



**Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1546A -

ANNO: 2015

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Zago E.

MATERIA: Fisica Tecnica + Eserc. Prof.Perino

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

# FISICA TECNICA

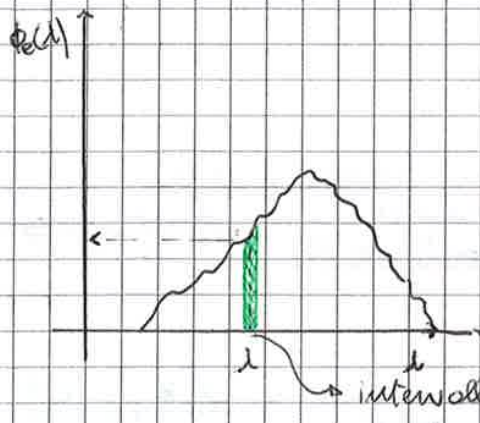
prof. Perino

AA 2014 - 2015

- APPUNTI DELLE LEZIONI
- ESERCITAZIONI
- TRACCE TESINE
  - ILLUMINOTECNICA
  - ACUSTICA
  - IGROMETRIA - TRASMISSIONE DEL CALORE

Alunno ZAGO EDOARDO

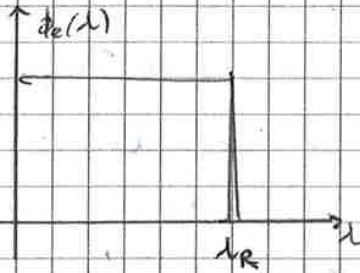
- + 1 SIMULAZIONE D'ESAME
- + SCHEMI RIASSUNTIVI DI TEORIA



Per la luce bianca

Per fem → dista in cui considero il singolo  
percello emesso in lunghezza  $\lambda$

Se considero il flusso della singola radiazione il grafico sarà del tipo



la lampadina → emette energia e  
rilascia luce

$\phi =$  flusso luminoso [lm, lumen]

$\phi(\lambda) =$  il percello emesso intorno a  $\lambda$  emette  
flusso luminoso monocromatico

$\phi_e =$  flusso energetico [W] = watt

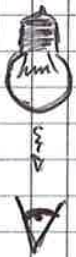
$\phi_e(\lambda) =$  flusso energetico monocromatico

la seconda lampada produce una luce monocromatica gialla e l'ultima  
flu

I flussi in entrata sono energetici monocromatici (o spettrale)  
uscita sono luminosi " " "

con  $\lambda_G = 0,52 \mu\text{m}$   
 $\lambda_B = 0,46 \mu\text{m}$   
 $\lambda_R = 0,72 \mu\text{m}$

tutte e tre le lampadine sono alimentate da potenza di 1W



Un osservatore vede a fronte dello stesso flusso  
energetico che la lampada centrale è (GIALLA)  
luminosa, le altre 2 molto poco

↳ la lampada centrale appare 100 volte +  
luminosa della rossa e 20 volte +  
luminosa della blu

↳ l'occhio umano xcep diverso

Il fatto di prop che lega le due grandezze varia

non si può quindi dire che  $\phi = \text{costante} \cdot \phi_e$

$$\text{ma } \phi(\lambda) = f(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda)$$

il fattore di visibilità è ciò che lega le due  
grandezze (visibilità)  
" "  
 $V(\lambda)$



$N_{MAX}$  per noi è  $683 \frac{lm}{W}$  poiché studiamo la visione diurna.

La luce più utile da 1 punto di vista energetico è la giallo-verde poiché ottengo 683 lumen (max della funzione) per quello  $\lambda$ .

Come calcolo il legame tra flusso energetico e flusso luminoso? prendo la luce bianca.

$\left. \begin{array}{l} \text{spesso nelle camp. monocrom.} \\ \text{mult.} \downarrow \text{assumiamo } \lambda \text{ e sua } v(\lambda) \\ \text{sommo} \downarrow \end{array} \right\} \text{poiché la luce bianca è una miscela di infinite } \lambda$

$$\begin{aligned} \phi(\lambda_1) &= N_{MAX} \cdot v(\lambda_1) \cdot \phi_e(\lambda_1) & + \\ \phi(\lambda_2) &= & + \\ & & + \\ \phi(\lambda_n) &= N_{MAX} \cdot v(\lambda_n) \cdot \phi_e(\lambda_n) & + \end{aligned}$$

$$\phi = \sum_{i=1}^N \phi(\lambda_i) = \sum_{i=1}^N [N_{MAX} \cdot v(\lambda_i) \cdot \phi_e(\lambda_i)]$$

Se i termini tendono all'infinito  $\phi = \int_0^{\infty} \phi(\lambda) d\lambda$

ovvero

$$\phi = \int_0^{\infty} N_{MAX} \cdot v(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) d\lambda \quad \text{FLUSSO LUMINOSO}$$

$$\phi = N_{MAX} \cdot \int_0^{\infty} v(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) d\lambda \quad [lm]$$

$$\phi_e = \int_0^{\infty} \phi_e(\lambda) d\lambda \quad [W] \quad \text{FLUSSO ENERGETICO}$$

Definiamo l'efficienza luminosa  $\eta$  ( $\eta_e$ )

$$\eta = \frac{\phi}{\phi_e}$$

in generale tutte le efficienze sono da calcolarsi come:

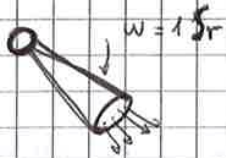
$$\eta = \frac{\text{(Effetto utile)}}{\text{(Spesa per ottenere l'effetto utile)}}$$

In generale efficienza è adimensionale e tra 0 e 1  $\rightarrow$  è un rendimento  
 $\hookrightarrow$  e il valore è dimensionato e può avere val superiore a 1  
 $\hookrightarrow$  bisogna il nome efficienza

Efficienza luminosa  $\eta = \frac{\phi}{\phi_e} \left[ \frac{lm}{W} \right]$  e  $\eta_{min} \rightarrow \eta_{max}$

energetico della sorgente è pari a  $\frac{1}{683} W$

Candela:  $\phi$  lum emesso da sorg. monoc. che emette luce a  $\lambda = 555 \text{ nm}$  all'interno dell'angolo solido ottenuto alla direzione, quando il flusso  $\phi$  è  $= \frac{1}{683} W$



$$\phi_e = \frac{1}{683} W$$

Matematicamente

$$\phi \rightarrow I$$

$$d\phi = I dw$$

$$|\phi = \int I dw$$

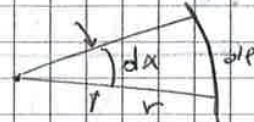
$$\int_{4\pi} d\phi = \int_{4\pi} I dw$$

$$\phi = \int_{4\pi} I dw$$

→ è un integrale doppio poiché è di superficie

↳ grandezza che indica la dirz. del flusso luminoso nello spazio

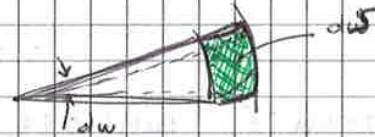
RICORDA: nel piano



$$da = \frac{dP}{r} \rightarrow \text{circonf} = 2\pi r$$

nello spazio

$$dw =$$



$$dw = \frac{dS}{r^2}$$

↳ poiché è una superficie

Sulla sp. completa (sfera)

$$dw = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$$

GRANDEZZE FOTOMETRICHE

$$I [Cd]$$

$$I = \frac{d\phi}{dw}$$

$$\phi [lm]$$

$$\phi = \int_{4\pi} I(w) dw$$

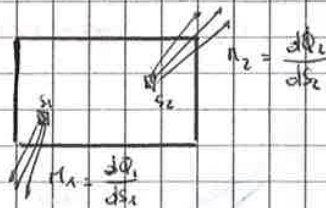
Quando studio la intens. di una SUPERFICIE LUMINOSA → devo introdurre una nuova grandezza

**EMITTENZA (M)**

$$M = \frac{d\phi}{dS_e}$$

con  $S_e =$  superficie emittente

Minore quanto è diversa la capacità di emettere luce in diverse direz.





$$\Phi_a = \Phi_a + \Phi_r + \Phi_t \quad \text{divido tutto per } \Phi_i$$

$$\frac{\Phi_a}{\Phi_i} = \frac{\Phi_a}{\Phi_i} + \frac{\Phi_r}{\Phi_i} + \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$$

$$\alpha_L = \frac{\Phi_a}{\Phi_i} = \text{coefficiente di assorbimento luminoso}$$

↳ pedice  $L$  per quel pezzo di radiaz. em. che diciamo luce

$$\rho_L = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} = \text{coefficiente di riflessione luminosa}$$

$$\tau_L = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = \text{coefficiente di trasmissione luminosa}$$

Sostituendo

$$\alpha_L + \rho_L + \tau_L = 1$$

Conseguenza della conservazione dell'energia

↳ coefficienti che dipendono dai materiali

### CASI PARTICOLARI

$$\tau_L = 1 \quad \alpha_L = \rho_L = 0$$

mezzo trasparente ideale (se invisibile → trasmette tutto)

$$\rho_L = 1 \quad \alpha_L = \tau_L = 0$$

specchio/ riflettore ideale

$$\alpha_L = 1 \quad \rho_L = \tau_L = 0$$

corpo nero (tutto il flusso è assorbito)  
↳ corpo ideale che assorbe qualunque radiaz. elettromagnetica

$$\tau_L = 0 \Rightarrow \alpha_L + \rho_L = 1$$

materiali opachi

$$\tau_L + \alpha_L + \rho_L = 1$$

materiali trasparenti reali

$$\tau_{\text{vis}} = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$$

↳ perché pedice  $L$ ?

pedice  $L$  lo faccio in riferimento a tutte le  $\lambda$  tali che  $0,38 \leq \lambda \leq 0,78 \mu\text{m}$

↳ il concetto di opaco e trasparen. dipende dalla  $\lambda$  e cui faccio riferimento (noi riferiamo al visibile)

quindi

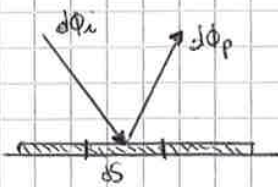
$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

vale sempre, ma i singoli valori dipendono dalle  $\lambda$  e cui li considero

pedice  $L$  = si riferisce al fatto che la  $\lambda$  considerata è  $0,38 \leq \lambda \leq 0,78 \mu\text{m}$

$$\text{quindi in generale } \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$$

↳ intero  $\times$  lo chiama  $L$



no che  $\rho_e = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i} \Rightarrow \Phi_r = \rho_e \cdot \Phi_i$

$d\Phi_r = \rho_e d\Phi_i$

$M = \frac{d\Phi_r}{dS} = \rho_e \frac{d\Phi_i}{dS}$

per definizione l'illuminamento della superficie dS:

$E = \frac{d\Phi_i}{dS_{inc}} = \frac{d\Phi_i}{dS}$

$L = \frac{M}{\pi} = \frac{\rho_e \cdot E}{\pi} \Rightarrow L = \frac{\rho_e \cdot E}{\pi}$

valgono per superfici lambertiane

$M = \pi L$

mentre vale in generale  $M = \rho_e \cdot E$

NON FACE PAR 1.3 (COLORIMETRIA)

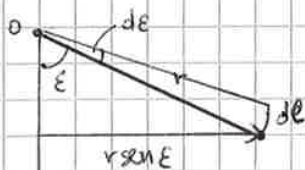
LEGAME TRA ANGOLO SOLIDO E ANGOLO PIANO

↳ c'è sempre 1 prob. di relazione e rapp. tra 1 angolo solido e due angoli piani

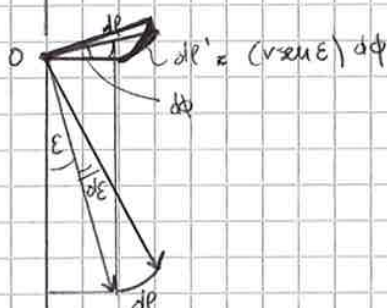
ad es

$\phi = \int_{4\pi} I(\omega) d\omega = \iint_{\substack{\omega \\ E, \varphi}} I(E, \varphi) dE d\varphi$

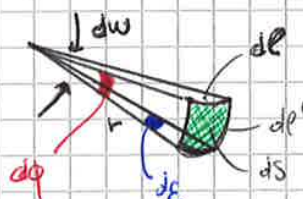
legame ?



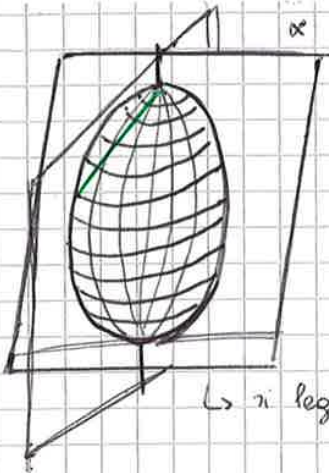
faccio motore di angolo infinit. il a rispetto e otteniamo  $dE = r d\epsilon$



quindi ciò che succede è







l'intersezione tra solido e piano  $x$  è detta **indicatrice di emissione**

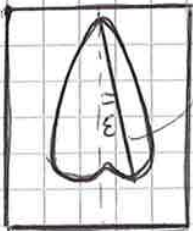
↳ generalmente ne bastano 2  $x$  rappresent. fedelmente  $f(\epsilon, \varphi)$

↳ la legge di intensità su un piano piano

tutte le indicatrici  $\rightarrow$  sono curve rappresentabili sul piano  $z=0$  e si mette di leggere l'int. del vettore intensità

↳ generalmente forniti dai costruttori di apparecchi  $\rightarrow$  generalmente su piani  $I$

caso 1 indicatrice



$I(\epsilon)$

**CASO PARTICOLARE**

Se il solido fotometrico è un solido di rotazione

↳ qualsiasi piano  $x$  l'ome del sistema curva di emissione

**SOLIDO DI ROTAZIONE**: è sufficiente una sola indicatrice di emissione per caratterizzare completamente il comportamento dell'apparecchio

• In generale  $I = I(\epsilon, \varphi)$

• Solido fotometrico di rotazione  $I = I(\epsilon)$

• Solido fotometrico sferico  $I = \cos \epsilon = I_0$   
 $\forall \epsilon, \varphi$



Nota  $I$ , se voglio determinare  $\varphi$

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad \varphi = \int_{4\pi} I(\epsilon, \varphi) d\omega = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} I(\epsilon, \varphi) \sin \epsilon d\epsilon d\varphi$$

rotazione attorno all'ome

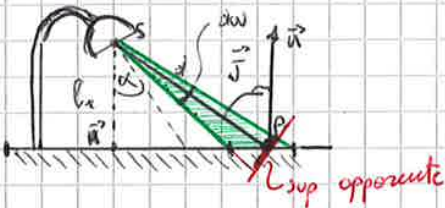
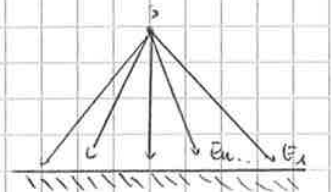
**CLASSIFICAZIONE SORGENTI LUMINOSE**

**Sorgente puntiforme**: quando tutte e tre le dimensioni hanno la stessa distanza dal piano utile

Bulbo  $\rightarrow$  se la distanza  $s_p$  è  $\gg$  delle dim. della sorgente questa si dice puntiforme  
↳ come se tutta la luce provenisse da 1 pto geometrico

**SORGENTI PUNTI FORMI**

**ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE DI ESTERNI**



Calcolo di illuminamento in un punto

Nota l'indicatrice di emissione di  $I(\epsilon, \varphi)$

$\alpha$  = angolo di illuminazione dell'axe della lampada

Quanto vale  $E$  in un punto generico  $P$ ?

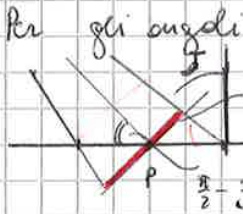
$\overline{SP} = d$  metri

Quanto vale  $E_p = ?$

Da def di  $E \rightarrow E_p = \frac{d\Phi}{ds}$  ←  $\Phi$  e cons. sulla sup  $ds$  significa cons. quella parte di flusso compresa nell'angolo solido verde

So che  $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$   $\Rightarrow d\Phi = I d\omega$  sostituendo  $E_p = \frac{I d\omega}{ds}$

espresso l'illuminamento in funzione della direzione



$ds_{app} = ds \cos \gamma$

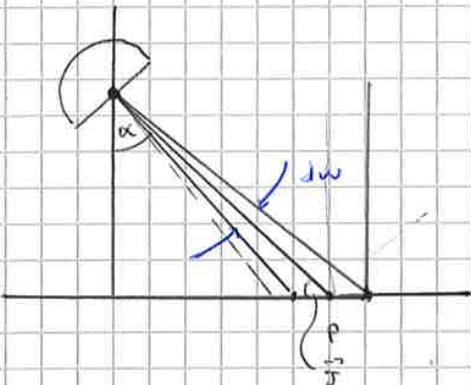
$d\omega = \frac{ds_{app}}{d^2} = \frac{ds \cos \gamma}{d^2}$

con  $\gamma$  angolo di incidenza

$\overline{SP} = d \rightarrow E_p = \frac{I ds \cos \gamma}{ds \cdot d^2}$

$E_p = \frac{I(\epsilon, \varphi) \cdot \cos \gamma}{d^2}$

L'illuminamento nel punto P dovuto ad una sorgente puntiforme



VEDI RELAZIONI FRA ANGOLI

**CASO PARTICOLARE**

Asse della lampada verticale

$\hat{\alpha} = 0 \rightarrow \hat{j} = \hat{\epsilon}$

$\Rightarrow$

$E_p = \frac{I(\epsilon, \varphi) \cos \epsilon}{d^2}$



**COEFFICIENTE DI UNIFORMITÀ GENERALE**

$$u_g = \frac{E_{MIN}}{\bar{E}} = \frac{L_{MIN}}{\bar{L}}$$

↳ solo per superfici lambenti

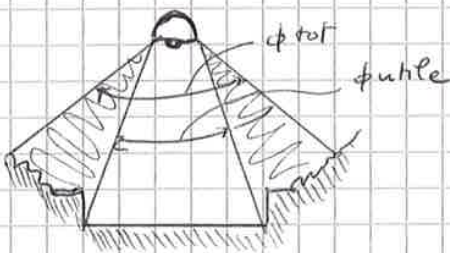
**COEFF. DI ILLUMINAMENTO LONGITUDINALE**

$$u_L = \frac{E_{MIN}}{E_{MAX}}$$

$u_g, u_L \geq$  valori raccomandati (tabella 3.1)

**COEFFICIENTE DI UTILIZZAZIONE**

$C_u$  verifica l'efficienza di utilizzo dell'apparecchio luminoso



$$C_u = \frac{\phi_u}{\phi}$$

(rendimento)  $\hookrightarrow$  tra 0 e 1

↳ ulteriore indice di ottimizzazione di un progetto

$$\phi = \int_{4\pi} E(\omega) d\omega = \iint_{\Omega} E(\epsilon, \varphi) \sin\epsilon d\epsilon d\varphi$$

con  $\bar{E} = \frac{1}{S_u} \int_{S_u} E ds$   
 su utile

quindi  $S_u \cdot \bar{E} = \int_{S_u} E ds$

$E = \frac{d\phi_u}{dS_u} \Rightarrow$  flusso utile

$$\int_{S_u} d\phi_u = \int_{S_u} E dS_u$$

$$\phi_u = S_u \cdot \bar{E} \rightarrow \text{calcolo del flusso utile (SOTTOSUMATO)}$$

Non si può ignorare il decadimento delle condizioni dell'apparecchio, per cui l'intero impianto va **SURADIMENSIONATO** così da garantire una buona efficienza per più tempo

$C_u = \frac{\bar{E} \cdot S_u}{\phi_{MD}}$   
 ↳ coefficienti correttivi

- di **deprezzamento** (0,35 - 0,90) degrado della sorgente
- di **manutenzione** (0,55 - 0,90) degrado dell'apparecchio

$\phi = \frac{\bar{E} \cdot S}{C_u \cdot MD}$  } calcolo di progetto  
 ↳ non è noto a priori



V: non tabelle che in fz. dell'illuminamento, della geometria locale,  $\rho_e$  pareti e rifletto favoriscono valori di  $\eta$

### SORGENTI LUMINOSE

generalmente  $\eta = \frac{\text{EFFETTO UTILE}}{\text{SPESA}} = \left[ \frac{\text{lm}}{\text{W}} \right]$  è l'efficienza luminosa ma è adimensionale e nemmeno compreso tra 0 e 1

$$\eta = \frac{\phi}{\phi_e} = \frac{N_{\text{max}} \int_0^{\infty} v(\lambda) d\epsilon(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi_e(\lambda) d\lambda}$$

### TIPICA DOMANDA D'ESAME

ha il valore max per  $v(\lambda) = 1$  ( $\lambda = 0,555$ )  
 eff. luminosa è max  $\rightarrow$  una sola  $\lambda$  di banda  
 e vale  $\approx 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$

### EFF. LUMINOSA DI SORGENTI NATURALI

- Sole
- Volta celeste (riflette luce solare)  
 $\rightarrow$  caratterizzato da  $\eta = \frac{\phi}{\phi_e}$

### per SORGENTI ARTIFICIALI

$\eta = \frac{\phi}{W} \rightarrow$  flusso energetico elettrico  $\approx \phi_e$  ma tiene conto del fatto che non tutta l'elettricità è emessa dalla lampada

$\Rightarrow$  parte è dispersa col riscaldamento della lampada

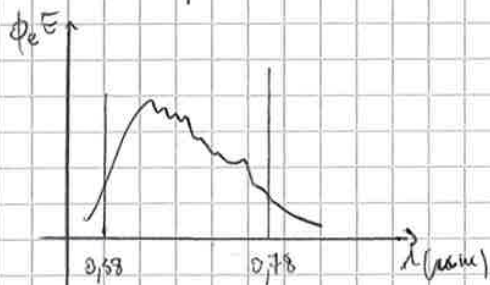
### TRASMISSIONE DEL CALORE

- IRRADIAZIONE anche in assenza di atmosfera
- CONVEZIONE (liquidi) (fluidi + solidi)
- CONDUZIONE (solidi)

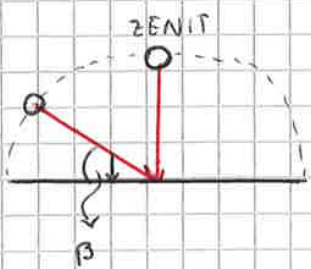
lampadina saldota  $\rightarrow$  fa irraggiamento + convezione

quella curva  $\times$  irraggiamento è il flusso energetico integrale (con la componente  $\times$  convezione il flusso diminuisce)

IRRAG. NATURALE - SOLE  $\rightarrow$  emette  $\times$  irraggiamento ha uno spettro di emissione



vediamo solo parte dell'emissione



• **radiaz. diretta (normale alla sp)**

Quando scende il sole diminuisce la comp. normale  
 Inoltre → la massa d'aria da sp. quando il sole  
 è basso è > → risente maggiormente dei fenomeni  
 atmosferici

$$\eta_l = \frac{1}{\sin \beta}$$

come varia

coefficiente di  
 massa di aria

Massima eff. luminosa del sole  $100 - 120 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$

**SORGENTI LUMINOSE ARTIFICIALI**

Divide in • **INCANDESCENZA**

↳ ad **ALOGENI**

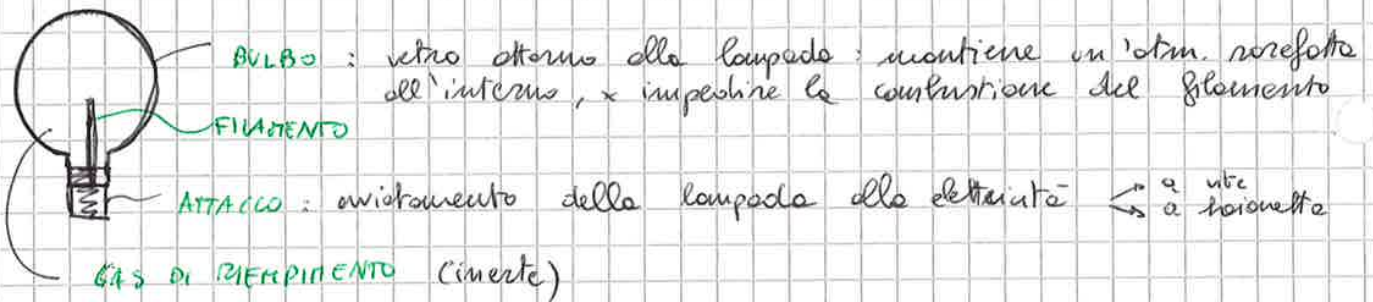
• **FLUORESCENTI**

↳ **luminescenti**

• **LED - OLED**

**INCANDESCENZA**: sorgenti a bassa efficienza luminosa

↳ a ridv. di consumi sono state vietate alla  
 vendita dal 2012



**BULBO**: vetro attorno alla lampada: mantiene un'atm. sovrappiù all'interno, e impedisce la combustione del filamento

**ATTACCO**: avvitamento della lampada alla elettricità ↔ a vite o a baionetta

**GAS DI RIEMPIMENTO** (inerte)

**FILAMENTO**: 1<sup>a</sup> lampadine (Edison) con filamento in nichelino, con vita molto breve  
 ↳ successivamente filamenti in **Tungsteno** con fusione a 3300 K

Poiché il flusso emesso all'aumentare di T aumenta  
 ↳ e la T è alta meglio è

Scambio per irraggiamento → varia con  $T^4$

Filamento → funziona come resist elettrico secondo la legge  $Q = RI^2$   
 ↳ si riscalda ed emette per **effetto joule**



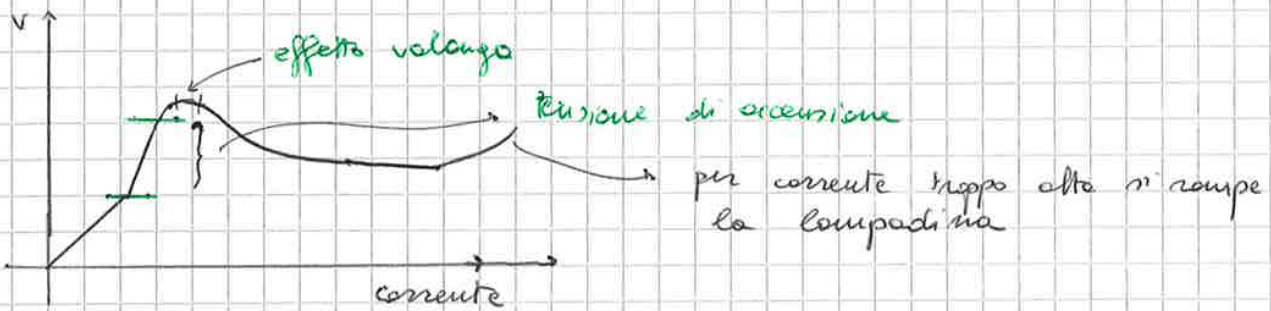
è spostato nella **banda di lunghezza** + alta x l'urto

→ ridiscendendo emette un **fotone**  
 colore che dipende da tipo di gas e tipo di banda di lunghezza

Fenomeno di **effetto volanga**

↳ si sviluppano urti e cascate e si ottiene una luce che copre un intero spettro

grafico tra tensione fornita e anodo e catodo e **corrente di scarica**



Per raggiungere il picco si usano 2 metodi: **elettrodo aggiuntivo** e uso di **starter**

Lampade fluo → 1° fase di ASSESTAMENTO DI TENSIONE

**LUMINESCENTI** → hanno all'interno dei gas con proprietà particolari (generalmente vapori di **sodio/mercurio**)

↳ assorbe e riemette la radiazione  
 ↳ amalfato il fuori del visibile e lo riemette all'interno del visibile  
 aumenta l'emissione e centra lo spettro nel visibile

! **PROBLEMA** → fluorescenti → colori freddi  
 luminescenti → alte efficienza  $\eta = 100 - 110 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$

↳ non emettono delle ~~l~~ luci gialle, arancioni, ma in ambienti interni non vanno bene  
 usate x **illuminazione stradale** (andate dl, non belle, poco costo)

Fluorescenti  $\eta = 40 - 75 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$

**TECNOLOGIA LED** anni 60-70 in ambito elettronico - informatico  
 ↳ non, poi verde

non hanno troppa di illuminazione



# MISURA E CALCOLO DI ILLUMINAMENTO DI INTERNI (NATURALE)

↓  
 ↳ approssimazione o opera non terminata  
 ↳ opera finita

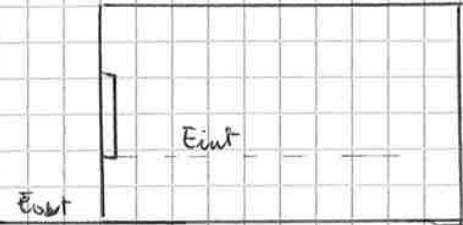
$$E = E_{ext} + E_{int}$$

$E_0$  è l'illuminamento sul piano orizzontale

↳ splanometro → misura l'ill. naturale

La diff tra interno e ext sarà quello filtrato dalla finestra

↳ illuminamento orizzontale in un punto dell'ambiente interno



FLD (fattore ~~illuminamento~~ ~~interiore~~) **luce diurna**

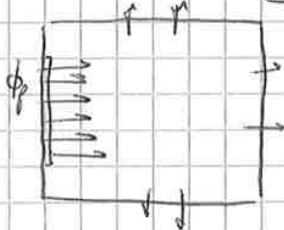
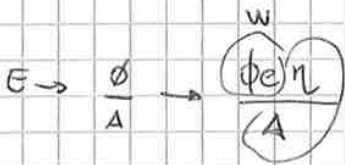
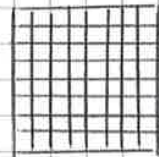
$$= \frac{E_i}{E_0} \quad ! \quad \begin{matrix} E_i \text{ dipende da FLD, non } \\ E_0 \text{ contrario!} \end{matrix}$$

Considerata una area  
 ↳ per calcolare FLD  
 ↳ fatto su area e trova FLD medio come media aritmetica di tutti gli FLD

illuminamento oriz. all'esterno

$$FLD_m = \overline{FLD}$$

$$\frac{\sum E_i}{\sum E_0}$$



flusso entrante dalla finestra  
 ↳  $\phi_f$

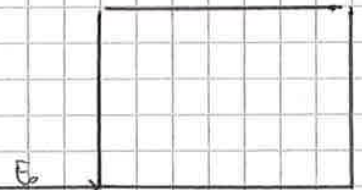
flusso uscente: quello trasmesso e assorbito dalle pareti, + quello riflesso

dipende dal colore delle pareti (pareti opache, lucide) dove variano i coefficienti di riflessione...

Dobbiamo calcolare il bilancio energetico tra flusso entrante e uscente

$$\Phi_{ENTRANTE} = \Phi_{USCENTE}$$

All'esterno è presente un  $E_0$  (calcolato o misurato)



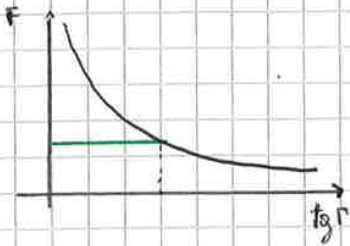
$$E_p = E_0 \cdot F$$

$$\phi_p = E_p \cdot A = E_0 \cdot F \cdot A$$

↳ area pareti / complessive

$$\phi_r = \phi_p \cdot \psi \cdot Z = E_0 \cdot F \cdot A \cdot \psi \cdot Z$$

Esistono grafici che danno il valore di F in funzione dell'angolo  $\Gamma$

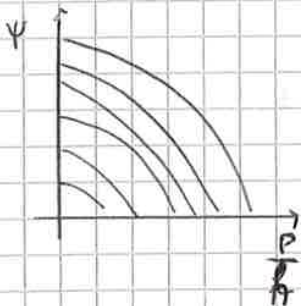
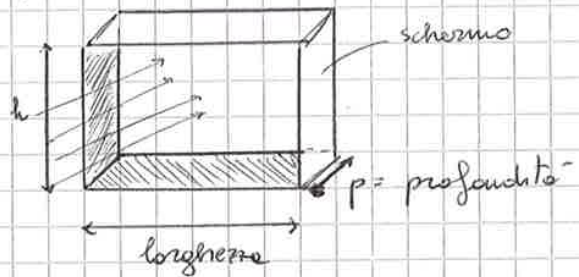


$$F = \frac{1 + \cos(\Sigma + \Gamma)}{2} + \underbrace{\rho_t}_{\downarrow} \frac{1 + \cos(\Sigma + \Gamma)}{2}$$

ricorda che l'illuminazione non arriva sempre e solo dal cielo ma può dipendere da fattori a terra (neve → effetto albedo) si aggiunge il fattore correttivo

↳ potere riflettivo

$\Psi$  → come det. questo fattore  
↳ fattore riferito alle finestre orientate (schermo solare)



→ valori già tabulati in tabelle

$\Psi$  funzione di **profondità, altezza, length**

Valori tabulati anche di FLD

FLD in case > 2%  
FLD in scuole > 3%



e lo possono fare solo in direzione dell'aria

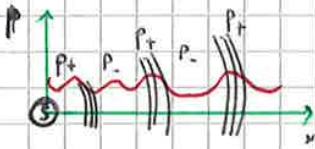
↳ xx la sfera è rigida

$dT + dT$

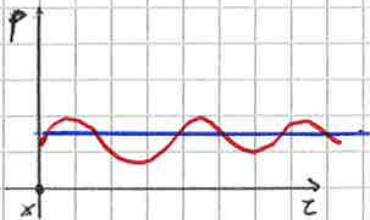
↓ prima espansione  
 ↓ seconda espansione

↳ molecole del secondo strato di aria che si espandono

Nel tempo si crea quindi una sequenza di perturbazioni successive  $p^+$  e  $p^-$  (quando la sfera si contrae si creano **depressioni**)



e misuro la pressione in distanze radiali (scopo che l'andamento è **OSCILLANTE** (colle partizione))



ho generato un' **ONDA ELASTICA**

Il suono è quindi una **ONDA DI PRESSIONE** che si propaga in un mezzo elastico

$$p = p(t)$$

la pressione dell'onda si somma algebricamente alla pressione standard dell'aria (che c'è sempre)

in acustica si usa infatti generalmente la **variazione di p** rispetto a quella atmosferica

$$\Delta p(t) = p(t) - p_0$$

dove  $p_0 = 101325 \text{ Pa}$

e a fronte di questa  $\Delta p(t) \sim 10^{-6} \div 10 \text{ Pa}$



Considerando la particella, questa si muove alternativamente in una direzione e nella opposta

si affianca questo fenomeno a quello delle pressioni

$u(t)$  = velocità di oscillazione della particella (che varia le altre e viene trasmesse)

$u(t) \left[ \frac{m}{s} \right]$  **velocità di oscillazione**

Fen acustico → cost. da   
 ↗ un'onda di **pressione**  
 ↘ un'onda di **velocità di oscillazione**



$R^*$  dipende ed è funzione di  $R$   
 e  $R^* = 287 \frac{J}{kg \cdot K}$  per l'aria

$\gamma =$  esponente della isoterma

$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \gamma = 1,4$  aria      con  $C_p =$  calore specifico a  $p$  costante  
 $C_v =$  " " " " "  $v$  costante

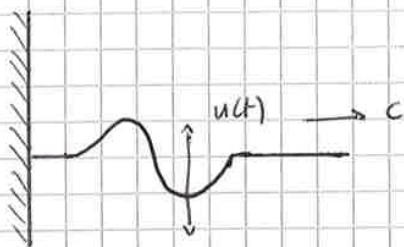
oppure che a  $20^\circ C$  ( $293 K$ )  $\Rightarrow$

$$c \approx 343 \text{ m/s} \approx 340 \text{ m/s}$$

Velocità di prop. cambia molto in base al materiale in cui si propaga

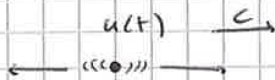
Acustica  $\rightarrow$  deve tener conto del mezzo in cui lo stiamo studiando

**ONDE ELASTICHE**



la  $v$  di propagazione è  $\perp$  alla direzione di oscillazione

$\rightarrow$  onde **trasversali**



la  $v$  di propagazione è "alla"

$\rightarrow$  onde **longitudinali**

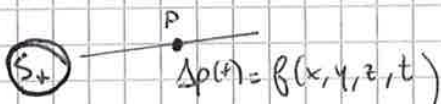
- (a) mezzo perfettamente elastico
  - (b) mezzo continuo
  - (c) mezzo omogeneo
- } condiz. di esp. nell'aria \*

l'espressione che relaciona  $c$  e  $p$  è

$$\nabla^2 \Delta p(t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Delta p(t)}{\partial t^2}$$

con  $\nabla^2 =$  laplaciano

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$



lo studio si dice in un punto  $P$  come varia la pressione nel tempo

$\rightarrow$  eq. diff. del II ordine complete

Densità sonora

$$U = \frac{dE}{dV} = \frac{Wdt}{dV}$$

$$\left[ \frac{J}{m^3} \right]$$

se l'onda è piana e c'è solo la componente diretta  
spazio percorso =  $cdt$

$$dV = S c dt$$

$$dE = IS dt \quad \text{quindi}$$

$$U = \frac{dE}{dV} = \frac{I}{c} = \frac{P^2}{\rho c^2}$$

suono puro: caratterizzato da una

frequenza ben precisa

con \*

$$\omega = 2\pi f$$

pulsazione

\*

$$\omega f = \frac{1}{T}$$

frequenza

\*

$$\lambda = cT$$

lunghezza d'onda

\*

$$c = \lambda f$$

Se il suono è distr. con continuità su tutte le frequenze

↳ si divide lo spettro in bande d'ottave  
caratterizzate dalla frequenza centrale o nominale

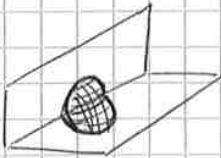
$$f_c = \sqrt{f_1 f_2}$$

Bande in ennesimi di ottave

$$f_2 = 2^{\frac{1}{n}} f_1$$



3) Angolo

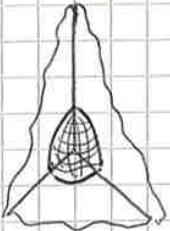


$$Q_0 = d$$

$$I = \frac{W}{4d^2}$$

Sostanzialmente  $Q_0$  ci dice quale posizione di sfera dobbiamo considerare

d) Spigolo



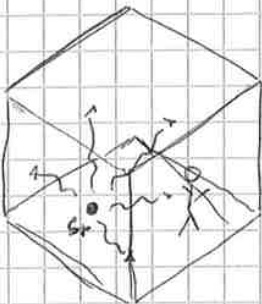
$$Q_0 = 8$$

Ci sono casi in cui un campo chiuso può essere assimilato ad un campo libero

↳ le pareti assorbono completamente le onde sonore quindi l'ascoltatore percepisce solo la sorgente (no riflessione)

↳ camera ANECHOICA

! Per studiare devo usare le equazioni del campo libero



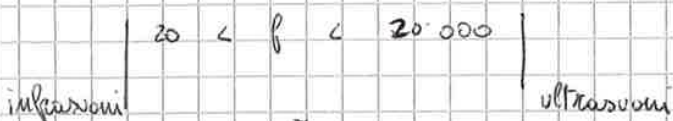
ACUSTICA FISIOLOGICA

1) Orecchio umano sensibile a vibrazioni tra

$$20 < f < 20000 \text{ Hz}$$

{ gamma dell'udibile }

$$\text{con } H_0 = \left[ \frac{1}{5} \right]$$



campo medio (20 tutta la popolazione anche vecchia)

↳ perdono le gamme basse

d) si introduce il concetto di livelli

Dato una generica grandezza  $x$ , si definisce livello di  $x$

LIVELLO DI  $x$

$$L_x = 10 \log \frac{x}{x_0}$$

con  $x_0$  = valore di riferimento convenzionale

Decibel [dB]

Nell'acustica  $\rightarrow$  percezione legata al log di un rapporto  
 $\hookrightarrow$  conviene usare direttamente i livelli

LIVELLI SONORI

$L_p$  = livello di pressione

$L_i$  = livello di intensità

$L_w$  = livello di potenza

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

con  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$  (con soglia di udibilità a 1000 Hz)  
 $\downarrow$   
 scelte convenzionalmente

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$$

$W_0 = 10^{-12} \text{ W}$

$\hookrightarrow$  NON significa nulla

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

soglia di udibilità a 1000 Hz

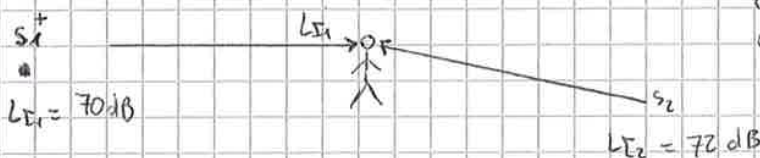
\* In campo libero

$L_p \approx L_I$

$$L_p = 10 \log \frac{\frac{p^2}{\rho c}}{\frac{p_0^2}{\rho c}} = 10 \log \frac{I}{I_0} = L_I$$

IMPORTANTE I livelli NON si possono sommare, ma si devono comporre  
 Si possono sommare solo le  $I$  (o  $p^2$ ) e le  $W$

Esercizio



Qual'è il livello totale con entrambe le sorgenti accese

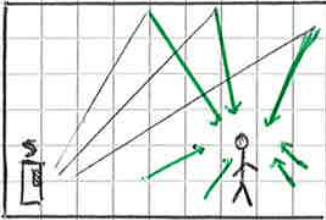


Linee ISOPHON  $\rightarrow$  linee a uguale sensazione  
uditiva

$\hookrightarrow$  dove esse presentano il minimo si ha  
la massima sensibilità uditiva  
(ovè necessario il livello di pressione sonora  
più basso per produrre la stessa sensazione)

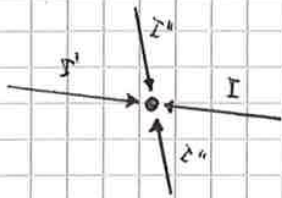


Max sensazione uditiva per  $3 \div 4$  kHz x tutte le linee



$I_{inletta} = 0$

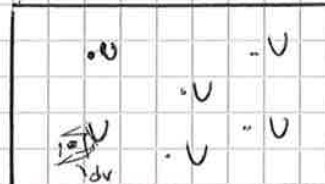
↳ le riflessioni sono molte di più delle onde dirette e provengono da tutte le direzioni, mentre quelle dirette seguono una determinata **direzione**



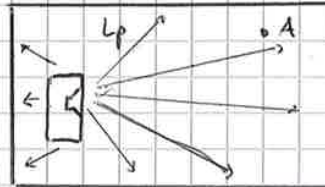
$U = \frac{dE}{dv}$

è la **densità di energia sonora** che risulta uniforme in tutto il volume

$I_{inletta} = \varnothing$



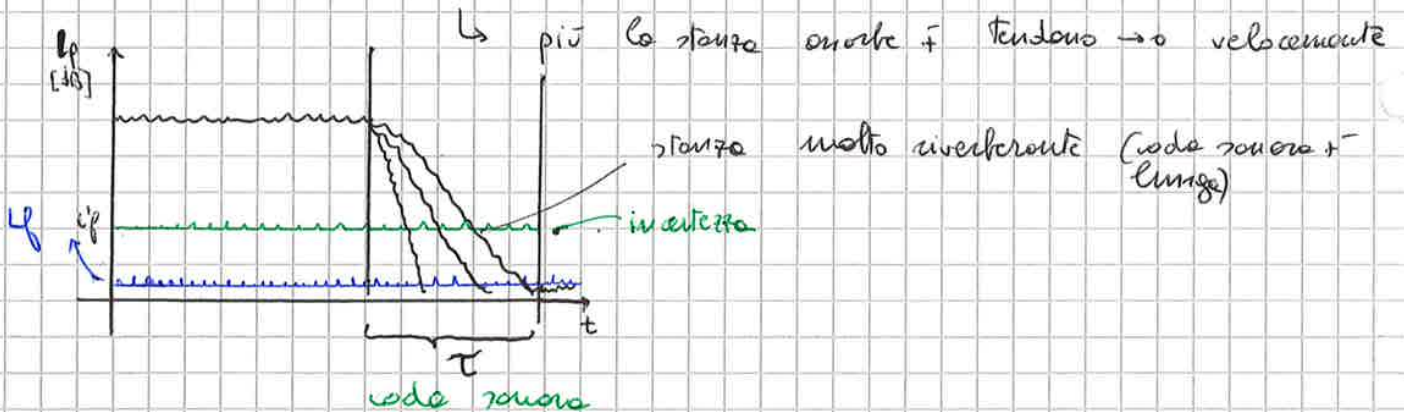
Esperimento: abbiamo una cone che emette a una certa potenza, cerchiamo di misurare il livello in fz. del tempo che viene percepito da un ascoltatore (A)



Se  $T = 0$  (più la cone e il livello scende vicino allo  $\varnothing$  (succede solo in campo libero))

↳ non a  $\varnothing$  ma è sempre presente un **livello di fondo** dovuto all'ambiente

Invece in campo riverberato le onde continuano a riflettersi



Come si calcola la coda sonora?

Si valuta convenzionalmente di "misurare" la coda sonora prendendo come riferimento una diminuzione del livello di pressione di **60 dB**

! Def **Tempo convenzionale di riverberazione** ( $\tau_{60}$ )

tempo necessario perché il livello sonoro decresca di 60 dB, o perché la densità di energia sonora si riduca di un milione di volte



## Dimostrazione della formula di Sabine

Parte della conservazione dell'energia

regime **transitorio**: grandezze che variano nel tempo  
 regime **stazionario**: " " sono costanti nel tempo

↓  
 in regime <sup>non</sup> stazionario bisogna modificare il principio di conservazione della massa

→ penso a un palloncino che si sgonfia



↓  
 varia la massa interna nel tempo

quindi dobbiamo considerare la variazione di massa

$$\frac{\partial M}{\partial t}$$

↓ applicato alla conservazione della massa dove

$$M_{in} = M_{out}$$

$$M_{out} - M_{in} = \frac{\partial M}{\partial t}$$

principio di conservat. della massa nel caso  $\neq$  generico possibile

Stessa storia per la

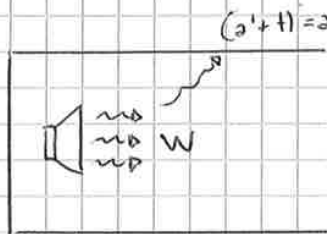
**potenza**

↓  
 legata a forma di **energia**

$$P_{out} - P_{in} = \frac{\partial E}{\partial t}$$

variazione dell' **energia nel tempo**

Applicando all' acustica



$$P_{IN} = W$$

la  $P_{out}$  = potenza sonora emessa

$$W_a = \rho_m \cdot W_i$$

↓  
 potenza **incidente**

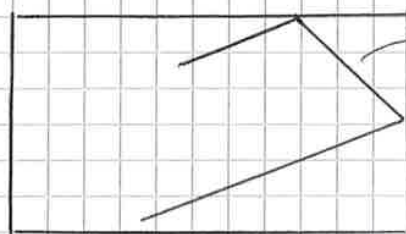
$$\text{quindi } W - \rho_m \cdot W_i = \frac{dE}{dt} = \frac{d(V \cdot U)}{dt}$$

$V$  è costante nel tempo

$$W - \rho_m \cdot W_i = V \frac{dU}{dt}$$

equazione di **conservazione dell'energia sonora** nell'ambiente

Supponiamo che:



i **componenti** dell'onda sono diversi

↓  
 statisticamente si calcola il **componente medio**

In una camera anecoica  $\tau_{60} = \phi S$  → e invece lo calcolo con Sabine  
 $\alpha_m = 1$  viene il valore diverso

Formula Sabine → funziona bene per sale fortemente riverberanti  
 ↓ se le stanze sono assorbenti

FORMULA DI EYRING  $R = \frac{A_{tot}}{1 - \alpha_m}$  → costante acustica della sala

$$\tau_{60} = 0,163 \frac{V}{R}$$

! conviene usare Sabine fino a valori di  $0,7 = \alpha_m$  !

Dobbiamo trovare criteri per capire se il  $\tau_{60}$  va bene o no

↳ non deve essere né troppo corto né troppo lungo

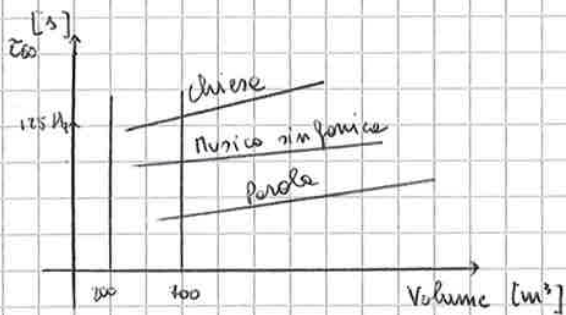
↓  
 qual' è il valore ottimale? → ci sono tabelle ricavate empiricamente

$\tau_{ottimale} @ 1000 \text{ Hz} = N \sqrt[3]{V}$  con  $N =$  costante che dipende dalla destinazione d'uso

$V =$  volume [ $\text{m}^3$ ]

$N = 0,3 \div 0,4$  per il parlato

$N = 0,5 \div 0,8$  " " musica



valori tabulati da  $\tau_{60}$  [s] da 500 Hz a 2000 Hz

Diagramma ben applicabile su grandi ambienti

↳ x ambienti + piccoli si usa il valore di riferimento  $N \sqrt[3]{V}$

↓  
 esistono grafici che mi danno il rapporto tra  $\tau_{ott}$  e i dati frequenza e il  $\tau_{60}$  a 1000 Hz.

Se considero la relazione  $\tau_{60} = 0,163 \frac{V}{A_{tot}}$

↳ qui dentro si nasconde un legame di  $\tau_{60}$  con la frequenza e  $A_{tot}$  dipende da tante a diverse



substituisce

$$I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

$$W_0 = 10^{-12} W$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{W}{I_0}$$

numericamente

(fisicamente è sbagliato per le grandezze)

$$= 10 \log \frac{W}{W_0} + 10 \log \frac{Q_0}{4\pi} - 10 \log d^2 =$$

$$= L_W - 10 \log \frac{4\pi}{Q_0} - 20 \log d$$

quindi  $L_I = L_p = L_W - 10 \log \frac{4\pi}{Q_0} - 20 \log d$

Campo PERFETTAMENTE RIVERBERERATO

$$L_p = L_u = 10 \log \frac{U}{U_0} = 10 \log \frac{4W}{c A_{tot} U_0}$$

$$U = \frac{4W}{c A_{tot}}$$

$$U_0 = \frac{P_0^2}{\rho c^2}$$

applicando relazioni di logaritmi

$$= 10 \log \frac{W}{c A_{tot}} + 10 \log \frac{4}{A_{tot}} = 10 \log \frac{W}{c A_{tot}} + \overbrace{10 \log 4}^{6,02} - 10 \log (A_{tot})$$

se  $L_0$  questo prodotto numerico.  $W_0$  da di nuovo =  $10^{-12} = W_0$

$$= L_p + 6 - 10 \log A_{tot}$$

↳ in campo perfettamente riverberato ho:

$$L_p = L_W - 10 \log A_{tot} + 6 \quad [dB]$$

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{W/A_{tot}}{I_0} - 10 \log A_{tot}$$

$$L_I = L_W - 10 \log A_{tot} = L_p - 6$$

Campo SEMI-RIVERBERERATO

Si comporta quasi da c. perf. in  $\rightarrow$  lontano dalla sorgente  
c. libero  $\rightarrow$  in pross. della sorgente

$$L_p = L_W + 10 \log \left( \frac{Q_0}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

è + prof che si trovano in 1 campo x. fetto. riverberato

oppure  $A_{tot}$

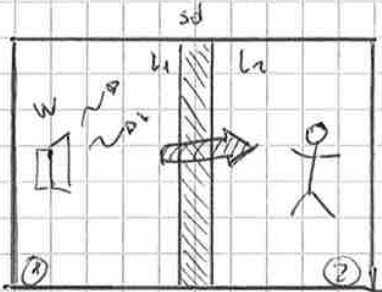
↳ addendo che tiene conto di riflessione uguale diretto

introduciamo la costante  $R =$  potere FONOISOLANTE del tronzo

(valuta la "fonte" di 1 tronzo nell'isolare acusticamente i amb.)

$$R = 10 \log \frac{1}{t} \text{ [dB]}$$

si usa  $\frac{1}{t}$  x m è sempre o t c i quindi il log viene  $\rightarrow$



$A_2 =$  potere fonoassorbente dell'ambiente disturbato  
Hp. il campo è x f e t t. riverberato sia in (1) sia in (2)

$$\Delta L = L_1 - L_2$$

$$L_2 = 10 \log \frac{U_2}{U_0}$$

$$U_2 = \frac{4W_2}{CA_2} = \frac{4W_T}{CA_2}$$

dalla def. di coeff. di trasmissione  $t \rightarrow t = \frac{W_T}{W_i} \rightarrow W_T = t W_i$

potenza incidente sul tronzo

$$I_1 = \frac{W}{A_1} \text{ per definizione di } I = \frac{dW}{dS}$$

quindi 
$$\int_{W_i} dW = \int_{S_d} I dS \Rightarrow W_i = I S_d$$

costante sup. alla superficie

la potenza incidente sul tronzo è solo una parte della potenza emessa

quindi sostituendo  $W_T = I \cdot S_d \cdot t$

peranto 
$$L_2 = 10 \log \frac{4W_T}{CA_2} = 10 \log \left( \frac{4 \cdot I \cdot S_d \cdot t}{CA_2} \right)$$

poiché  $v = \frac{c}{\lambda} \rightarrow \frac{4I_1}{c} = U_1$

$$= 10 \log \left( \frac{U_1}{U_0} \frac{S_d}{A_2} \cdot t \right) = \underbrace{10 \log \left( \frac{U_1}{U_0} \right)}_{L_1} + 10 \log \frac{S_d}{A_2} + 10 \log t$$

$$L_2 = L_1 + 10 \log \frac{S_d}{A_2} + 10 \log t$$

quindi 
$$L_1 - L_2 = -10 \log \frac{S_d}{A_2} - 10 \log t$$

$$L_1 - L_2 = 10 \log \frac{1}{t} - 10 \log \frac{S_d}{A_2}$$

$$L_1 - L_2 = R - 10 \log \frac{S_d}{A_2} = R + 10 \log \frac{A_2}{S_d}$$

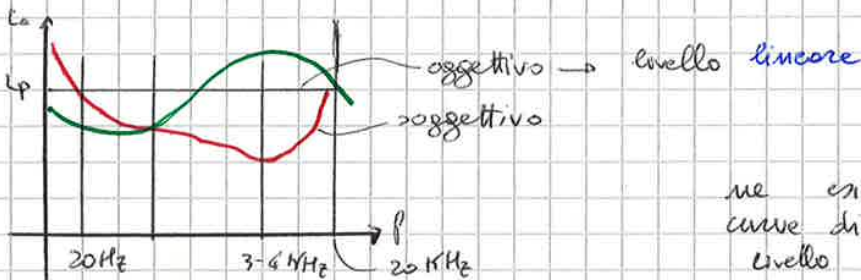


fare che  $\sum_{i=1}^n (I_i - R_i) < 12 \text{ dB}$  e  $(I_i - R_i)_{\text{max}} < 5 \text{ dB}$

↳ dopo che la curva è stata tralata prendo il valore della curva a 500 Hz come indice di valutazione

**CRITERI DI VALUTAZIONE DEL RUMORE**

- ① Valutazione di  $W$  emessa dalla sorgente
- ② Distribuzione della  $W$  nello spazio ( $Q_0$ )
- ③ Valutazione della distribuzione della potenza (e dei livelli di pressione) alle varie frequenze
- ④ "Filtrare" i dati del ~~rumore~~ al punto c con la curva di sensibilità dell'occhio umano



livello rumore pesato o ponderato

ne esistono  $\neq$  che si riferisce a curve di ponderazione  $\neq$  livello A (curva dell'audiogramma o  $\infty$  non) " " B " " C

è il + usato (dal punto di vista ingegneristico ci si riferisce sempre o quasi a questo)

L'unità di misura relativo ai  $\neq$  livelli si indica con  $\left. \begin{matrix} [dBA] \\ [dB0] \end{matrix} \right\}$  ecc

↳ se non c'è niente il livello è **lineare oggettivo**

Es

f [Hz]	livello lineare	peso [dB]	liv. pesato [dB]
31.5	60	-33,4	26,6
250	50	-8,6	41,6
1000	40	0	40
3150	30	+1,2	31,2

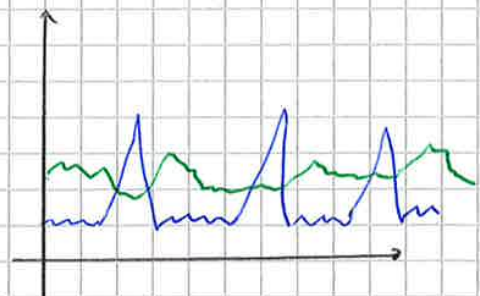
⑤ Importante è la **variabilità nel tempo**

Considero   
 • casa vicino alla ferrovia   
 • casa in centro

Quale dei 2 è  $\bar{r}$  dannoso?

Studi epidemiologici  $\rightarrow$  il danno è correlato all'energia sonora **incrociata**

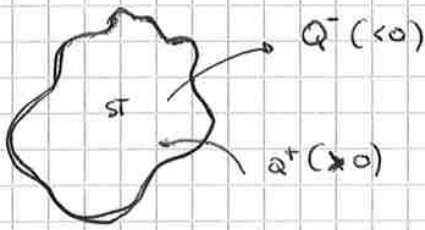
↳ **equal energy rule**



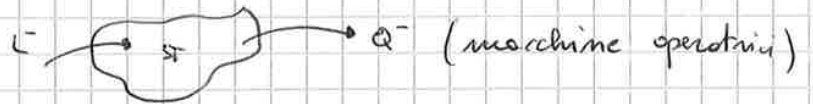
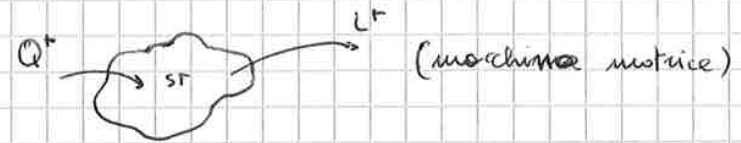




**CALORE:** È energia scambiata del ST con l'ambiente esterno sotto l'azione di una differenza di temperatura fra ST e ambiente esterno



Si considera positivo, ( $Q > 0$ ) il calore fornito al sistema termodinamico dall'ambiente esterno



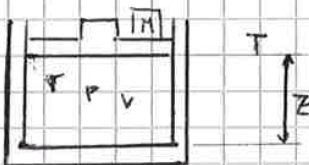
**EQUILIBRIO TERMODINAMICO:** incapacità di cambiamenti spontanei, comprende

- equilibrio meccanico
- " " termico
- " " chimico

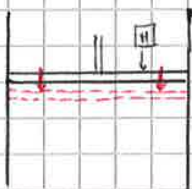
**STATO TERMODINAMICO:** insieme di tutte le proprietà macroscopiche misurabili del sistema termodinamico

**VARIABILI DI STATO DEL SIST.**

- Volume,  $V$
- pressione,  $P$
- entropia,  $S$
- energia interna,  $U$
- entalpia,  $H$



le cost. del sistema sono riscontrabili uguali in **OGNI PUNTO** del sistema



lasciando cadere la massa sul pistone e consideriamo un tempo infinitesimo dopo l'urto  
 ↳ il pistone ha compresso il primo stato di cui

ho infiniti valori di pressione x l'urto si espande  
 ↳ quindi il sistema non è in equilibrio

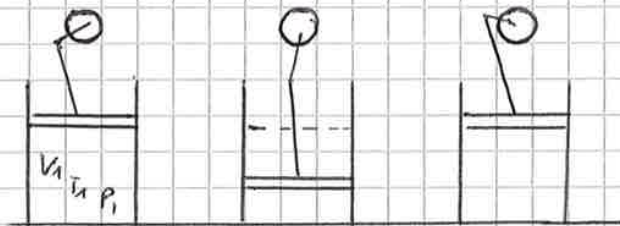
non dare valori di ST solo in **condizioni di equilibrio**

Le variabili di stato sono proprie del sistema, calore e lavoro **NON** lo sono. Sono **energie di scambio** e hanno senso solo nel momento in cui il sistema le cede/riceve  
 $Q, L \rightarrow$  **NON SONO VARIABILI DI STATO**

se la trasformazione è costante nel tempo → si instaura un nuovo stato di eq



Se nella trasformazione stato iniziale e finale coincidono, si dice **TRASFORMAZIONE CICLICA**.



$$\begin{aligned} x_f &= x_i \\ T_2 &= T_1 \\ P_2 &= P_1 \\ V_2 &= V_1 \\ U_2 &= U_1 \end{aligned}$$

$$\oint dP = Q = (p_f - p_i)$$

e l'integrale annullo rispetto a qualsiasi variabile di stato

$$\oint dx = 0$$

e poiché  $\oint dx = Q \rightarrow dx$  è un differenziale esatto, cioè può essere scritto nella forma  $dx = x_f - x_i$

$$\Delta p = p_f - p_i \quad \Delta S = S_f - S_i$$

- ① In una trasformazione interviene uno o più stati di non equilibrio.
- ② Può anche avvenire una trasformazione che pone in ogni punto della trasformazione → in stadi di eq., in cui ciascun punto può essere caratterizzato da 3 variabili td.

↳ trasformazioni molto lente (x cambiamenti infinitesimi, si pone da 1 st. di eq. all'altro)

① **TRASFORMAZIONI IRREVERSIBILI**

Solo st. iniziale e finale della trasformazione sono di equilibrio (gli stati intermedi della trasformazione non sono in eq. → non sono caratterizzabili attraverso le equazioni di stato)

- ② **TRASFORMAZIONE REVERSIBILE** è una successione di infiniti stati di equilibrio, ciascuno dei quali è completamente descritto dalle variabili di stato



spinto la mona e c'è espansione, c'è scambio di lavoro e calore e si raggiunge una configurazione in cui  $z_f = z_i$   
 $p_f = p_i$

la trasform.  $A \rightarrow B \rightarrow C$  è **ciclica**

Guardando la trasform.  $\rightarrow$  il sistema iniziale  $\bar{c} =$  a st. finale una nell'universo è rimasta una traccia  $\rightarrow$  la mona si è spostata  
 $\downarrow$   
c'è stata una **perdita di energia potenziale**

Ma questa energia  $\times$  conservazione ci deve essere

$\hookrightarrow$  trasferita al termostato sotto forma di calore  
 $\hookrightarrow$  c'è una quantit. di energia nel termostato

Calcoliamo

$$L'' = - \int \vec{F}_{ext} \cdot d\vec{s} = - |F_1| |ds| \cos \alpha$$

$\cos \alpha = -1 \quad \downarrow F_1 \uparrow ds$

$$L'' = - |F_1| |ds| = F_1 (z_1 - z_2)$$

$Q'' =$  (espansione + attriti)  
- +  
quindi  $Q''$  è **umidità** globalmente del sistema (ceduta dal termostato) dal pto di vista termodinamico  $\bar{c} +$

$$L' + L'' = -(\pi g + F_1)(z_1 - z_2) + F_1(z_1 - z_2) \Rightarrow \text{Lavoro netto}$$

$$L' + L'' = -\pi g (z_1 - z_2) \equiv \text{perdita di energia potenziale della mona}$$

$\hookrightarrow$  **PERDITE PER IRREVERSIBILITÀ**

$$|Q'| - |Q''| > 0 \Rightarrow \text{calore netto ricevuto dal termostato}$$

$$|Q'| > |Q''|$$

Andando a rifare l'esperimento con una mona  $\checkmark$  divisa in  $n$  anelli ovvero una configurazione iniziale e finale di questo tipo riduciamo la dispersione di  $\frac{3}{4}$  (ho solo 1 perdo "quasi perdo")



per  $n$  parti  $\Rightarrow \infty$

$$L' + L'' = -\frac{\pi g (z_1 - z_2)}{n} \Rightarrow 0 \quad \text{la dissip. tende a } 0$$

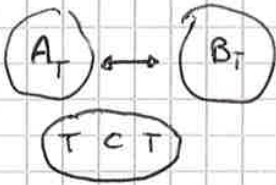
$\hookrightarrow$  questo processo, infinitamente lento, è **reversibile**

Quindi

\* **TRASFORMA REVERSIBILE**: successione infinita di **stati di equilibrio**, perché una trasform. sia reversibile esse deve avvenire con accelerazioni nulle e con scambio di calore

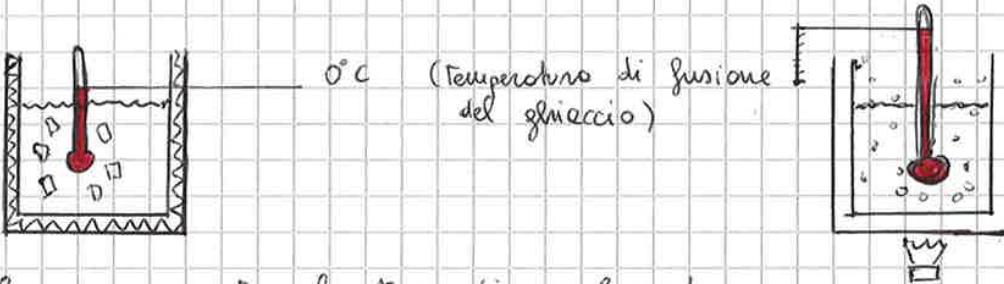
TEMPERATURA, T

**Principio zero della termodinamica** (Fowler, 1936) se due sistemi termodinamici (A e B) sono in equilibrio termico con un terzo sistema termodinamico (C) allora essi sono in equilibrio termico tra loro.



Esiste una **grandezza di stato** detta **TEMPERATURA** il cui valore è il medesimo quando i sist. termodin. sono in **equilibrio termico**

**SCALE EMPIRICHE DI TEMPERATURA (Celsius)**



La divisione tra la temp. di congelamento e la T di ebollizione è divisa in 100 intervalli  $0^{\circ}\text{C} \rightarrow 100^{\circ}\text{C}$

Scale empiriche  $\rightarrow$  sono legate a una sostanza di riferimento  
 $\hookrightarrow$  il significato fisico viene perso  
 $\hookrightarrow$  non c'è limite superiore o inferiore di T

In realtà sappiamo che c'è **limite minimo**  
 $\hookrightarrow$  limite ideale in cui si ferma la vibrazione delle molecole, velocità di **energia cinetica = 0**

$\rightarrow T_{\text{min}} = -273,15^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$  (Kelvin) **Scale di temperatura assoluta o temperatura termodinamica**

$\hookrightarrow$  Kelvin [K]

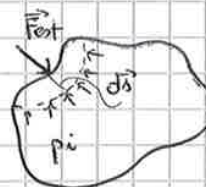
$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$  perché l'unità di misura ha la stessa ampiezza sia in  $^{\circ}\text{C}$  sia in K

$\Delta T = 1\text{ K} - 1^{\circ}\text{C}$

273,16 K  $\rightarrow$  temperatura di punto triplo dell'acqua

**LAVORO: TRASFORMAZIONI REVERSIBILI E IRREVERSIBILI**

Lavoro termodin =  $-\int \vec{F}_{\text{est}} \cdot d\vec{s}$

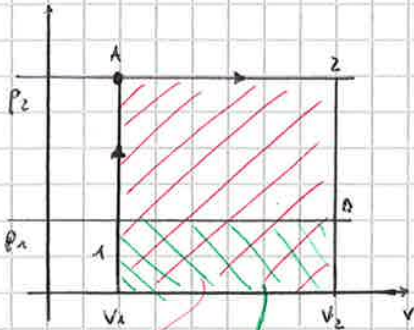




$$L = \int p_i dV - L_w$$

funzione bene TEORICAMENTE ma siccome  $p_i$  nelle irrevers non è definito, l'integrale risulta spesso IMPOSSIBILE DA RISOLVERE

### LAVORO IN TRASFORMAZIONI CICLICHE



Area =  $L_{1 \rightarrow A \rightarrow 2}$

Calcolo R L della trasformazione  $1 \rightarrow A \rightarrow 2$

$$\int_1^2 p dV = \int_1^A p_1 dV + \int_A^2 p dV$$

$\begin{matrix} \text{V costante} \\ \text{p costante} \end{matrix}$

$$= p_1 \int_1^A dV + p_2 \int_A^2 dV = p_2 (V_2 - V_1) = L_{1 \rightarrow A \rightarrow 2}$$

Calcolo  $1 \rightarrow B \rightarrow 2$

$$L = \int_1^B p_1 dV + \int_B^2 p_2 dV = p_2 (V_2 - V_1) = L_{1 \rightarrow B \rightarrow 2}$$

$\begin{matrix} \text{val. costante} \\ \text{p}_2 \end{matrix}$

$$L_{1 \rightarrow B \rightarrow 2} \neq L_{1 \rightarrow A \rightarrow 2}$$

il lavoro dipende dal percorso fatto pertanto NON È UNA GRANDEZZA DI STATO

$$dL \neq L_f - L_i$$

$L$  non è una proprietà che è posseduta del sistema ma è una proprietà che il sistema *scambia* (energia di scambio)

$dL$  non è un differenziale esatto  $\rightarrow \oint dL$  (oppure  $\oint dL$ )

$$\oint dL \neq 0$$

! per le variabili di stato vale sempre

$$\oint dx = 0$$

ANCHE X LE TRASFORMAZIONI IRREVERSIBILI

$$C_p = \left( \frac{\delta q}{dT} \right)_{p=\text{cost}}$$

capacità termica molsica a  $p = \text{costante}$   
 ISOBARA

$$C = \frac{\delta q}{dT} \rightarrow \text{Trasformaz. generica}$$

Per esempio aria ( $\sigma T$  e  $p$  ambiente)  
 $C_v \approx 717 \frac{J}{kgK}$   
 $C_p \approx 1004 \frac{J}{kgK}$

I PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA (metà 800, Joule)

Joule ha la conservazione dell'energia e dimostra che  $Q$  e  $L$  sono "la stessa cosa", cioè sono entrambi delle energie (che nel SI si misura in J)

Inizialmente  $\rightarrow$  si pensava che il  $Q$  fosse un fluido che poteva da 1 sostanza all'altra  
 $\hookrightarrow$  si misurava in **calorie** (calore da fornire a 1g di acqua  $\times$  innalzare  $T$  di 1°)

$Q$  in calorie (o Ncal)  
 1g 1kg  
 $L \rightarrow$  joule

$$4186 J = 1 \text{ Ncal}$$

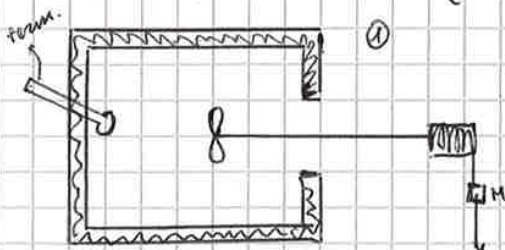
poniamo dire ciò grazie a Joule, che ci ha detto che le 2 dimensioni sono dimensionalmente omogenee

se una legge è un **PRINCIPIO** quando è un principio NON DIMOSTRABILE  
 $\hookrightarrow$  metodo **INDUTTIVO** e con 1 serie di esp. e questi danno la **str. conseguente**  
 generalizzata  $\downarrow$  induzione  
 una conclusione  $\times$  (metodo sperimentale)

metodo **deduttivo** : deduzioni teoriche sulle quali viene enunciata la legge

tutti gli esperimenti o teorie devono confermare i principi

**ESPERIENZA DI JOULE** (induttivo)





$\pi = \text{moneta} \Rightarrow \dot{\pi} = \frac{\pi}{t}$  *potenza in moneta*

$\dot{m} = \frac{dm}{dt}$

$L = \text{Lavoro (energia)}$   $\frac{\text{Energia}}{\text{Tempo}}$   $\bar{e}$  una *potenza*

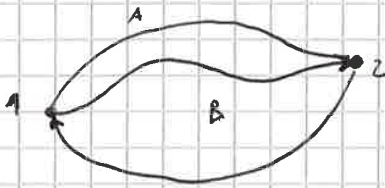
Sono solo rapporti infinitesimi  $\Downarrow$  NON DERIVATE

$\dot{L} = \frac{dL}{dt} \Rightarrow \bar{e}$  *potenza meccanica*  $[\frac{J}{s}] = [Watt]$

$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \Rightarrow \bar{e}$  *potenza termica = flusso termico*  $[\frac{J}{s}] = [Watt] = [W]$

1° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

$\oint \delta Q = \oint \delta L$  dall'esperienza di Joule



$1A \rightarrow 2 \rightarrow 1 \Rightarrow$  trasformazione *cilica*

$\oint \delta Q = \oint \delta L$

$\odot \int_{1A}^2 \delta Q + \int_2^1 \delta Q = \int_{1A}^2 \delta L + \int_2^1 \delta L$

$1B \rightarrow 2 \rightarrow 1 \Rightarrow$  trasformazione *cilica*

$\oint \delta Q = \oint \delta L$

$\int_{1B}^2 \delta Q + \int_2^1 \delta Q = \int_{1B}^2 \delta L + \int_2^1 \delta L \quad \textcircled{9}$

Sottraendo algebricamente tra membri

$\int_{1A}^2 \delta Q - \int_2^1 \delta Q = \int_{1A}^2 \delta L + \int_2^1 \delta L$   $\ominus$

$\int_{1B}^2 \delta Q + \int_2^1 \delta Q = \int_{1B}^2 \delta L + \int_2^1 \delta L$

$\int_{1A}^2 \delta Q - \int_{1B}^2 \delta Q = \int_{1A}^2 \delta L - \int_{1B}^2 \delta L$  cioè  $\int_{1A}^2 (\delta Q - \delta L) = \int_{1B}^2 (\delta Q - \delta L)$

$$\delta Q - \delta L = du + d\epsilon_k + d\epsilon_g$$

$$\epsilon_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{W^2}{2} \quad W = \text{velocità}$$

$$\epsilon_g = \frac{m g z}{m} = g z$$

$$\delta Q - \delta L = du + d\left(\frac{W^2}{2}\right) + d(gz)$$

ricordo che  $d[f(x)] = f'(x) dx$

$$\delta Q - \delta L = du + \frac{\partial W}{\partial x} dx + g dz$$

$$\delta Q - \delta L = du + W dW + g dz$$

forma equivalente, espresse con le semplificazioni

## L'ENERGIA INTERNA, U

è da interpretarsi a livello molecolare, mentre  $E_p$  e  $E_k$  sono da intendersi a livello **macroscopico**

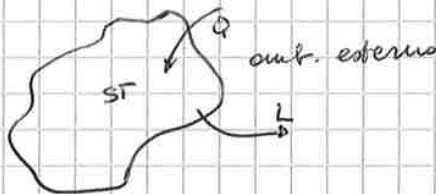
**Def:** Esiste una grandezza funzione di caratteristiche macroscopiche e misurabile del ST e quindi come tale una grandezza di stato, la cui variazione durante una qualunque trasf. TD in cui siano trascurabili le variazioni di energia potenziale, cinetica, magnetica... è data dalla differenza tra il **calore scambiato** del sistema con l'esterno ed il **lavoro scambiato** del mt. con l'esterno. Tale grandezza è detta **ENERGIA INTERNA DEL SISTEMA**

$$\delta Q - \delta L = du$$

$$\int \delta Q - \int \delta L = \int \frac{dU}{\delta}$$

allora si ritrova la relazione di Joule  $\int \delta Q = \int \delta L$

Segui



1° ptd sul ST

$$|Q| - |L| = \Delta E$$

2° ptd sull'ambiente

$$-|Q| - (-|L|) = \Delta E$$

$$\delta + \delta = \Delta E_{\text{st}} + \Delta E_{\text{amb.}}$$

$$\Delta E_{\text{st}} = -\Delta E_{\text{amb.}}$$

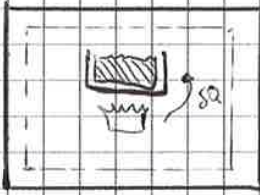
$$|\Delta E_{\text{st}}| = |\Delta E_{\text{amb.}}| \Rightarrow \Delta E_{\text{amb.}} + \Delta E_{\text{st}} = \Delta E_{\text{universo}} \Rightarrow E_{\text{universo}} = \text{cost}$$

$L_s$  somma il princ. di conservazione delle energie



$$\Rightarrow Q = -|Q_1| + |Q_3| = Q_1 + Q_3$$

$$L = +|L_1| - |L_2| = L_1 + L_2$$



$$Q = \text{calore netto} = \sum |Q^+| - \sum |Q^-|$$

$$L = \text{lavoro netto} = \sum |L^+| - \sum |L^-|$$

## ENTALPIA, H

$$H = U + pV \quad [J]$$

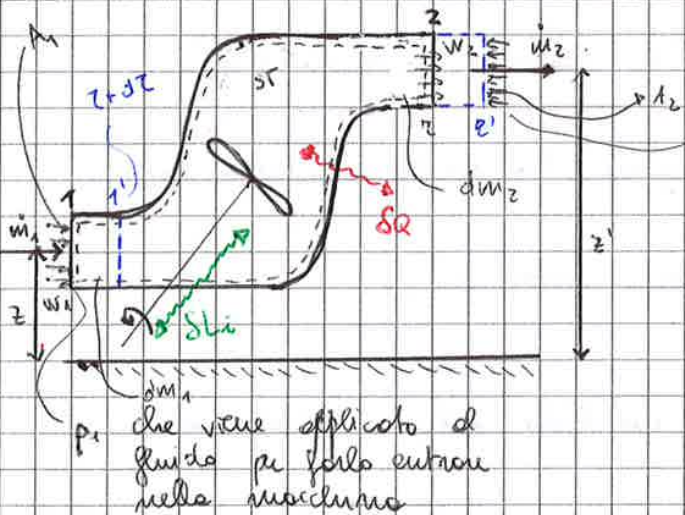
con  $U = \text{energia interna}$   
 $p = \text{pressione}$   
 $V = \text{volume}$

Entalpia specifica  $h = \frac{H}{m} \quad \left[ \frac{J}{kg} \right]$

$$h = \frac{U + pV}{m} = \frac{U}{m} + p \frac{V}{m} = u + p \cdot v$$

$$h = u + p \cdot v$$

## 1° PRINCIPIO PER SISTEMI APERTI



$p_2$ : pressione che si oppone alla uscita del fluido

$p_i$  che viene applicato al fluido per farlo entrare nella macchina

Trasformazione infinitesima che avviene al tempo infinitesimo  $dt$

Principio di conservazione della massa

$$\dot{m}_{out} - \dot{m}_{in} = \frac{dm}{dt}$$

e se il regime è **STAZIONARIO** vale  $\dot{Q} = \frac{dm}{dt}$





**! OSSERVAZIONI !**

$l_i \neq l$

$l$  è il lavoro termodinamico

$l_i \neq l_i$

$l_i$  è il lavoro tecnico  
o lavoro utile  
o lavoro interno

} è solo **PARTE** del lavoro termodinamico

↓  
questo include anche lavori di compressione e espansione

**!**  $l_i^{def}$  è il lavoro fatto dal sistema termodinamico fatto sulle parti fisiche mobili del sistema (es una turbina, un'elica, compressore ... che fanno lavoro nel fluido)

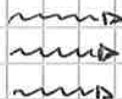
$l_i$  = costituisce la parte UTILE

$l$  o  $l_i$  è "incluso" nel termine **entalpia**

SIST. CHIUSI

SIST. APERTI

M  
Q, L  
U



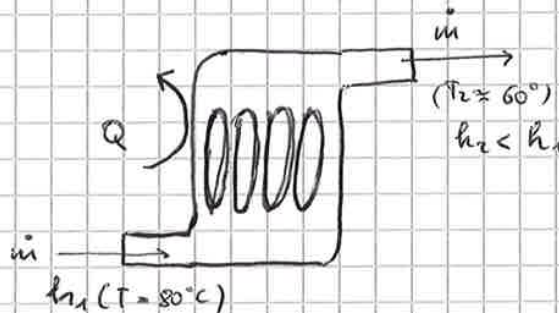
$\dot{m}_i$   
Q,  $l_i$   
M

Entalpia è una "misura" del **contenuto energetico** di una portata di fluido

**CASO PARTICOLARE**

①  $dE_M = dE_{ps} = \emptyset$

$q - l_i = dh$



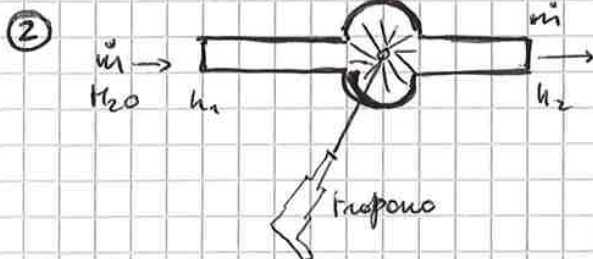
Scrivo il princ. della T.D.

$\dot{Q} - \dot{L}_i = \Delta h \cdot \dot{m}_i$

con  $\tau = 1m$  e sezioni A e B =

↳ nulla si muove

$\dot{Q} = \dot{m}_i \Delta h$



(pompa per l'acqua)  
aumento la pressione interne  
↳ "suction" via l'H2O

$s = \frac{S}{M}$  è l'entropia molsica  $[\frac{J}{N_A k}]$

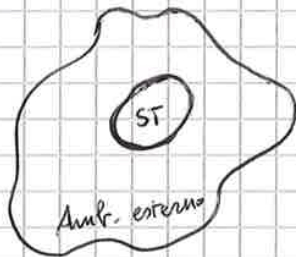
essendo S una **GRANDEZZA DI STATO** <sup>estensivo</sup> allora vale **SEMPRE**

$\oint dS = 0$  ! SEMPRE !  $\oint \delta Q =$

$dS_i$  tiene conto delle **irreversibilità interne** al sistema

generalmente usiamo  $T =$  TEMPERATURA DEL SISTEMA  
 $dS_i =$  tiene conto delle **IRREVERSIBILITÀ** INTERNE al sistema

ENTROPIA DELL' UNIVERSO



$dS = \left[ \frac{\delta Q}{T} + dS_i \right]$

$\Delta S = \Delta S_i \geq 0$

S nell'universo **crece sempre** (o al più resta costante)

$\Delta S_{tot} \geq 0$

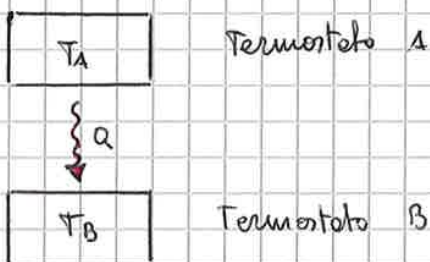
II PRINC. TERMODINAMICA

$dS = \frac{\delta Q}{T} + dS_i$

IP

POSTULATO DI CLAUSIUS

Se 2 sistemi a T diverse vengono posti a contatto fra loro, il calore fluisce **spontaneamente** dal corpo a temperatura maggiore verso quello a temperatura minore



Per ipotesi  $T_A > T_B$

Applicando II ptd all'universo (A+B)

$\Delta S_{tot} \geq 0$  con S grandezza di stato **estensivo**



Se applico il I° ptd alla trasformazione ho

$$\oint \delta Q - \oint \delta L = \oint dU = 0 \text{ perché } dU \text{ è una grandezza di stato}$$

$$\oint \delta Q = \oint \delta L$$

$$Q = L$$

$L = +|Q| > 0$  e applicando il II° PTD all'universo (A+M)

$$\Delta S_{TOT} \geq 0$$

$$\Delta S_{TOT} = \Delta S_A + \Delta S_M \quad (*)$$

$$\Delta S_A = \int_A dS = \int_A \left( \frac{\delta Q}{T} + \frac{dS_{irr}}{0} \right) = \int \frac{\delta Q}{T} = - \frac{|Q|}{T_A} \Rightarrow \Delta S_A = - \frac{Q}{T_A} \quad (2)$$

$$\Delta S_M = \oint_M dS = 0 \text{ perché } S \text{ è una variabile di stato (abbiamo detto che vale SEMPRE)}$$

$$\Delta S_M = 0 \quad (1) \text{ sostit. } (1) \text{ e } (2) \text{ in } (*)$$

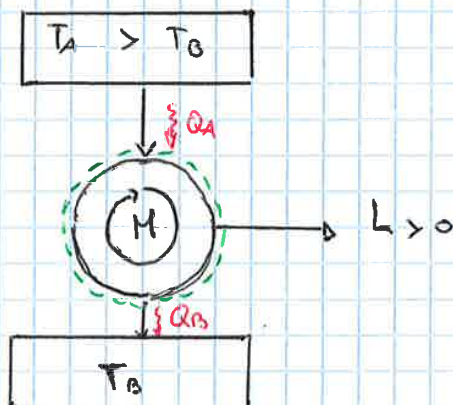
$$\Delta S_{TOT} = \Delta S_A + \Delta S_M \Rightarrow \Delta S_{TOT} = - \frac{|Q|}{T_A} + 0 \geq 0$$

Non è pos. realizzare un processo ciclico che abbia come unico effetto quello di assorbire calore da un unico termostato e convertire integralmente quel calore in lavoro.

↳ enunciato di Kelvin-Planck del 2° PTD

↳ sono necessari 2 termostati

Quindi si può fare



(1) 1° PTD (M)

$$\oint \delta Q - \oint \delta L = \oint dU = 0$$

$$\oint \delta Q = \oint \delta L$$



$$L = |Q_B| \left( \frac{T_A}{T_B} - 1 \right) - T_A \cdot \Delta S_{TOT} > 0$$

$$L = |Q_A| - \left[ \frac{T_0}{T_A} |Q_A| + T_B \cdot \Delta S_{TOT} \right] = |Q_A| \underbrace{\left( 1 - \frac{T_B}{T_A} \right)}_{> 0} - \underbrace{T_B \Delta S_{TOT}}_{> 0} > 0$$

Scopo che il lavoro è max se e solo se  $\Delta S_{TOT} = 0$   
 così si annulla il secondo termine

$$\Delta S_{TOT} = 0 \Rightarrow L_{MAX}$$

quindi le trasformazioni devono essere **REVERSIBILI** per avere rendimento massimo

$$L_{MAX} = \left( 1 - \frac{T_B}{T_A} \right) |Q_A| = \left( \frac{T_A}{T_B} - 1 \right) |Q_B|$$

$$\eta_{MAX} = \frac{L_{MAX}}{|Q_A|} = \frac{\left( 1 - \frac{T_B}{T_A} \right) |Q_A|}{|Q_A|}$$

$$\eta_{MAX} = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

Rendimento di Carnot  
 (dipende solo dalle temperature assolute)

**RICORDA !**  $T_A$  e  $T_B$  in [K] !

OSS in condizione di  $L_{MAX} \Rightarrow \Delta S_{TOT} = \frac{|Q_A|}{T_A} + \frac{|Q_B|}{T_B} = 0$

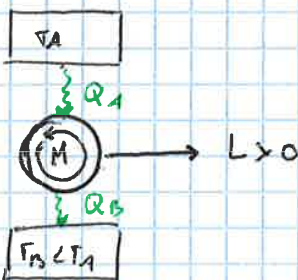
$$\frac{|Q_A|}{T_A} = -\frac{|Q_B|}{T_B}$$

&

$$\frac{|Q_A|}{|Q_B|} = \frac{T_A}{T_B}$$

macchina di Carnot

In ogni caso  $\eta_{max} = f(T_A, T_B) < 1$



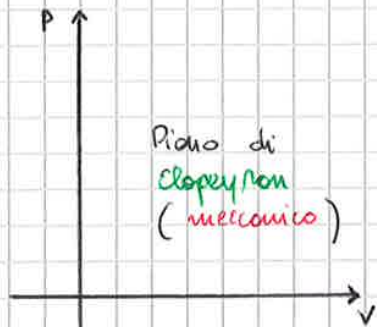
Esempio

$$T_A = 1200^\circ\text{C} = 1473 \text{ K}$$

$$T_B = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$$

$$\eta_{MAX} = 1 - \frac{293}{1473} = 0,8$$

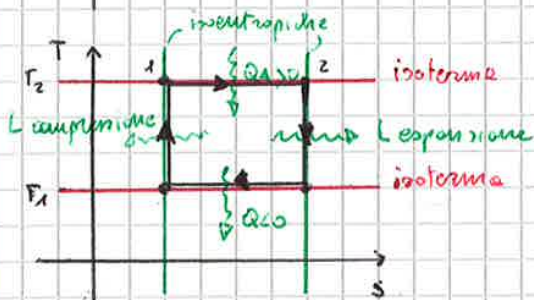




2 grandezze di stato rapp. lo stato di eq di una sostanza semplice

⇓

è molto usato in TD anche il diagramma TS, perché x mette di rapp. in maniera semplice le transf. isoterme



Il ciclo di Carnot sul piano TS è un rettangolo

$$Q = |Q_a| - |Q_b|$$

$$L = |L_{\text{expansione}}| - |L_{\text{compressione}}| > 0$$

nel Ciclo di Carnot:  $\Delta S_{\text{TOT}} = 0$  (tutte le trasformazioni devono essere reversibili)

\* Se scambioni calore tra  $\Delta T$  non infinitesime ( $T$  finite) anzi le irreversibilità dovute a questo  $\rightarrow$  il  $Q$  deve essere fornito a  $T$  costante

\* Adiabatiche:

Ciclo che opera SENZA IRREVERSIBILITÀ INTERNE NÉ ESTERNE

$$\rightarrow dS = 0$$

Dal punto di vista pratico  $\rightarrow$  impossibile realizzare le isoterme  $\rightarrow$  difficili da realizzare le adiabatiche

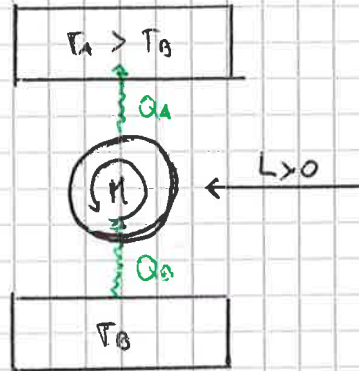
### PROPRIETÀ DEL DIAGRAMMA T-S

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + dS_i$$

trasformaz (internamente) reversibile  $dS_i = 0$

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \Rightarrow \delta Q = T dS \Rightarrow Q = \int T dS$$

MACCHINE CHE ASSORBONO LAVORO



Perché questa macchina funziona deve necessariamente essere  $L > 0$

Dim: 1° PTD della macchina

$$\oint \delta Q - \oint \delta L = \oint dU$$

U = grand. di stato

$$\oint \delta Q = \oint \delta L$$

$$L = -|Q_A| + |Q_B| \Rightarrow \boxed{L = |Q_B| - |Q_A|} \quad (*)$$

2° PTD dell'universo (A + M + B)

$$\boxed{\Delta S_{TOT}} = \Delta S_A + \Delta S_M + \Delta S_B = + \frac{|Q_A|}{T_A} + \frac{|Q_B|}{T_B} \geq 0$$

$\downarrow$   
 è uscente dal termostato B

$\frac{|Q_A|}{T_A} \geq \frac{|Q_B|}{T_B}$  ① enunciato per Hp  $T_A > T_B$  deve essere verificata la ① allora  $|Q_A| > |Q_B|$  e dunque

$L = |Q_B| - |Q_A|$  deve necessariamente essere  $< 0$  CVD

**Enunciato di Clausius:** è imposs. realizzare un **processo ciclico** che abbia come unico effetto quello di **trasf. calore** da un termostato a bassa T verso un termostato ad alta T, per fare avvenire questo passaggio è necessario **spendere del lavoro**

Lavoro: ricaviamo, alternativamente,  $|Q_A|$  e  $|Q_B|$  da (\*)

$$\boxed{|Q_A| = \frac{T_A}{T_B} |Q_B| + T_A \Delta S_{TOT}}$$

$$\boxed{|Q_B| = \frac{T_B}{T_A} |Q_A| - T_B \Delta S_{TOT}}$$



$$E = \text{efficienza frigorifera} = \frac{|Q_B|}{|L|}$$

si def due tipi di efficienze

$$COP = \text{efficienza della pompa di calore} = \frac{|Q_A|}{L}$$

$$|L| = |Q_A| - |Q_B|$$

$$E = \frac{|Q_B|}{|L|} = \frac{|Q_B|}{|Q_A| - |Q_B|}$$

$$COP = \frac{|Q_A|}{|L|} = \frac{|Q_A|}{|Q_A| - |Q_B|}$$

$E \geq 1 \rightarrow$  quanto vale  $E_{max}$ ?

$COP > 1 \rightarrow$   $COP_{max}$ ?

$$E_{max} = \frac{|Q_B|}{|L_{min}|}$$

$$COP_{max} = \frac{|Q_A|}{|L_{min}|}$$

$$E_{max} = \frac{|Q_B|}{|Q_B| \left( \frac{T_A}{T_B} - 1 \right)} = \frac{T_B}{T_A - T_B}$$

$$E_{max} = \frac{T_B}{T_A - T_B}$$

$$COP_{max} = \frac{|Q_A|}{|Q_A| \left( 1 - \frac{T_B}{T_A} \right)} = \frac{T_A}{T_A - T_B}$$

$$COP_{max} = \frac{T_A}{T_A - T_B}$$

Quindi  $E_{max}$  e  $COP_{max}$  sono solo funzione della temperatura assoluta

$$E_{max} \text{ e } COP_{max} \Rightarrow f(T_A, T_B)$$

$E_{max}, COP_{max} \uparrow$   $\propto T_A \rightarrow T_B$

! l'efficienza delle macchine frigorifere e delle pompe di calore aumenta  $\propto$  la differenza di temperature tra i termostati diminuisce !





$$dh = Tds - p\cancel{dv} + p\cancel{dv} + vdp$$

$$dh = Tds + vdp$$

$$dH = TdS + Vdp$$

2<sup>a</sup> EQ. DI GIBBS

↳ eq. di Gibbs → rendono MISURABILE l'entropia (non esiste uno strumento di misurazione)

Permette di scrivere l'equazione di primo principio in forma meccanica

$$\textcircled{1} dQ - dL_i = dH + dEc + dEg + \dots \quad \text{valido per sistemi aperti}$$

$$dS = \frac{dQ}{T} + dSi \Rightarrow dQ = TdS - \underbrace{TdSi}_{\delta Lw} = TdS - \delta Lw$$

$$dH = TdS + Vdp \quad \text{no corr. in } \textcircled{1}$$

$$TdS - \delta Lw - dL_i = TdS + Vdp + dEc + dEg$$

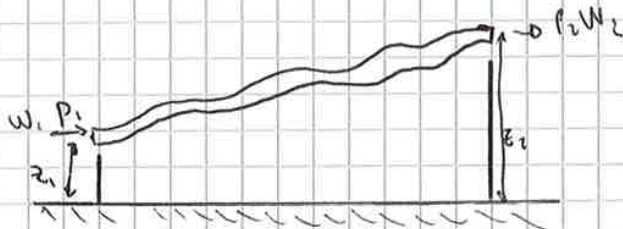
$$-dL_i = \delta Lw + Vdp + dEc + dEg$$

$$dL_i = -\delta Lw - Vdp - dEc - dEg$$

PRIMO PRINCIPIO IN FORMA MECCANICA

nasconde il **teorema di Bernoulli**

$$p + \rho \frac{w^2}{2} + \rho g z = \text{costante} \quad \text{per un fluido ideale}$$



$$\delta L_i = 0 \quad \text{fluido ideale} \quad \delta Lw = 0$$

$$vdp + dEc + dEg = 0$$

$$vdp + \frac{dEc}{v} + \frac{dEg}{v} = 0$$

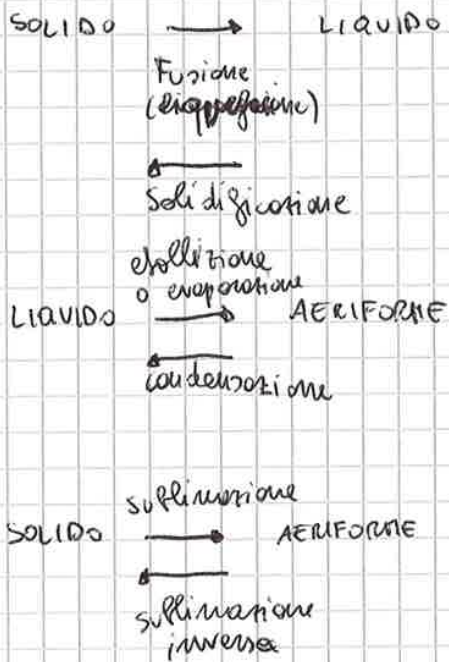
$$v = \frac{1}{\rho} \Rightarrow \rho = \frac{1}{v}$$

$$\Delta p + \rho \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \rho g (z_2 - z_1) = 0$$

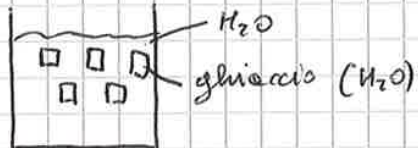
$$p + \rho \frac{w^2}{2} + \rho g z = \text{cost}$$

## CAMBIAMENTI DI FASE (o di stato di aggregazione)

A seconda di  $p, V, T$  lo stato può cambiare  
 Cambiamenti di fase o passaggi di stato



Es.



- sostanza pura
- presenti 2 fasi

### Legge di Gibbs o delle fasi

$$f = n - r + 2$$

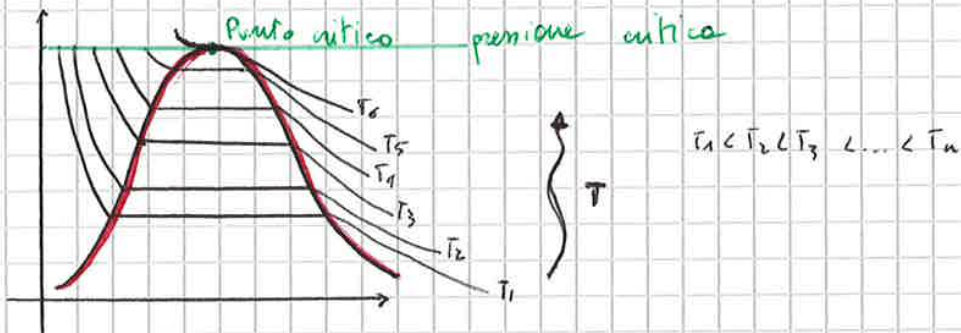
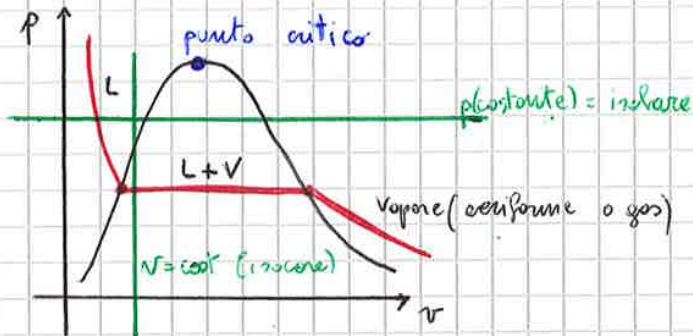
$f$  = numero di gradi di libertà

$n$  = numero componenti presenti

$r$  = numero delle fasi presenti

- $f = 3 - r$ 
  - sistemi mono-fase (tutto liquido, tutto gas)
    - $r = 1, f = 2$  (posso cambiare indipendentemente 2 grandezze di stato)
  - sistemi bifase (L + S o G)





Titolo del vapore;  $X$  ~~≠~~ Titolo dell'aria umida;  $x$

Def

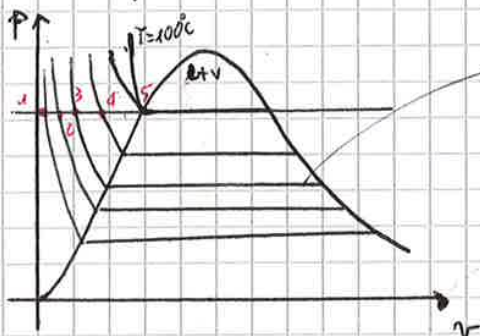
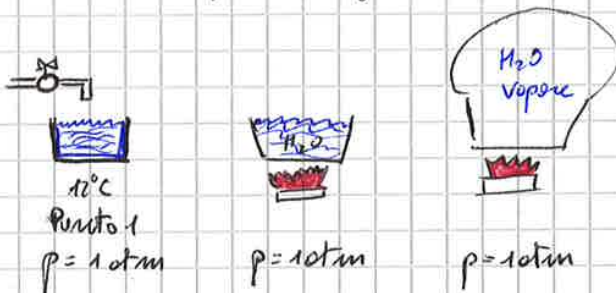
$$X = \frac{m_v}{m_v + m_L} \quad [-] \quad 0 \div 1$$

(0 = 100%)

$m_v$  = massa di vapore [kg]

$m_L$  = massa di liquido [kg]

ES



anche in questa zona c'è consumo di energia → questa va a rompere i legami tra le molecole

non aumenta lo  $T$  ma si

chimica  
 $\hookrightarrow$  si mantiene solido  $dQ + dW = dU$   
 $+ dp$   
 $+ dT \dots$