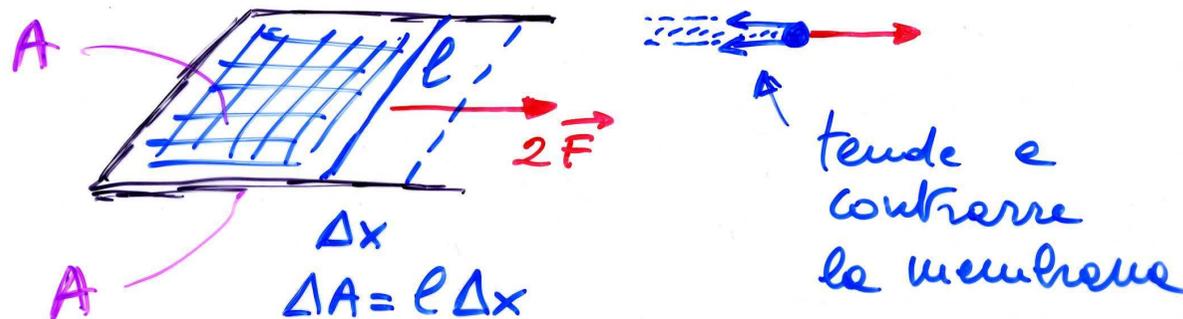
- forze molecolari (di natura e.m., attrazione)
 - coesione: f. fra mol. della stessa specie
 - adesione: f. fra mol. di specie diverse
- mol. all'interno di un liquido: f. bilanciate (mol. libere di muoversi)
- mol. sulla superficie: risultante diretta all'interno (f. di richiamo, entro il raggio d'azione)
- agitazione termica: mol. in superficie con molta energia possono superare il r. d'azione della sup. ed evaporare
- sup. libera dei liquidi → minima (f. di richiamo)
- ad es. liquidi immiscibili di uguale ρ : gocce di forma sferica (sfera, solido di minima A fra tutti, a parità di V)





Tensione superficiale (2)

- lamina liquida in aria (telaio con lato mobile)



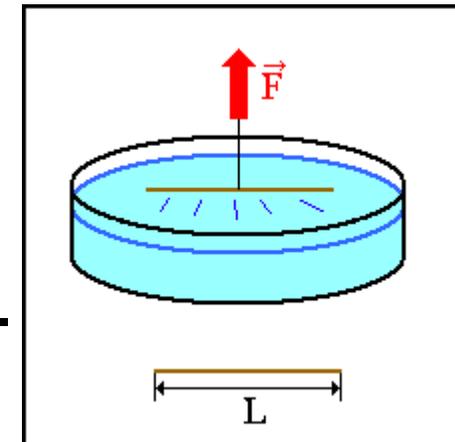
- per aumentare la sup. A di ΔA occorre un lavoro $\Delta \mathcal{L}$

$$\Delta \mathcal{L} / (2\Delta A) = 2F\Delta x / (2\Delta A) = F/\ell = \tau$$

tensione superficiale

- altro es. per sollevare un aghetto (o una moneta leggera) appoggiato sulla sup. di un liquido occorre fornire una f.

$$F = mg + 2\tau L > mg$$





Tensione superficiale (3)

- la **tensione superficiale** è quindi **un lavoro per unità di superficie** oppure **una forza per unità di lunghezza**

- $[\tau] = [\mathcal{L}/A] = [F/l] = [MT^{-2}]$

- unità SI: $1 \text{ N/m} = 1 \text{ J/m}^2$

$$\begin{aligned} \text{CGS: } 1 \text{ dyne/cm} &= 1 \text{ erg/cm}^2 = \\ &= 10^{-7} \text{ J}/10^{-4} \text{ m}^2 = 10^{-3} \text{ J/m}^2 \end{aligned}$$

- τ dipende da T e dai fluidi a contatto

aria-H₂O 20 °C $\tau = 0.073 \text{ N/m}$

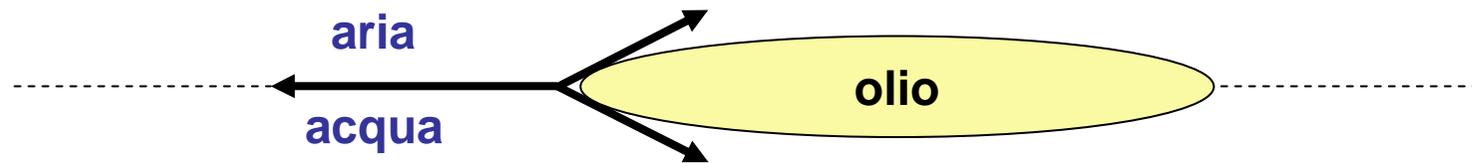
aria-H₂O 40 °C $\tau = 0.069 \text{ N/m}$

olio-H₂O 20 °C $\tau = 0.032 \text{ N/m}$ (bassa, come per altri liquidi organici)



Tensione superficiale (4)

- τ dipende dalla purezza del liq. e della sup. (l'aggiunta di tensioattivi, saponi, detersivi, diminuisce molto τ)
- lamine sottili: goccia d'olio su H_2O



siccome $\tau_{ar-ac} > \tau_{ar-ol} + \tau_{ac-ol}$ anche $F_{ar-ac} > F_{ar-ol} + F_{ac-ol}$,
non c'è equilibrio e la goccia tende a formare una
macchia molto sottile

- (*) **semplice esperienza casalinga**: bacinella di H_2O (pura), talco spruzzato, una goccia d'olio di volume V (si misura r con una lente prima di lasciarla cadere), si misura poi il R della macchia d'olio: $d(\text{spessore della macchia d'olio}) = V/(\pi R^2)$
→ d risulta molto piccolo, al limite diametro di una molecola di olio

(*) **facoltativa!**



Lamine curve: legge di Laplace(*)

- consideriamo una bolla di acqua saponata ($\tau = 0.025$ N/m, bolle più facili): la sup. tenderà a contrarsi \rightarrow $p_c = p_i - p_e$ che si trova dal lavoro necessario per gonfiare la bolla di $\Delta V = A\Delta r$

$$\Delta \mathcal{L} = F\Delta r = p_c A\Delta r = p_c 4\pi r^2 \Delta r$$

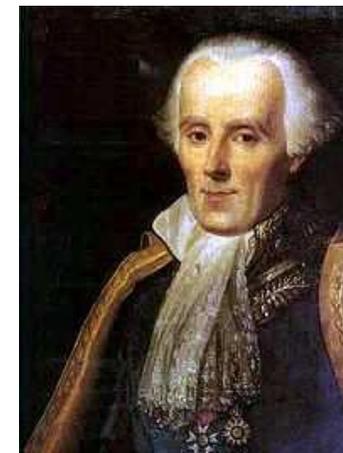
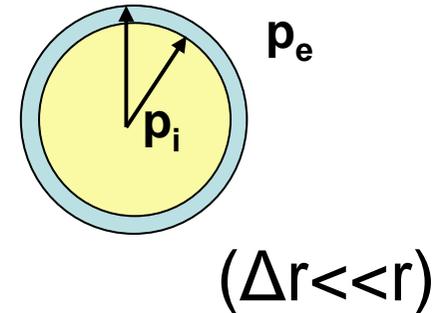
ma anche (2 sup.)

$$\Delta \mathcal{L} = 2 \tau [4\pi(r+\Delta r)^2 - 4\pi r^2] \sim 16\pi \tau r \Delta r$$

da cui

$$p_c = 4 \tau / r \quad (p_c = 2 \tau / r \text{ per una superficie sola})$$

legge di Laplace

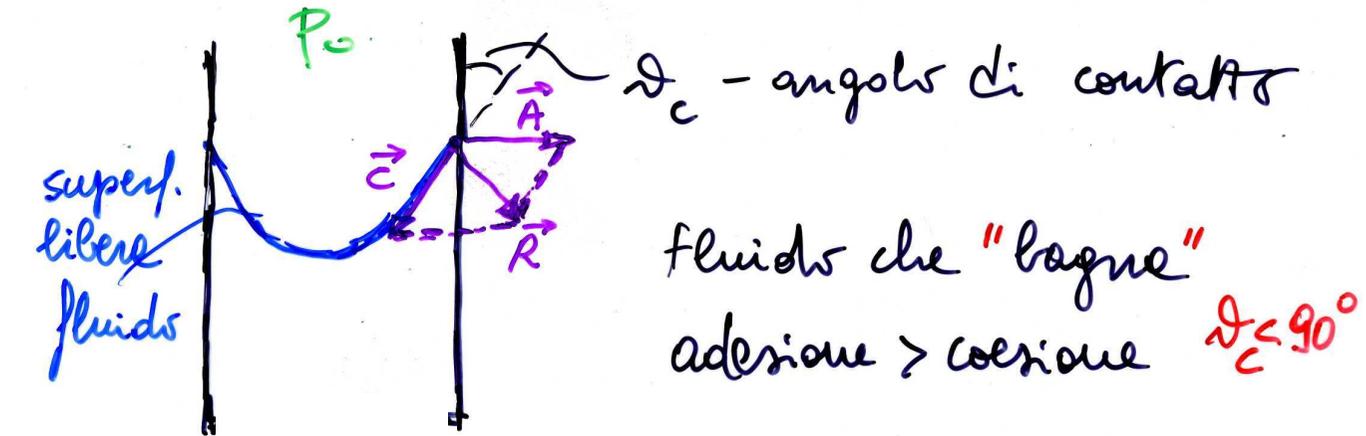


(*) facoltativo

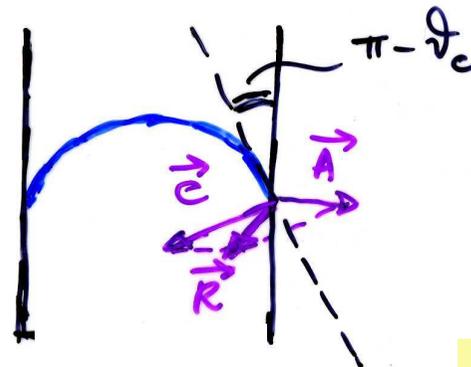


Forze di adesione e di coesione(*)

- liquido a contatto con una parete: la sua sup. sarà soggetta a f. di adesione (\vec{A}) oltre che di coesione (\vec{C})



su' una molecola: $\vec{R} \perp$ superficie liquids



fluids che "non bagnano"
adesione < coesione $\theta_c > 90^\circ$

$T_{Hg} = 0.465 \text{ N/m}$
 $\theta_c = 140^\circ$ Hg - vetro

(*) facoltativo



Fenomeni capillari, legge di Borelli-Jurin



G.A. Borelli

- in un capillare, se il liquido bagna le pareti, acqua, (non bagna, Hg) → innalzamento (abbassamento)
- si usa la legge di Laplace (1 sup.)

$$p_0 - p_1 = 2\tau/a = 2\tau \cos\theta_c / r$$

che uguaglia la p idrostatica

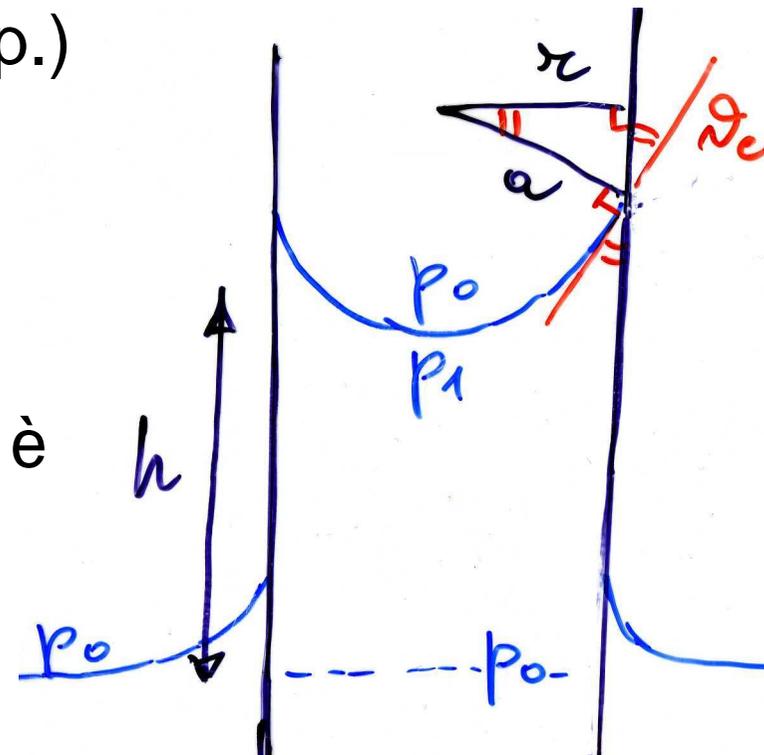
$$\rho g h = 2\tau \cos\theta_c / r$$

per cui l'innalza/abbassamento è

$$h = 2\tau \cos\theta_c / \rho g r$$

legge di Borelli-Jurin

$a = r/\cos\theta_c$
 θ_c angolo di contatto





Fine della meccanica dei fluidi