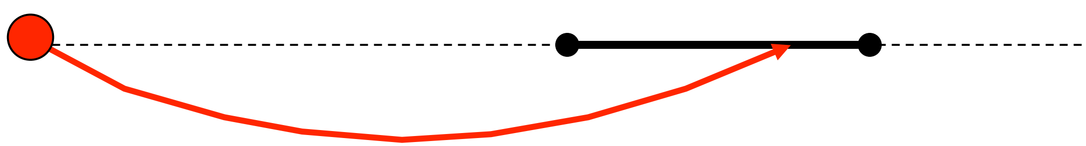
Lezioni in http://www.fisgeo.unipg.it/~fiandrin/didattica_fisica/did_fis1718/

# Lez 12 07/11/17

## Fisica Sperimentale e Applicazioni Didattiche

# Effetto Magnus: la palla a effetto

12-15. Nel gioco del calcio è possibile segnare una rete con tiro diretto dalla bandierina del calcio d'angolo. Per far questo occorre imprimere al pallone nel momento in cui viene calciato, una velocità angolare $\omega$ attorno ad un asse verticale. Indicata con $v_0$ la velocità iniziale, che si supporrà costante durante il moto, con $R$ il raggio del pallone e con $m$ la sua massa, con $\rho$ la densità dell'aria,
1) trovare la forza deflettente,



# Effetto Magnus: la palla a effetto

Collochiamoci in un sistema di riferimento con origine nel baricentro del pallone e animato di moto traslatorio rispetto al campo.

Il pallone è allora investito da un getto d'aria con velocità $v_0$ (la stessa del pallone rispetto al terreno di gioco). Poiché il pallone ruota attorno ad un asse verticale, la velocità dell'aria rispetto al pallone è diversa nei due punti $A$ e $B$ (vedi fig. 12-15 dove il pallone è visto dall'alto)

$$v_A > v_B \; . \qquad (1)$$

La velocità di un generico punto $P$ del pallone dipende dalla posizione dello stesso. Indicato con $\theta$ l'angolo formato da $OP$ con un piano orizzontale che passa per il centro $O$ del pallone (vedi fig. 12-16)

$$PH = R \cos \theta \qquad (2)$$

e quindi

$$v_P = \omega R \cos \theta \; . \qquad (3)$$

Nei fluidi, quello che conta e' la velocita' relativa del corpo rispetto al fluido: la velocita' relativa al fluido di A e' maggiore di quella di B a causa della rotazione in senso antiorario

P percorre circonferenze di raggio Rcos$\theta$ con vel $v_P = \omega R\cos\theta$

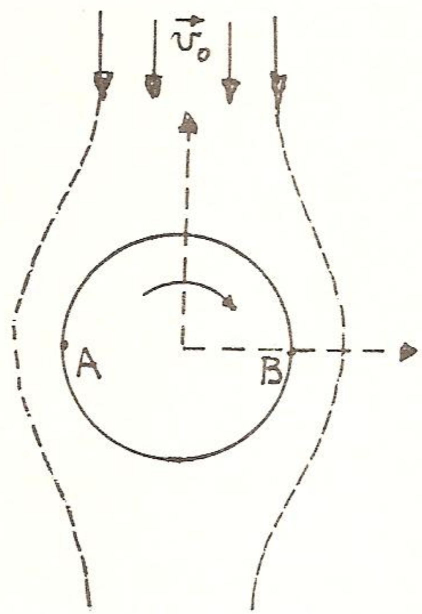



Fig. 12-15

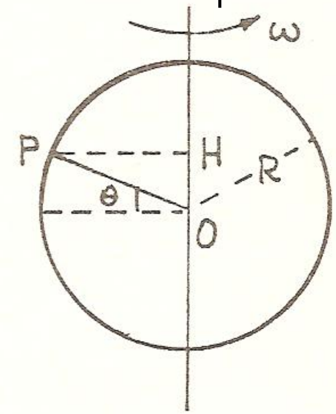



Fig. 12-16

# Effetto Magnus: la palla a effetto

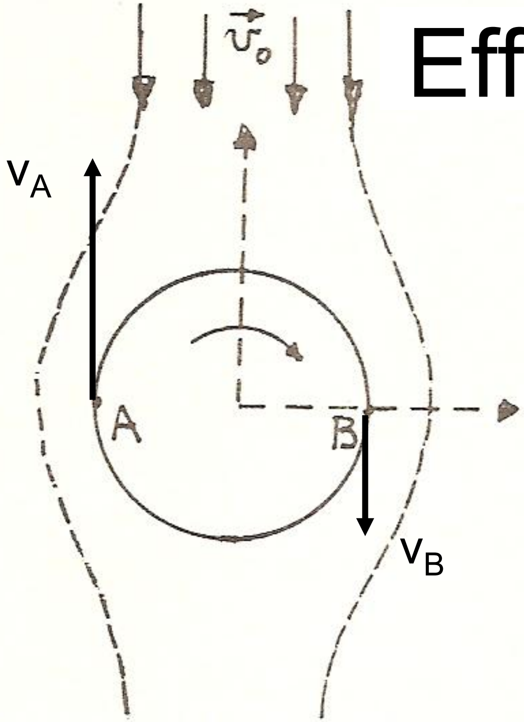



Fig. 12-15

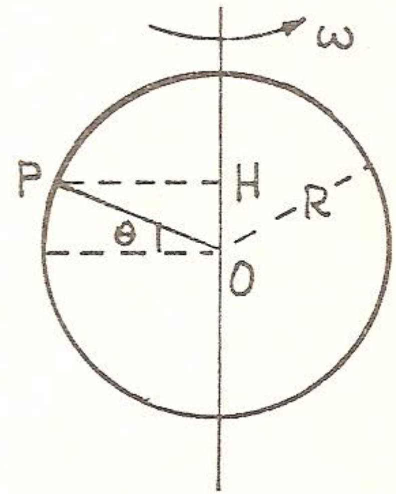



Fig. 12-16

E'possibile quindi scrivere

$$
\begin{aligned}
v_A &= -v_0 + \omega R \cos\theta \\
v_B &= -v_0 - \omega R \cos\theta \,.
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

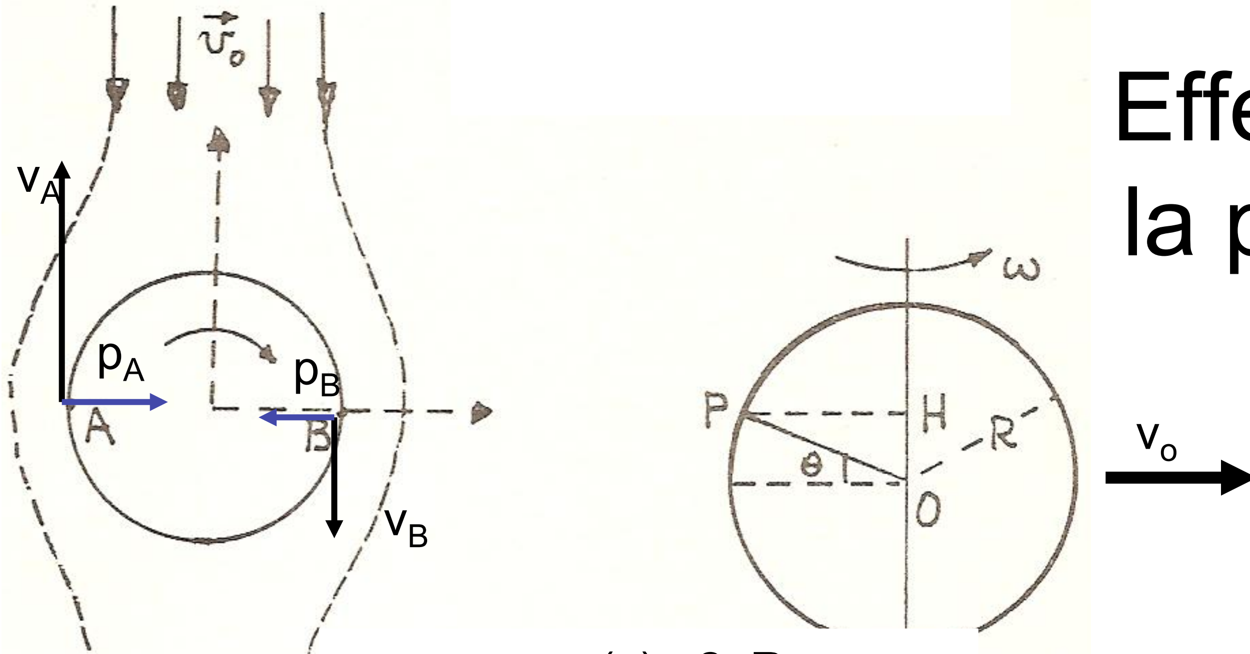
Facciamo uso del teorema di Bernoulli

$$p_A + \frac{1}{2}\rho\, v_A^2 = p_B + \frac{1}{2}\rho\, v_B^2 \qquad (5)$$

che permette di calcolare la differenza di pressioni

$$p_A - p_B = \frac{1}{2}\rho\,(v_B^2 - v_A^2) = 2\rho R\omega v_0 \cos\theta \,. \qquad (6)$$

# Effetto Magnus: la palla a effetto

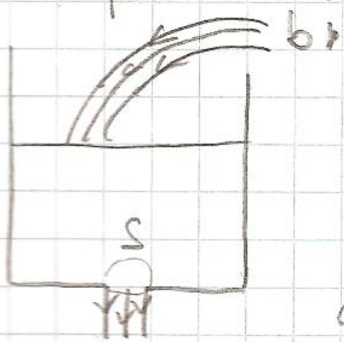



$p_A - p_B = \Delta p(\theta) = 2\rho R\omega v_o \cos\theta$

- La diff di pressione e' max nel piano perpendicolare all'asse di rotazione ($\theta = 0$) dove vale $\Delta p(0) = 2\rho R\omega v_o$ ed e' nulla sull'asse di rotazione
- E' sempre diretta da A verso B, cioe' perpendicolare a $v_o$ (perche' $0<\theta<\pi/2 \rightarrow \cos\theta>0$ sempre
- La forza complessiva puo' essere stimata come $\Delta\, p(0) \times S$, dove S e' la superficie laterale della palla, cioe' $\pi R^2$
- Quindi la forza complessiva e' $\mathbf{F} \propto \mathbf{\Delta p} \times \pi \mathbf{R^2 = 2\pi\rho R^3\omega v_o}$
- Il calcolo esatto (eseguendo un'integrazione in $\theta$) da' $\mathbf{F = (16/3)\rho R^3 \omega v_o}$
- la palla devia verso destra durante il moto a causa della differenza di pressione tar i due emisferi A e B...la cosidetta palla arrotata

# Problema

Acqua fluisce in una vasca di superficie molto larga ad un ratio di $b$ $m^3/s$ e fuoriesce da un foro di sezione $S$ sul fondo. Quale altezza raggiunge l'acqua nella vasca?

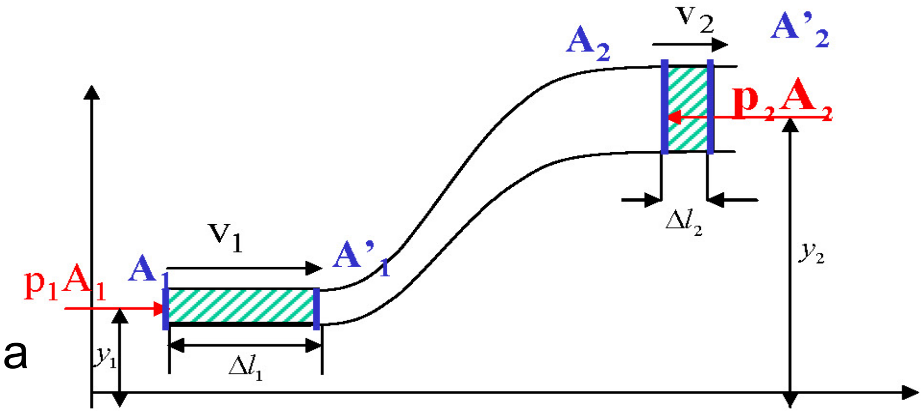



- Si raggiunge $h = \text{cost.}$ quando $p$ sul fondo è suff. grande da produrre un flusso uscente = a quello entrante: $Q_{in} = Q_{out}$

- $Q_{in} = b$ e $Q = v_{out} S$. Ci serve $v_{out}$.
- Teorema di Torricelli: $v_0 = \sqrt{2gh} \Rightarrow b = \sqrt{2gh} \cdot S$ e quindi

$$b^2 = (2gh) S^2 \Rightarrow h = \frac{b^2}{2gS^2}$$

# Energia di un fluido




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

Tutti i termini hanno le unita' di misura di una densita' di energia, cioe' $E/L^3$.

Se moltiplico tutti i termini per il volume V del corpo ottengo

$$pV + \tfrac{1}{2}\rho V v^2 + \rho V g h = \text{costante}$$

ma $\rho V = m$ → l'equ. diventa

$$pV + \tfrac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{costante}$$

il II e III termine sono l'energia cinetica e potenziale gravitazionale del corpo.
Il I termine rappresenta energia, cioe' capacita' di compiere lavoro, associata alla pressione nel fluido.
NON e' ne' cinetica ne' potenziale, ma costituisce energia immagazzinata nel sistema in virtu' della pressione che c'e' in esso ed e' detta **energia interna**.
Per capire bene cosa sia, occorre sviluppare i concetti della termodinamica

# Moto di un corpo solido in un fluido

L'espressione generale della **resistenza del mezzo** è dato da

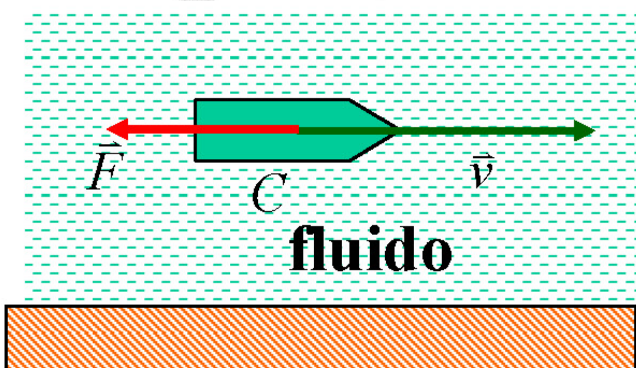
$$F_{res} = \frac{1}{4} c S \rho v^2 \qquad (9.18)$$

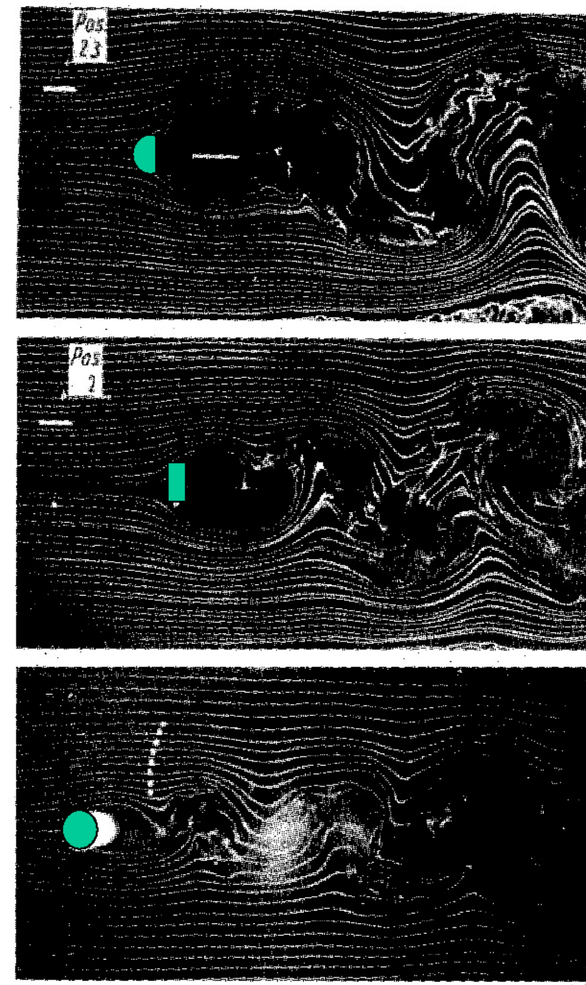
con :S : sezione, ρ: densità del fluido, v : velocità relativa,
c = ***coefficiente di resistenza*** del mezzo dipende dalla forma del corpo.

- in regime vorticoso $c$ è costante e $F_{rres}$ è proporzionale a $v^2$,
- in regime laminare $c$ è funzione dell'inverso della velocità e pertanto $F_{res}$ e' proporzionale alla velocità (forza di attrito viscoso).

In particolare per sfere di raggio $R$ con piccola velocità vale la **legge di Stokes:**

$$\mathbf{F}_{res} = -6\pi\eta R\mathbf{v} \qquad (9.19)$$




**Configurazione delle linee di corrente** ottenute con una semisfera, con un disco e con una sfera.

# *Esempio: Calcolo della forza resistente*

Dedurre l'espressione

$$F_{\text{res}} = \frac{1}{2} c\, S \rho\, v^2 \qquad (9.18)$$

della forza resistente resistenza  dall'aria sull'automobile che si muove con una velocità v .

**Soluzione** L'aria si muove rispetto all'automobile con velocità *-v,* per cui detta *S* la sezione dell'automobile perpendicolare alla velocità, la massa d'aria che investe l'automobile nel tempo $\Delta t$ è quella contenuta in un cilindro di base *S* e altezza pari alla distanza percorsa dall'automobile (dall'aria) nel tempo $\Delta t$ , $\Delta h = v\,\Delta t$, ossia $\Delta m = \rho_a S v\,\Delta t$, con $\rho_a$ = densità dell'aria.

In condizioni stazionarie, il lavoro fatto dalla forza resistente  nel tempo $\Delta t$ *è*

$$\Delta L = F_{res}\,\Delta h = F_{res}\, v\,\Delta t$$

Dal teorema del lavoro e dell'energia cinetica applicato AL FLUIDO spostato si ha che

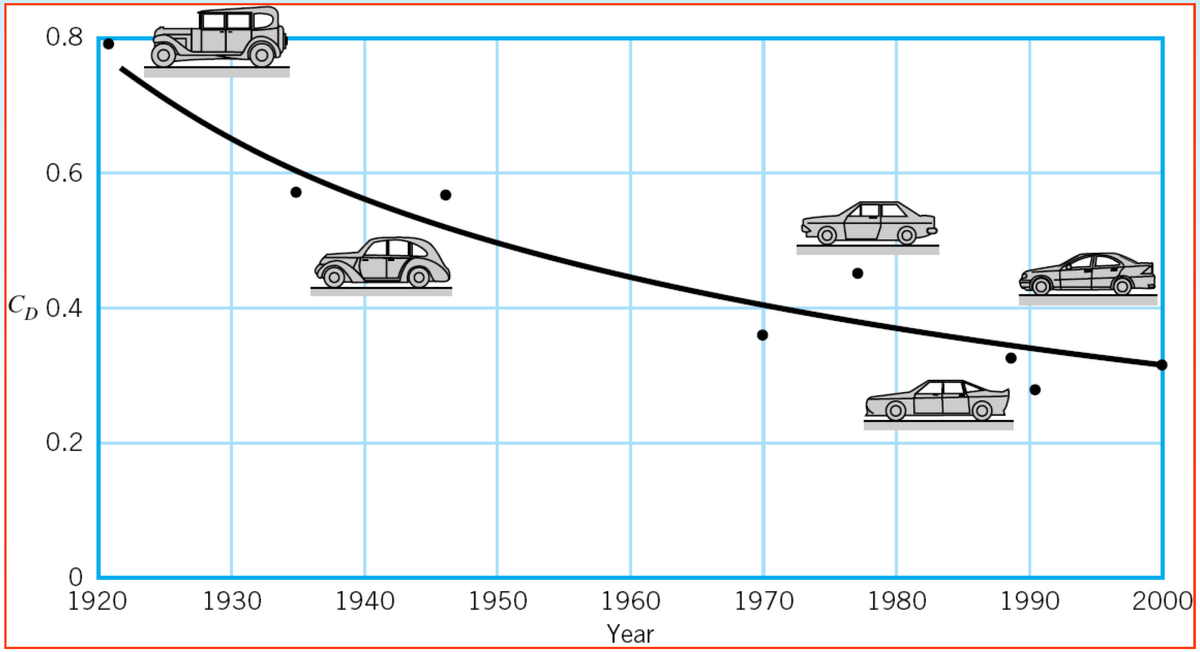
$$\Delta E_k = \frac{1}{2}\Delta m v^2 = \frac{1}{2}\rho_a S\, v\,\Delta t\, v^2$$

Eguagliando le due equazioni si ottiene:

$$F_{\text{res}} = \frac{1}{2}\rho_a S v^2$$

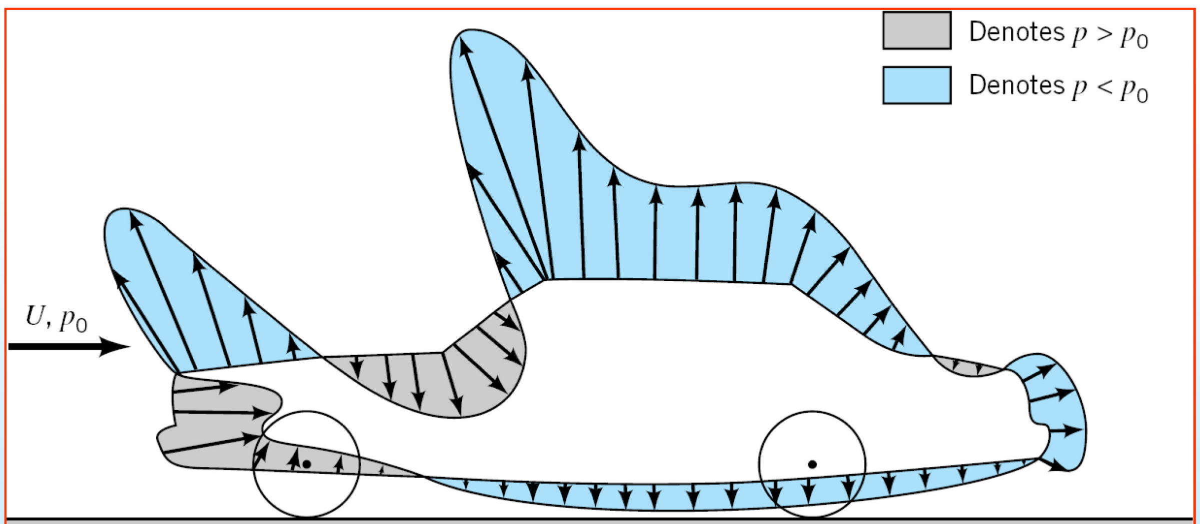
che coincide con la (9.18) a meno del coefficiente *e* che viene determinato sperimentalmente e dipende dal profilo di tutto il veicolo ed è funzione della velocità, dato che dipende dal regime del moto dell'aria rispetto al veicolo stesso.

# LA RESISTENZA DI FORMA (5)




Valori di $C_D$ per gli autoveicoli negli anni.

In mancanza di dati, l'area frontale si può calcolare come $A = 0.8\ bh$.




Andamento della pressione locale su un autoveicolo

# LA RESISTENZA DI FORMA (6)

| Shape | Reference area $A$ | Drag coefficient $C_D$ | Reynolds number $Re = \rho UD/\mu$ |
|---|---|---|---|
| Solid hemisphere | $A = \frac{\pi}{4}D^2$ | → 1.17<br>← 0.42 | $Re > 10^4$ |
| Hollow hemisphere | $A = \frac{\pi}{4}D^2$ | → 1.42<br>← 0.38 | $Re > 10^4$ |
| Thin disk | $A = \frac{\pi}{4}D^2$ | 1.1 | $Re > 10^3$ |
| Circular rod parallel to flow | $A = \frac{\pi}{4}D^2$ | $\ell/D$ : $C_D$<br>0.5 : 1.1<br>1.0 : 0.93<br>2.0 : 0.83<br>4.0 : 0.85 | $Re > 10^5$ |
| Cone | $A = \frac{\pi}{4}D^2$ | $\theta$, degrees : $C_D$<br>10 : 0.30<br>30 : 0.55<br>60 : 0.80<br>90 : 1.15 | $Re > 10^4$ |
| Cube | $A = D^2$ | 1.05 | $Re > 10^4$ |
| Cube | $A = D^2$ | 0.80 | $Re > 10^4$ |
| Streamlined body | $A = \frac{\pi}{4}D^2$ | 0.04 | $Re > 10^5$ |

| Shape | Reference area | Drag coefficient $C_D$ |
|---|---|---|
| Parachute | Frontal area $A = \frac{\pi}{4}D^2$ | 1.4 |
| Porous parabolic dish | Frontal area $A = \frac{\pi}{4}D^2$ | Porosity: 0 / 0.2 / 0.5<br>→ 1.42 / 1.20 / 0.82<br>← 0.95 / 0.90 / 0.80<br>Porosity = open area/total area |
| Average person | Standing<br>Sitting<br>Crouching | $C_DA = 9\ ft^2$<br>$C_DA = 6\ ft^2$<br>$C_DA = 2.5\ ft^2$ |
| Fluttering flag | $A = \ell D$ | $\ell/D$ : $C_D$<br>1 : 0.07<br>2 : 0.12<br>3 : 0.15 |
| Empire State Building | Frontal area | 1.4 |
| Six-car passenger train | Frontal area | 1.8 |
| Bikes | | |
| Upright commuter | $A = 5.5\ ft^2$ | 1.1 |
| Racing | $A = 3.9\ ft^2$ | 0.88 |
| Drafting | $A = 3.9\ ft^2$ | 0.50 |
| Streamlined | $A = 5.0\ ft^2$ | 0.12 |
| Tractor-trailor tucks | | |
| Standard | Frontal area | 0.96 |
| With fairing | Frontal area | 0.76 |
| With fairing and gap seal | Frontal area | 0.70 |
| Tree<br>$U = 10\ m/s$<br>$U = 20\ m/s$<br>$U = 30\ m/s$ | Frontal area | 0.43<br>0.26<br>0.20 |
| Dolphin | Wetted area | 0.0036 at $Re = 6 \times 10^6$ (flat plate has $C_{Df} = 0.0031$) |
| Large birds | Frontal area | 0.40 |

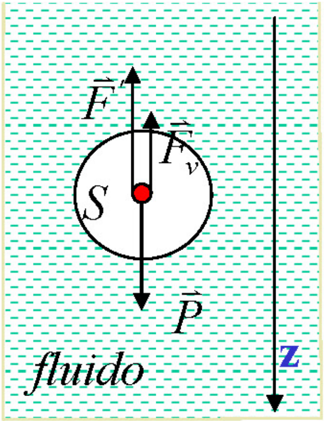
Valori di $C_D$ per corpi tozzi sono generalmente intorno ad 1.

Questo vuol dire che la pressione è dell'ordine di grandezza della pressione dinamica

$$p \sim \frac{1}{2}\rho U^2$$

# Esempio

Consideriamo una sferetta S di raggio R e densità ρ che si muove verticalmente in un fluido di densità ρ'< ρ cosicchè S scende verso il basso. La sferetta è sottoposta alle seguenti forze:




$$\vec{P} = m\vec{g} = \rho\frac{4}{3}\pi R^3\vec{g} \rightarrow \text{forza peso}$$

$$\vec{F}' = m'\vec{g} = -\rho'\frac{4}{3}\pi R^3\vec{g} \rightarrow \text{spinta idrostatica (Archimede)}$$

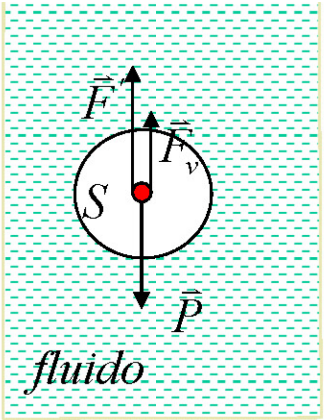
$$\vec{F}_v = -6\pi R\eta\vec{v} \rightarrow \text{legge di Stokes}$$

$$\boxed{\vec{P} + \vec{F}' + \vec{F}_v = m\frac{d\vec{v}}{dt}} \qquad m\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{4\pi}{3}R^3(\rho - \rho')\vec{g} - 6\pi R\eta\vec{v}$$

A destra abbiamo una forza costante || g e una opposta il cui modulo cresce al crescere di v (cioe' la resistenza diventa piu' alta via via che il corpo aumenta v).
A un certo punto puo' accadere che $F_v = P + F_{archimede}$ ➔ $dv/dt = 0$
Questo accade alla velocita' terminale $v_t$ data da

$$\frac{4\pi}{3}R^3(\rho - \rho') - 6\pi R\eta v_t = 0 \quad \Rightarrow \quad v_t = \frac{2\pi}{9}\frac{R^2(\rho - \rho')}{\eta}$$

# Esempio -continuazione

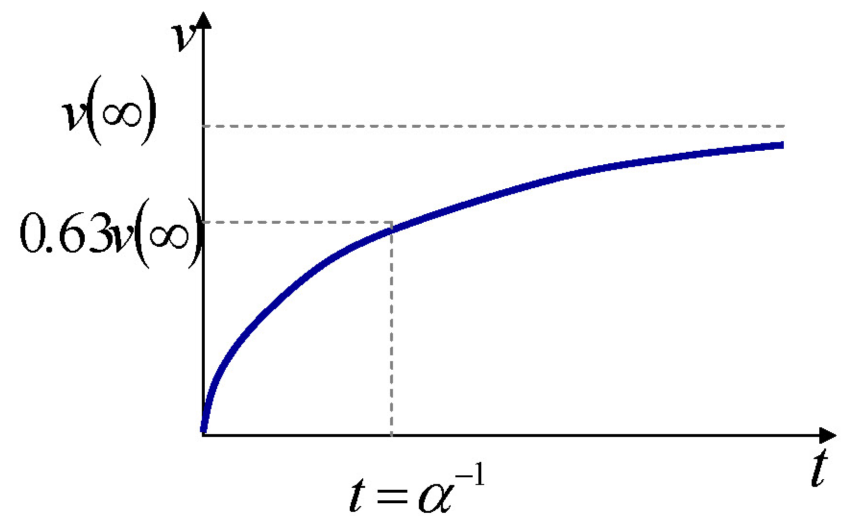



Soluzione dell'equazione: $v(t) = A + Be^{\alpha t}$

con: $\alpha = -\frac{6\pi R\eta}{m} = -\alpha_0$ A,B: dai valori di v per $t = 0$ e $t = \infty$

$$\boxed{v(t) = v(\infty)\left(1 - e^{-\alpha_0 t}\right)}$$

$$v(\infty) = \frac{2(\rho - \rho')R^2 g}{9\eta}$$



# Torniamo ora alla termodinamica

# Il Calore ed energia

- La temperatura di un corpo cambia come risultato dello scambio di calore con l'ambiente esterno
- La variazione e' dovuta allo scambio di energia di natura non meccanica tra il sistema e l'ambiente esterno.
- Questa energia e' energia interna del sistema, dovuta alla somma delle energie cinetiche e potenziali associate ai moti delle particelle fondamentali (molecole, atomi) che costituiscono il corpo macroscopico
- L'energia interna scambiata da un sistema all'altro a causa delle differenze di temperatura fra l'ambiente e il sistema prende il nome di calore, mentre quella scambiata scambiata senza che siano implicate differenze di T e' chiamata lavoro (per es se comprimo un gas con un pistone devo fare lavoro meccanico)

# Termodinamica

- A questo punto si chiarisce meglio il significato della definizione data
- Studia il bilancio energetico di sistemi fisici nel modo più generale, compresi scambi di energia non meccanici (calore), dato che i sistemi TD possiedono energia interna
- La termodinamica è quella parte della fisica che studia il comportamento di sistemi complessi composti, da un punto di vista microscopico, da un numero molto elevato di particelle, utilizzando poche grandezze fisiche macroscopiche complessive del sistema (termodinamico) stesso, come volume, pressione, densita', temperatura,...).

# Capacità Termica e Calore Specifico

- Somministrando una certa quantità di calore *Q* ad un corpo di massa m, si nota che esso varia la sua temperatura di una quantità $\Delta T$ tale che: $$\Delta T = \frac{Q}{C}$$
- La grandezza *C* è detta Capacità Termica.
- Si nota che la variazione di temperatura ottenibile dipende, a parità di materiale, dalla massa del corpo in questione, cioè *C* dipende da *m*.
- Si definisce allora il Calore Specifico c come:

$$c = \frac{C}{m} \Rightarrow \begin{cases} C = \dfrac{Q}{\Delta T} \\ c = \dfrac{1}{m}\dfrac{Q}{\Delta T} \end{cases}$$

c e' una proprieta' intrinseca del sistema TD

# Calore latente

- Non sempre ad un assorbimento di calore da parte di un solido o di un liquido corrisponde un aumento di temperatura.

- A volte la sostanza può passare da una fase (stato) ad un'altra.
  Ad esempio: solido – liquido (fusione)
  liquido – vapore (evaporazione)

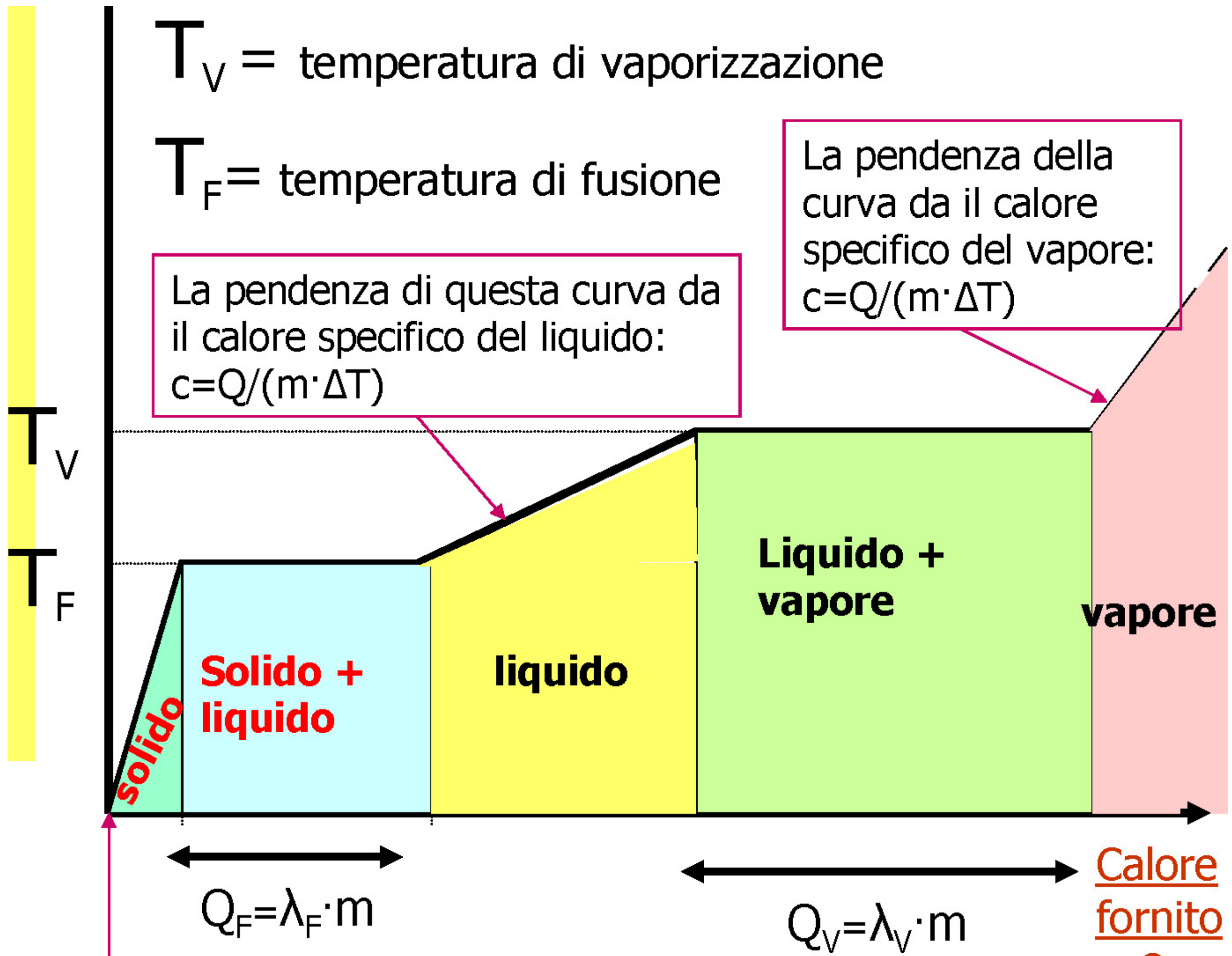
- La quantità di calore che deve essere fornita per massa unitaria si chiama calore latente $\lambda$.
  $Q = \lambda \cdot m$
  $\lambda_V$ = calore latente di evaporazione
  $\lambda_F$ = calore latente di fusione

- Togliendo calore alla sostanza avviene il passaggio inverso:
  liquido – solido (solidificazione)
  vapore – liquido (liquefazione)

- Ad una data pressione i passaggi di stato avvengono ad una temperatura fissata. Nel caso dell'acqua:

Fusione T=0 °C : $\lambda_F$=79.5 cal/g =6.01 kg/mol =333 kJ/kg
Evaporazione T=100 °C; $\lambda_V$=539 cal/g =40.7 kJ/mol =2.26 MJ/kg

# Passaggi di stato




La pendenza di questa curva da il calore specifico del solido: $c=Q/(m\cdot\Delta T)$

Ricorda: $T_V$ e $T_F$ sono funzione di P

Ricorda: il calore specifico del vapore dipende dalla modalità di somministrazione di Q

Scaldiamo m kg di sostanza allo stato solido fino a portarla allo stato di vapore

NB: la temperatura rimane costante durante il cambiamento di fase

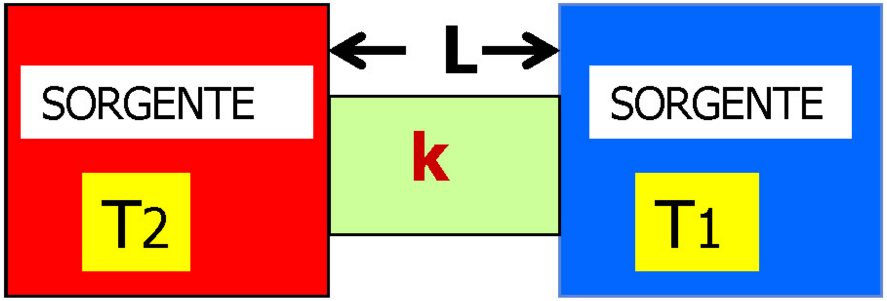
# Trasmissione del calore

- La trasmissione del calore da un corpo a temperatura $T_c$ ad uno a temperatura $T_f$ , dove $T_c > T_f$ , avviene in tre modi:

- **CONDUZIONE**
  La trasmissione avviene per contatto tra I due corpi. Ad esempio quando toccate con la mano il ferro da stiro.

- **Convezione**
  La trasmissione avviene per spostamento da un posto ad un altro di molecole "calde" (ovvero che hanno energia cinetica più alta rispetto alle molecole che urtano). Ad esempio l'asciugacapelli: le molecole di aria calda vengono soffiate sui vostri capelli dalla ventola.
  La convezione e' importante nei liquidi e nei gas

- **IRRAGGIAMENTO**
  Le molecole di un corpo di agitano tanto più velocemente tanto maggiore è la temperatura del corpo. Le cariche elettriche accelerate emettono energia sottoforma di onde elettromagnetiche. Quando la frequenza delle onde è nella regione dell'infrarosso, esse corrispondono a onde termiche.
  Esempio: il sole.
  N.B. Non vi è bisogno di un "supporto" per la trasmissione del calore per irraggiamento.




$T_2 > T_1$

# Conduzione

- Una lastra metallica di spessore L e superficie A è a contatto con due sorgenti a temperatura $T_1$ e $T_2$.
- Se $T_2 > T_1$ "passa" del calore dalla sorgente 2 alla sorgente 1 attraverso la lastra.
- il calore che passa nell'unità di tempo attraverso la lastra vale:

$$H = \frac{dQ}{dt} = k \cdot A \frac{T_2 - T_1}{L}$$

(Ipotesi: niente dispersione dalle pareti laterali della lastra)

- K è una costante che dipende dal materiale con cui è fatta la lastra. Si chiama conducibilità termica.

Buoni conduttori (metalli) → k elevato
Cattivi conduttori (polistirolo, lana) → k piccolo

# Irraggiamento

- La potenza $P_r$ (energia per unità di tempo) emessa da un corpo tramite irraggiamento vale:

$$P_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T^4$$

  - T = temperatura assoluta del corpo

  - A = superficie del corpo

  - $\sigma$ = costante di Stefan-Boltzman $5.6703 \cdot 10^{-8}$ W/m$^2$K

  - $\varepsilon$ = emittanza (o emissività) della superficie del corpo. Può assumere valori compresi tra 0 e 1

- Un corpo emette solo le radiazioni che riesce ad assorbire

- Un corpo che assorbe tutta la radiazione che lo investe (astrazione ideale) si chiama corpo nero.
  Il corpo nero avrà quindi anche il massimo di emissività ($\varepsilon$=1)

- Misurando lo spettro e la potenza irraggiata da un corpo si risale alla sua temperatura.

# Convezione

In una fiamma, si vede l'energia termica che viene trasportata verso l'alto per mezzo della convezione di aria.
La convezione ha luogo quando un fluido (aria, acqua) e' a contatto con un oggetto a T superiore.
La T della parte a contatto aumenta e (in molti casi) il fluido si espande
Espandendosi, la densita' diminuisce; poiche' e' meno denso del fluido circostante, sale a causa della spinta di Archimede; il fluido circostante scende per prendere il posto di quello piu' caldo che sale e si genera una circolazione convettiva.
Esempi: convezione atmosferica che svolge un ruolo fondamentale per il clima globale.
Correnti termiche in atmosfera che alzandosi da terra mantengono in volo uccelli ed alianti.
L'energia prodotta all'interno del Sole viene trasportata in superficie dal moto convettivo di enormi colonne (dette di Taylor) a simmetria cilindrica (la stessa cosa avviene in una pentola d'aqua riscaldata dal fornello della cucina)

# Problema svolto 18.4 pag. 419

QUANTO CALORE OCCORRE PER FAR PASSARE DEL GHIACCIO DI MASSA $m = 720\ g$ A $-10\ °C$ ALLO STATO LIQUIDO A $15\ °C$?

SUPPONETE DI FORNIRE AL GHIACCIO UN CALORE TOTALE DI SOLI 210 kJ. QUALI SONO ALLORA LO STATO FINALE E LA TEMPERATURA DELL'ACQUA?

- DIVIDIAMO IL FENOMENO IN TRE FASI:
  1) RISCALDAMENTO DEL GHIACCIO FINO A $0\ °C$
  2) FUSIONE DEL GHIACCIO
  3) RISCALDAMENTO DELL'ACQUA FINO A $15\ °C$

1) $Q_1 = c_{ghiaccio} \cdot m \cdot (T_f - T_i) = \left(2220 \frac{J}{kg \cdot K}\right)(0.720\ kg) \cdot (0 - (-10)\ °C) = 15.981\ kJ$

2) $Q_2 = L_F \cdot m = \left(333 \frac{kJ}{kg}\right) \cdot (0.720\ kg) = 239.8\ kJ$

3) $Q_3 = c_{liquido} \cdot m \cdot (T_f - T_i) = \left(4190 \frac{J}{kg \cdot K}\right)(0.720\ kg)(15 - 0\ °C) = 45.25\ kJ$

# Continua...

1) $Q_1 = c_{ghiaccio} \cdot m \cdot (T_f - T_i) = \left(2220 \frac{J}{kg \cdot K}\right)(0.720\ kg) \cdot (0 - (-10)°C) = 15.98 kJ$

2) $Q_2 = L_F \cdot m = \left(333 \frac{kJ}{kg}\right) \cdot (0.720\ kg) = 239.8\ kJ$

3) $Q_3 = c_{liquido} \cdot m \cdot (T_f - T_i) = \left(4190 \frac{J}{kg \cdot K}\right)(0.720\ kg)(15 - 0\ °C) = 45.25\ kJ$

- IL CALORE TOTALE È LA SOMMA DEI TRE CALORI

$Q_{TOT} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 15.98\ kJ + 239.8\ kJ + 45.25\ kJ \simeq 300\ kJ$

- SE FORNIAMO AL GHIACCIO SOLTANTO 210 kJ, RIUSCIAMO A SCALDARE IL GHIACCIO FINO A 0 °C, MA NON RIUSCIAMO A FONDERLO TUTTO

Poiche' ne usiamo $Q_1$ per portare il ghiaccio fino a 0 C, ne abbiamo a disposizione

$Q_{RES} = Q_{TOT} - Q_1 = 210\ kJ - 15.98\ kJ \simeq 194\ kJ$

- VEDIAMO QUANTO GHIACCIO RIUSCIAMO A FONDERE CON 194 kJ

$m = \frac{Q_{RES}}{L_F} = \frac{194\ kJ}{333\ kJ/kg} = 0.583\ kg = 583\ g$

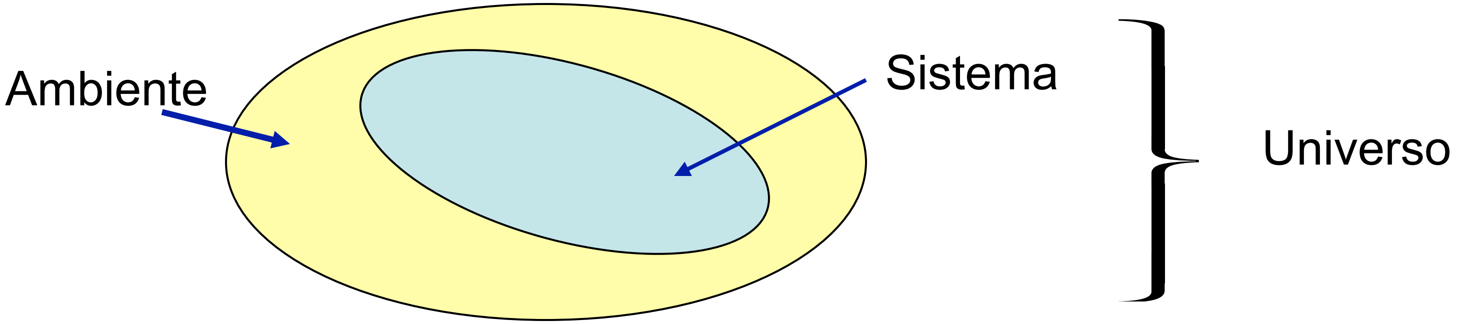
- LO STATO FINALE È COMPOSTO DA 583 g DI ACQUA E 137 g DI GHIACCIO A 0 °C

# Sistema Termodinamico

**Sistema TD**
Porzione del mondo oggetto di osservazione. Formato da una (es. fluido omogeneo) o più parti.

**Ambiente**
Insieme con cui può interagire il sistema. Contribuisce alla evoluzione del sistema.

Sistema + Ambiente = Universo Termodinamico




Un sistema può essere:
APERTO: scambia energia e materia con l'ambiente
CHIUSO: scambia energia (non materia) con l'ambiente
ISOLATO: nessuno scambio con l'ambiente

L'Universo TD si considera un sistema isolato.

# Descrizione di un sistema Termodinamico

Un sistema TD è descritto dai valori delle variabili TD

In piccolo numero.
Grandezze macroscopiche

Variabili Termodinamiche estensive, che dipendono dalle dimensioni del Sistema, nel senso che se si hanno 2 sistemi, ciascuno caratterizzato da valori definiti delle variabili, l'unione dei 2 sistemi e' caratterizzato da valori del var pari alla somma di quelle dei singoli sistemi: *V, m, U, S ....*

$$X = \sum_K X_K$$

Variabili Termodinamiche intensive, che non dipendono dalle dimensioni del sistema: *p*, $\rho$, *T*, ...

Le variabili termodinamiche devono essere definite in ogni punto in modo univoco

Tipo e numero dipendono dal sistema. Per un fluido omogeneo (v. gas ideale): *P, V, T.*

## Equilibrio Termodinamico

Uno stato è di equilibrio se:

Equilibrio chimico

Equilibrio meccanico

Sistema TD in equilibrio

Equilibrio termico

Equilibrio fra le parti del sistema
Equilibrio fra sistema e ambiente

All'equilibrio le variabili TD sono legate da un'equazione di stato

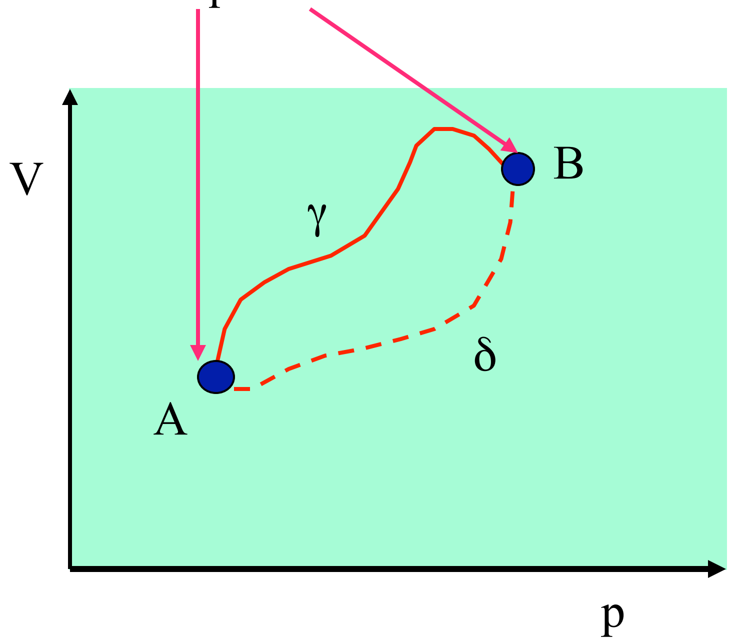
es. $f(p,V,T) = 0$ per gas ideale

perciò una variabile si può eliminare

# Trasformazioni Termodinamiche

L'evoluzione che porta dallo stato iniziale A a quello finale B
si dice Trasformazione Termodinamica

Stati di equilibrio




Trasformazione: collega 2 stati di equilibrio.

(in un certo senso uno stato è solo di equilibrio)
Gli stati di equilibrio si possono rappresentare come punti nello spazio delle coordinate termodinamiche (variabili TD indipendenti. Rispetto ad esse si possono esprimere tutte le proprietà del sistema)

IN UNO STATO DI EQUILIBRIO LE VARIABILI TERMODINAMICHE HANNO LO STESSO VALORE IN OGNI PUNTO DEL SISTEMA

- Le variabili termodinamiche che si possono usare sono:
  - Pressione P
  - Volume V
  - Temperatura T
  - Entropia S (vedremo più avanti cosa è…)

# Tipi di trasformazioni

- Trasformazioni cicliche.
  - Lo stato finale è uguale a quello iniziale.
- Trasformazioni quasi statiche.
  - Il sistema durante la trasformazione passa solo attraverso stati di equilibrio.
- Trasformazioni reversibili.
  - La trasformazione si dice reversibile se si può eseguire una trasformazione che riporti il sistema allo stato iniziale passando per la stessa successione di stati intermedi, semplicemente invertendo il segno di calore e lavoro scambiati. Un esempio di trasformazione reversibile è il passaggio di stato. Una trasformazione quasi statica e senza effetti dissipativi è reversibile.
- Trasformazione irreversibile.
  - Non è possibile tornare allo stato iniziale invertendo il segno del calore e del lavoro.

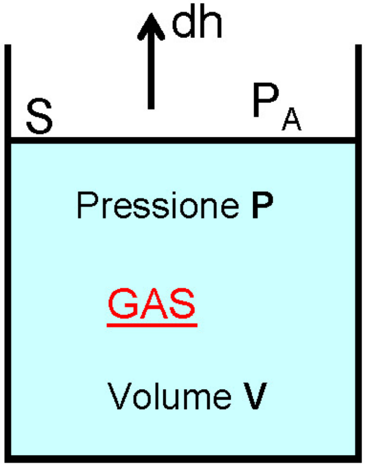
# Lavoro meccanico

- Ipotesi: la pressione ambiente $P_A$ è uguale alla pressione interna P, allora il pistone non si muove.
- Il pistone si muove se $P_A \neq P$.
- In una trasformazione reversibile $\Delta P = P_A - P$ = infinitesimo.
- In una trasformazione irreversibile $\Delta P = P_A - P$ = valore finito.

- Immaginiamo che il pistone si espanda di dh in modo reversibile:

$$\delta L = F \cdot dh = (P \cdot S)dh = P(S \cdot dh) = P \cdot dV$$

P è lo stesso in tutto il volume del gas (stato di equilibrio)




Clindro riempito di gas a pressione p e volume VG, chiuso da un pistone mobile di area S

- N.B. in caso di trasformazione irreversibile occorre considerare la pressione esterna contro cui si espande il pistone

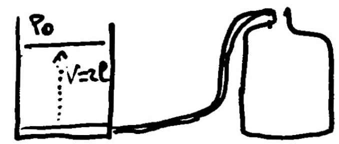
:

$$\delta L = P_A \cdot dV$$

- Il lavoro totale si calcola come: $$L = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV$$
- Convenzione sui segni:
  - **Lavoro fatto dal sistema (espansione) => L POSITIVO**
  - **Lavoro fatto sul sistema (compressione) => L NEGATIVO**

UNA BOMBOLA CONTIENE 100 LITRI DI GAS A 20 atm ED È COLLEGATA AD UN CILINDRO CON PISTONE TRAMITE UNA VALVOLA CHE FA FLUIRE IL GAS MOLTO LENTAMENTE.

IL CILINDRO HA UN VOLUME DI 2 LITRI E IL PISTONE È POGGIATO INIZIALMENTE SUL FONDO. TROVARE IL LAVORO MECCANICO FATTO DAL SISTEMA (GAS) QUANDO IL PISTONE SI È COMPLETAMENTE ESPANSO.




- LA TRASF. È IRREVERSIBILE
- SUL PISTONE AGISCE LA PRESSIONE ESTERNA $P_0$ (TRASCURANDO IL PESO DEL PISTONE)

- IL LAVORO FATTO DAL PISTONE VALE:

$$\delta L = P_0\, dV$$

$$L = \int_0^V P_0\, dV = P_0 \int_0^V dV = P_0 V$$

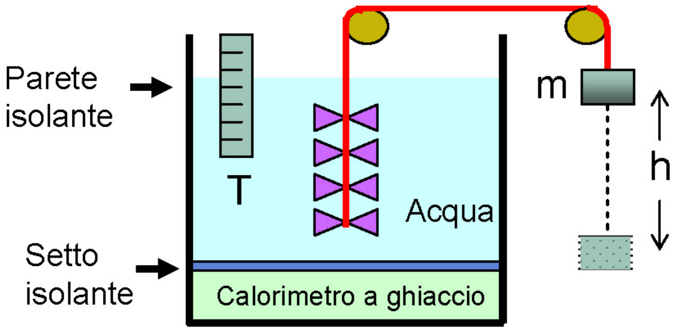
Attenzione alle unita'!
1 atm = $1.01 \times 10^5$ Pa
1 l = $10^{-3}$ m$^3$

$$L = P_0 V = 1\ \text{atm} \cdot 2\ \ell =$$

$$= \underbrace{1.01 \cdot 10^5}_{\text{Pa}} \cdot \underbrace{2 \cdot 10^{-3}}_{\text{m}^3} = 2.03 \cdot 10^2\ \text{J}$$

- SE NON CI FOSSE STATA L'ATMOSFERA, QUANTO SAREBBE STATO IL LAVORO?

# Esperienza di Joule




**Esperimento concettuale**

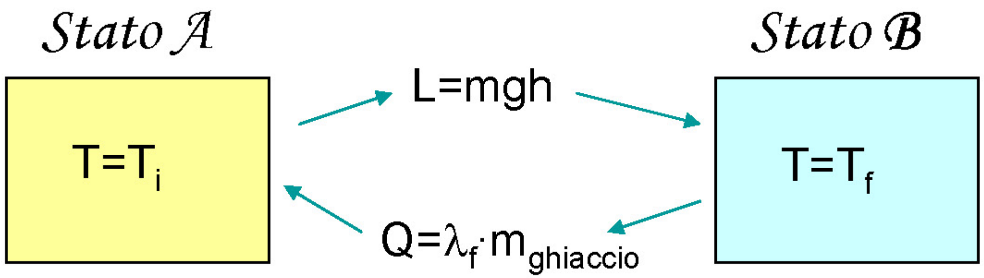
- Prendiamo un mulinello immerso in un contenitore isolante, che non permette scambi di calore con l'esterno, contenente acqua.
- Il mulinello è collegato ad una massa m che può scendere di una quota h.
- Un termometro T permette di misurare la temperatura dell'acqua.
- L'acqua può scambiare calore con un calorimetro a ghiaccio (che si trova a T=0 °C) togliendo un setto isolante.

- Esperimento:

1) Si misura la temperatura dell'acqua $T_i$
2) Si fa scendere la massa m => $L = \Delta U_g = mgh$
3) Si misura di nuovo la temperatura dell'acqua e si trova che è aumentata. $T_f > T_i$
4) Si toglie il setto isolante. Del calore passa dall'acqua al calorimetro. Il ghiaccio comincia a fondere.
   Quando $T=T_i$ il calore trasferito al calorimetro vale Q (misurato dalla quantità di ghiaccio che si è sciolto).

⇨ **Siamo tornati nello stesso stato iniziale (stessa temperatura)**

# Esperienza di Joule

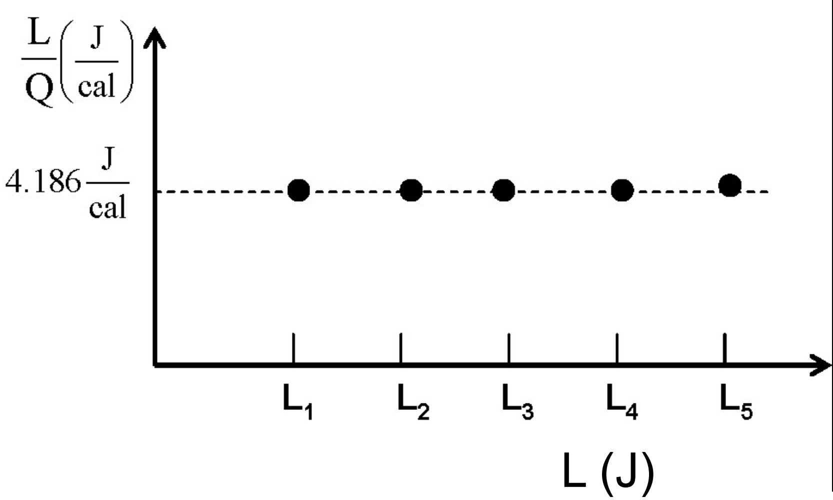



Ripetiamo l'esperimento cambiando il lavoro fatto dal mulinello sull'acqua.

Si può fare cambiando la massa m oppure l'altezza h

Per ogni valore di L si misura il corrispondente valore di Q necessario per riportare il sistema nello stato iniziale.

Costruiamo il grafico seguente:




In una trasformazione ciclica il rapporto tra il lavoro fatto sul sistema ed il calore sottratto è una costante universale.

$$\boxed{\frac{L}{Q} \equiv J = 4.186\frac{J}{cal}}$$

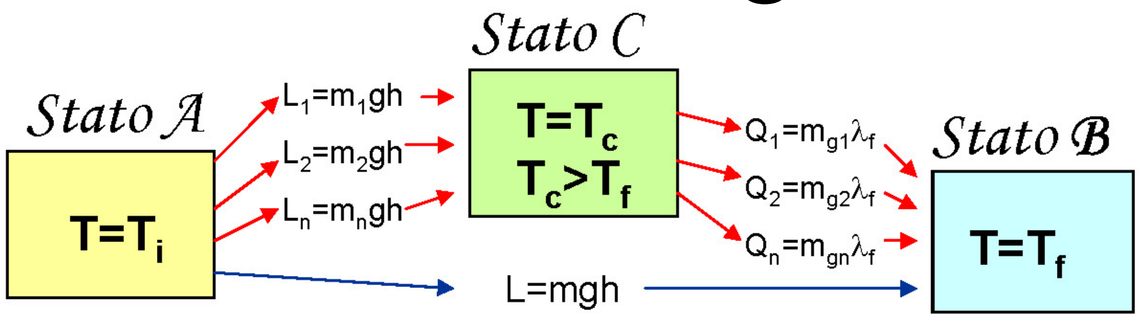
(equivalente meccanico della caloria)

Se uso le stesse unità di misura per il lavoro ed il calore, in una trasformazione ciclica si ha:

$$\boxed{Q - L = 0}$$

Il calore e' quindi un aspetto che l'energia assume nel passaggio da un sistema all'altro

# Energia interna U




- Stato iniziale (stato A): acqua a temperatura $T_i$
  Stato finale (stato B): acqua a temperatura $T_f$
  Stato intermedio (stato C): acqua a temperatura $T_c > T_f$
- Lo stato C viene raggiunto facendo cadere una massa $m_i > m$
- Dallo stato C si può andare allo stato B facendo passare del calore dall'acqua al calorimetro.
  In questo modo l'acqua si raffredda fino alla temperatura $T=T_f$
- Si può passare dallo stato A allo stato B in vari modi, "scambiando" diversi calori e lavori:
- Abbiamo:
  1) $L_1 = m_1 gh \quad ; \quad Q_1 = m_{g1} \cdot \lambda_f$
  2) $L_2 = m_2 gh \quad ; \quad Q_2 = m_{g2} \cdot \lambda_f$
  3) $L_i = m_i gh \quad ; \quad Q_i = m_{gi} \cdot \lambda_f$
  4) $L_n = m_n gh \quad ; \quad Q_n = m_{gn} \cdot \lambda_f$
  5) $L = mgh \quad ; \quad Q=0$ [caso particolare]

# Energia interna U

- Per andare dallo stato A ($T=T_i$) allo stato B ($T=T_f$), il sistema (acqua) scambia con l'ambiente calore e lavoro.
- Calore e lavoro scambiati sono diversi in funzione del tipo di trasformazione eseguita.
- Qualunque sia il tipo di trasformazione, sperimentalmente, si trova sempre che:

$$\boxed{Q_1 - L_1 = Q_2 - L_2 = \cdots Q_i - L_i = \cdots Q_n - L_n}$$

- Ovvero:

$$\boxed{Q - L = \quad \text{costante}}$$

# Energia interna U

- Se cambiamo lo stato iniziale ($T_i' \neq T_i$) oppure lo stato finale ($T_f' \neq T_f$) e ripetiamo l'esperimento troviamo:

$$\boxed{Q' - L' = \text{costante}'}$$

- La grandezza Q-L non dipende dal tipo di trasformazione eseguita, ma dipende solo dallo stato iniziale e dallo stato finale (ricordate il lavoro di una forza conservativa?)

- Quindi Q-L è uguale alla variazione di una funzione di stato. Una funzione che dipende solo dal valore dei parametri di stato.

- Tale funzione di stato si chiama Energia Interna **U** (oppure $\mathbf{E}_{int}$).

# I principio della TD

$$\boxed{Q - L = U(B) - U(A) = \Delta U}$$

- L'energia interna U(P,V,T) è funzione dei parametri di stato

- Nella relazione Q-L=$\Delta$U compare solo come differenza, quindi è definita a meno di una costante arbitraria.

- Consideriamo ora un tratto elementare di una trasformazione reversibile (cioè che passa solo per stati di equilibrio):

$$\boxed{\delta Q - \delta L = dU}$$

- dU è un differenziale esatto (corrisponde cioè alla variazione di una funzione di stato), mentre $\delta$Q e $\delta$L sono solo quantità piccole, ma non sono differenziali esatti, perché il loro valore dipende dal tipo di trasformazione.

# Primo Principio della TD

- Siccome la termodinamica si è sviluppata con lo studio delle macchine termiche era interesse degli studiosi realizzare delle macchine che assorbissero calore e producessero lavoro
- Per questo motivo si è adottata la convenzione che il calore è positivo quando fornito al sistema e negativo quando ceduto da esso e che il lavoro sia positivo quando fatto dal sistema (cessione di energia meccanica) e negativo quando subito da esso (acquisizione di energia meccanica da parte del sistema)

Il calore assorbito dal sistema è positivo

Il calore ceduto dal sistema è negativo

Il lavoro fatto dal sistema è positivo

Il lavoro fatto sul sistema è negativo