

# Fisica

## Fisica

18/02/2019

Metodo Scientifico

Unità del sistema internazionale

Grandezze fisiche e la loro misurazione

Incertezza di misura

Grandezze Fondamentali

Sistemi di Unità di Misura

Sistema Internazionale

Cifre significative e Arrotondamenti

Cinematica

Legge oraria del moto

Velocità media

Velocità istantanea

Accelerazione

Accelerazione Gravitazionale

Integrale della velocità

Esercizio

22/02/2019

Esercizio: Doppio lancio verticale

Grandezze vettoriali

Velocità istantanea in più dimensioni

Accelerazione in più dimensioni

Moto circolare uniforme

25/02/2019

esercizio palla di cannone

Inerzia

Primo principio di inerzia:

Secondo principio di inerzia:

Esperimenti carrelli

Esercizio pallina da tennis

01/03/2019

Forza di gravità

Forza Peso

Piano inclinato

Forza di attrito

L'attrito statico

Attrito dinamico

04/03/2019

Esercizio: Macchina che frena(senza ABS)

Esempio della carrucola

Lavoro

Esempio: Lancio sasso in aria

Con Forza non costante:

Potenza

Potenza istantanea

Potenza media

08/03/2019

Forza conservativa

Forza Non conservativa

Scelta origine del sistema di riferimento

Energia Potenziale

Energia Cinetica

Bilancio energetico

Varie casistiche

Energia Meccanica

Esercizi:

Lancio massa m in aria, a che altezza arriva?

Per casa

11/03/2019

Moto armonico

Equazione differenziale armonica

Forza Elastica

Esercizio: Calcolo molla con piccole contrazioni

Esercizio: Ciclista

12/03/2019

Esercizio: Massa puntiforme che fa un cerchio

Esercizio: Giro della morte

Esercizio: Terra

Termodinamica

Energia interna

Gas Ideale

22/03/2019

Pressione

Costante di Boltzman

Equazione di stato di gas perfetti

Energia interna media in un gas perfetto monoatomico

Equipartizione dell'energia cinetica

Esercizio moli

Esercizio

Principi della termodinamica

Esempio dei pistoni

Calore

25/03/2019

Esercizio pistone

Esercizio ruota bicicletta

Scatola con gas dentro

Calore

Primo principio della termodinamica

Conduzione

Convezione

- Irraggiamento
- Sistema Isolato
- Esempio sistema isolato
- Trasformazioni
  - Trasformazione isocora
  - Trasformazione adiabatica
  - Trasformazione isotermica
- Capacità termica
- Calore specifico
- Esperimento di Joule
  - Esempio pozzanghera
- Calore latente
- Stati della materia
- Per casa

29/03/2019

Esercizio

01/04/2019

Centro di massa

- Esempio Sole Terra
- Esempio raggio sole
- Utili da sapere per esame
- Esempio su Aero
- La quantità di moto si conserva
- Esperimento barra
- Urto perfettamente anaelastico
- Esperienza di Joule (Espansione Libera)

05/04/2019

08/04/2019

Calore Specifico in base al processo

Relazione di Mayer

Grafici p V

Cicli Termodinamici

- Ciclo termico/Macchina termica
- Ciclo frigorifero/Macchina frigorifera
- Calore ceduto e calore assorbito
- Lavoro subito e lavoro effettuato
- Rendimento di una macchina termica
- Reversibilità di una trasformazione
- Ciclo di Carnot

12/04/2019

- Rappresentazione macchina termica
- Rappresentazione macchina frigorifera
- Secondo principio della termodinamica
- Dimostrazione per assurdo
- Teorema di Carnot

15/04/2019

Entropia

Esercizio di esempio

In un sistema isolato

Elettromagnetismo

Paragone interessante

19/04/2019

Autoenergia

Carica di prova e campo elettrico

29/04/2019

Carica puntiforme

Energia elettrostatica delle cariche

Densità lineare

Esercizio idrogeno

Passaggio al continuo (PAC)

somma costante

Esperimento di Rutherford

Esercizio anello

03/05/2019

Circuitazione

Flusso

Angolo solido

Teorema delle superfici di Gauss

Esempio

Esercizio

06/05/2019

Esempio uno

Esempio due

Campo elettrico di un piano indefinito di carica

Conduttori

Induzione

Induzione Completa

Capacità

Esempio

10/05/2019

Corollari

Osservazioni sulla capacità

Conduttore cavo

Schermatura e induzione completa(cavo dentro cavo)

Protezione dagli sbalzi

Condensatore piano

Condensatore sferico

Condensatore cilindrico

13/05/2019

Energia immagazzinata in un condensatore

Esercizio

Esercizio generico

1

2

3

4

**18/02/2019**

---

## Metodo Scientifico #

Fenomeno di interesse e sua idealizzazione, ho grandezze fisiche per descriverlo (**unità**), osservazione e misura (**incertezze**), formulazione di ipotesi, passando dal **modello alla legge fisica**.

Attraverso quest'ultima (legge fisica) per descrivere e prevedere ed in caso **falsificare l'ipotesi**.

---

## Unità del sistema internazionale #

### Grandezze fisiche e la loro misurazione

#### Incetezza di misura

#### Grandezze Fondamentali

#### Sistemi di Unità di Misura

#### Sistema Internazionale

#### Cifre significative e Arrotondamenti

---

## Cinematica #

La cinematica è la descrizione del moto degli oggetti, rappresentati da punti materiali.

**Punto materiale:** Punto con delle proprietà fisiche, privandolo dell'estensione. Lecito quanto piccolo è l'oggetto.  
(*Più piccolo, più lecito*).

Esempio:

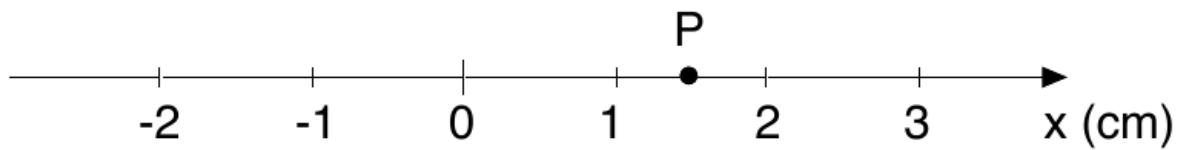
*Luna è un punto materiale con un rapporto 100 alla terra .*

## Legge oraria del moto

Scelgo un **punto**, un **verso di percorrenza** e creo il movimento del punto in **UNA dimensione**.

Un punto materiale non fa spazio ne ingombro.

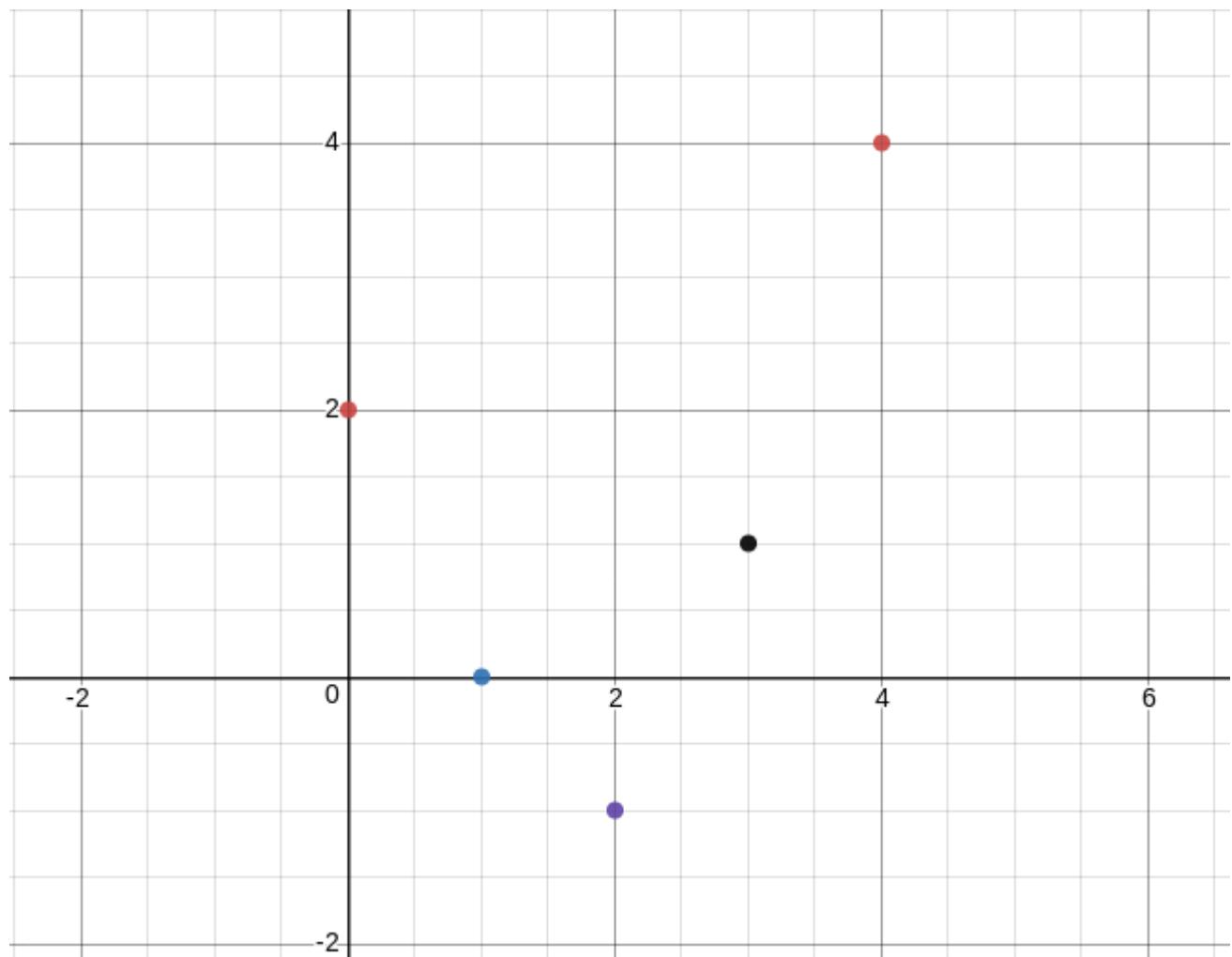
Posso assumere una unità di misura nella retta orientata (tipo centimetri).



La legge oraria posso esprimere con una **tavella**:

$t(s)$	$s(m)$
0	2
1	0
2	-1
3	1
4	4

E disegno un **GRAFICO**:



**Equazione oraria:**  $s = s(t)$

**spazio** in funzione del **tempo**.

La legge oraria può variare in base alla funzione che ho su  $s(t)$

*Esempi*

$$s = A \cos(Bt)$$

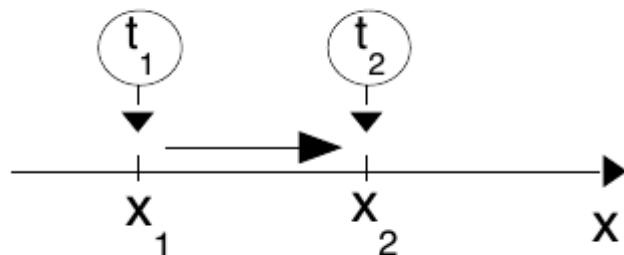
Nota bene che:

**NON** posso rimuovere la costante A, mentre posso rimuovere la costante B(se ad esempio la B vale 1), ma è consigliato tenerla in ogni caso. Senza A non posso dire di che cosa si tratta, di lunghezza, di tempo etc etc, quindi A deve essere **DEFINITA** ed avere una unità di misura.

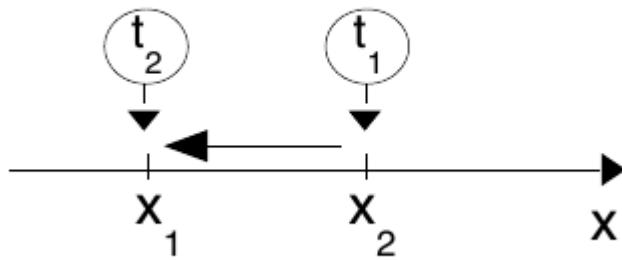
**Pulsazione:** nella **formula precedente** la pulsazione è  $\omega = B$ .

## Velocità media

Velocità positiva



Velocità negativa



**Equazione:**  $V_m = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

Ovviamente ha una unità di misura

$$[v] = \frac{[s]}{[t]}$$

Le parentesi quadre indicano una equazione dimensionale, stiamo considerando l'uguaglianza del punto di vista delle **dimensioni**.

Abbiamo ovviamente una **unità di misura**

$$udm(v) = \frac{udm(s)}{udm(t)} = \frac{m}{s}$$

*può essere metri al secondo come altro(km/h...)*

Nota che è una differenza, non dipende dal sistema che abbiamo utilizzato.

utilizzando il sistema di riferimento di prima (**tabella**), abbiamo:

$$\frac{-2}{1} = -2 \frac{m}{s}$$

$$-1 \frac{m}{s}$$

$$2 \frac{m}{s}$$

$$3 \frac{m}{s}$$

**Coefficiente Angolare:** Nel grafico ho

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Nota bene che il grafico con tempo, non può avere valori che "tornano indietro nel tempo".

## Velocità istantanea

Velocità nel tempo che dipende dall'istante  $t$ .

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = v$$

anche detta

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x(t) - x_0}{t - t_0} = v(t)$$

Rapporto incrementale, quindi è la **derivata** nel grafico spazio tempo.

*Esempi:*

$$s(t) = At \implies v(t) = \frac{ds}{dt} = A$$

Essendo  $t$  Tempo, **A** sarà spazio tempo perchè mi fornisce un uguaglianza = spazio, quindi deve dare spazio. Quindi **A** sarà la **Velocità**.

$$v(t) = A[-\sin(\omega t)]\omega = -A\omega \sin(\omega t)$$

In questo caso **A** è **Spazio**.

Avendo la **legge oraria della velocità**, posso ottenere la **legge oraria del moto** integrando  $v(t)$

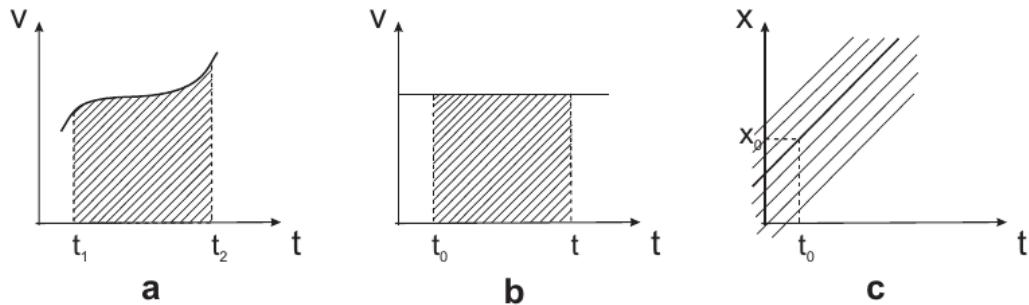


Figura 2.4: Calcolo della legge oraria, nota la velocità in funzione del tempo

$$s(t) - s_0 = \int_{t_0}^t d\tau v(\tau) \implies s(t) = s_0 + \int_{t_0}^t d\tau v(\tau)$$

quindi

$$s(t) = s_0 + \int_{t_0}^t \bar{v} d\tau = s_0 + \bar{v}(t - t_0)$$

Avendo una velocità costante ottengo

$$s(t_0) = s_0 + \bar{v}(t_0 - t_0) = s_0$$

## Accelerazione

**Variazione** della velocità nel tempo o **Derivata** della velocità nel tempo

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v(t) - v(t_0)}{t - t_0} = a(t_0)$$

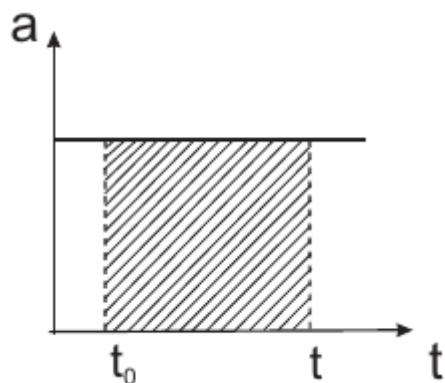
**Protip:** Controllo di avere consistenza dimensionale

$$[a] = \frac{[v]}{[t]} = \frac{[s]}{[t][t]} = [s/t^2]$$

## Accelerazione Gravitazionale

L'accelerazione gravitazionale è pari a

$$g = 9,8055 \frac{m}{s^2}$$



**Punti estremanti:** Punti di massimo e di minimo, punti nei quali l'accelerazione vale ZERO, cioè la velocità è costante.

## Integrale della velocità

$$v(t) = v_0 + \int_{t_0}^t d\tau a(\tau)$$

*Nota che:*

**Integrando** accelerazione, ottengo la **velocità**.

**Integrando ancora**, ottengo lo **spazio**.

**Derivando** lo spazio, ottengo la **velocità**.

**Derivando ancora** ottengo l'**accelerazione**.

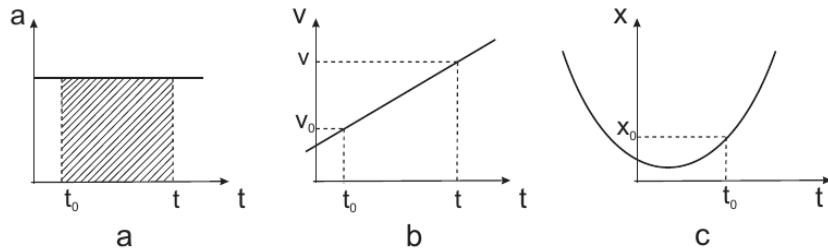


Figura 2.5: Calcolo della legge oraria per un moto uniformemente vario: (a) accelerazione, (b) velocità, (c) posizione in funzione del tempo

**Protip:**

$$F = \frac{-G \cdot m \cdot M}{r^2} = -m \cdot g \cdot r$$

l'accelerazione gravitazionale è **diversa** in base a dove mi trovo nella terra, ma di poco, quindi la **assumo** come **definita prima**.

## Esercizio

**Protip:** Io posso piazzare il mio asse delle  $x$ , cioè  $s(t)$  come mi pare e piace, quindi posso ottenere una  $g$  **negativa**, per avere una accelerazione **positiva**.

Un tipo tira un sasso in aria

DATI:

$$v_0 = ?$$

$$h = 4,0m$$

$$s_0 = 0, t_0 = 0$$

$$a = +g (g = -9,81m/s^2)$$

$$v(t) = v_0 > 0 + \int_0^t d\tau a(\tau) = v_0 + \int_0^t d\tau g = v_0 + gt$$

dove  $g$  è ovviamente l'accelerazione gravitazionale.

$$s(t) = s_0 + \int_{t_0}^t d\tau v(\tau) = \int_0^t d\tau (v_0 + g\tau) = v_0 t + g \frac{t^2}{2}$$


---



---

**22/02/2019**

---

Ricordiamo che l'**accelerazione** è un **differenziale** della velocità

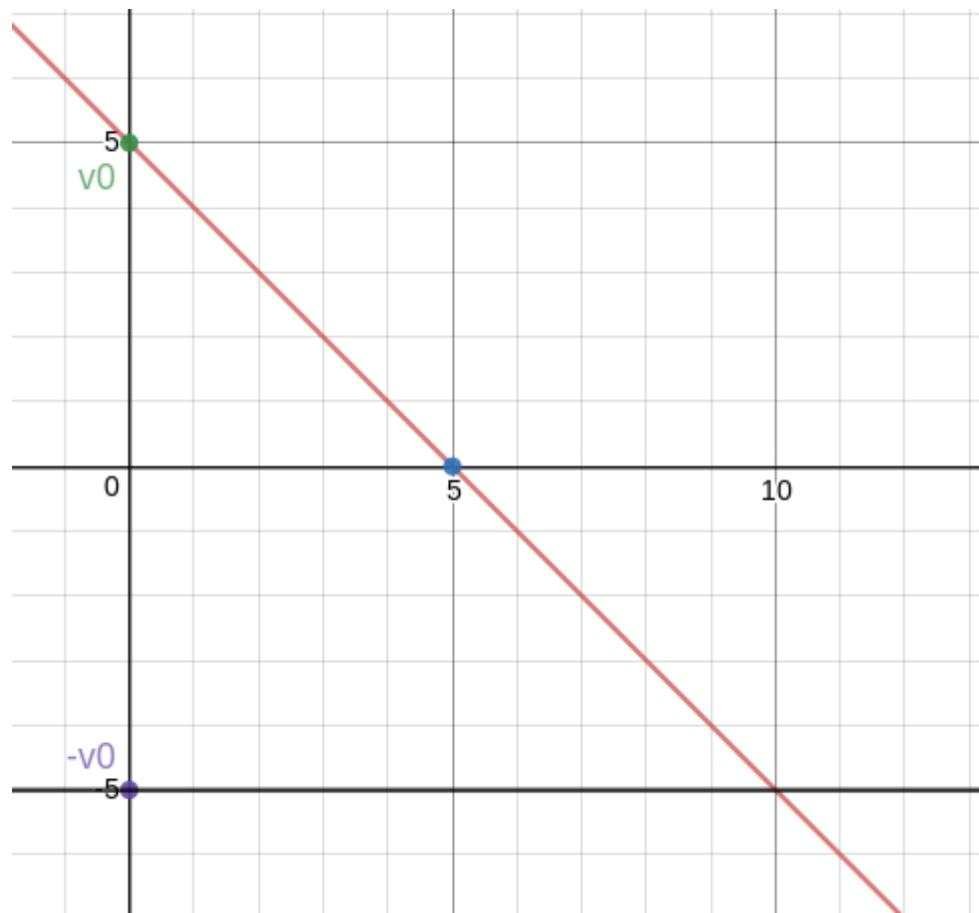
$$\frac{dv}{dt} = a$$

tornando all'esercizio precedente, otteniamo

$$\begin{cases} v(t) = v_0 + gt \\ s(t) = v_0 t + \frac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$

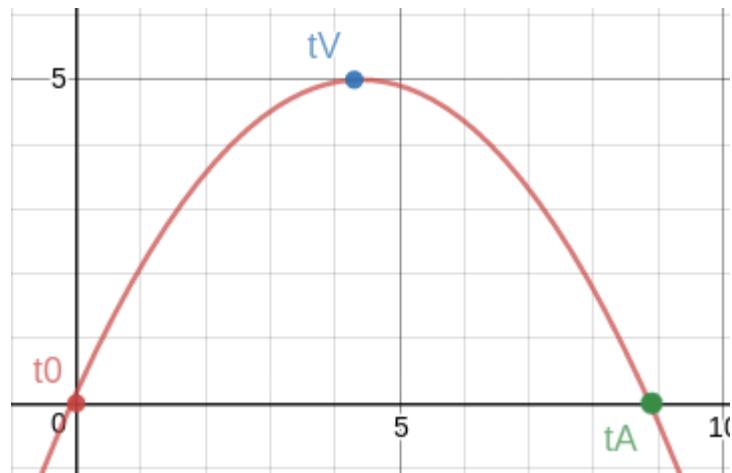
Ora nel punto in cui la velocità è zero:

$$\begin{cases} v(t) = 0 = v_0 + gt_{max} \\ s(t) = h_{max} = v_0 t_{max} + \frac{1}{2}gt_{max}^2 \end{cases}$$



Continuando:

$$\begin{cases} v_0 = -gt_{max} \\ h_{max} = -\frac{1}{2}gt_{max}^2 \end{cases} = \begin{cases} v_0 = -g\sqrt{\frac{2h_{max}}{-g}} = \sqrt{|g|^2 \frac{2h_{max}}{-g}} = \sqrt{-2gh_{max}} = 8,9m/s \\ t_{max} = \sqrt{\frac{2h_{max}}{-g}} = \sqrt{\frac{8m}{9,8m/s^2}} = \sqrt{0,816} \end{cases}$$



### Esercizio: Doppio lancio verticale

Vengono lanciati due sassi

DATI:

$$v_0 = 8,0 \text{ m/s}$$

$$a = g = -9,8055 \text{ m/s}^2$$

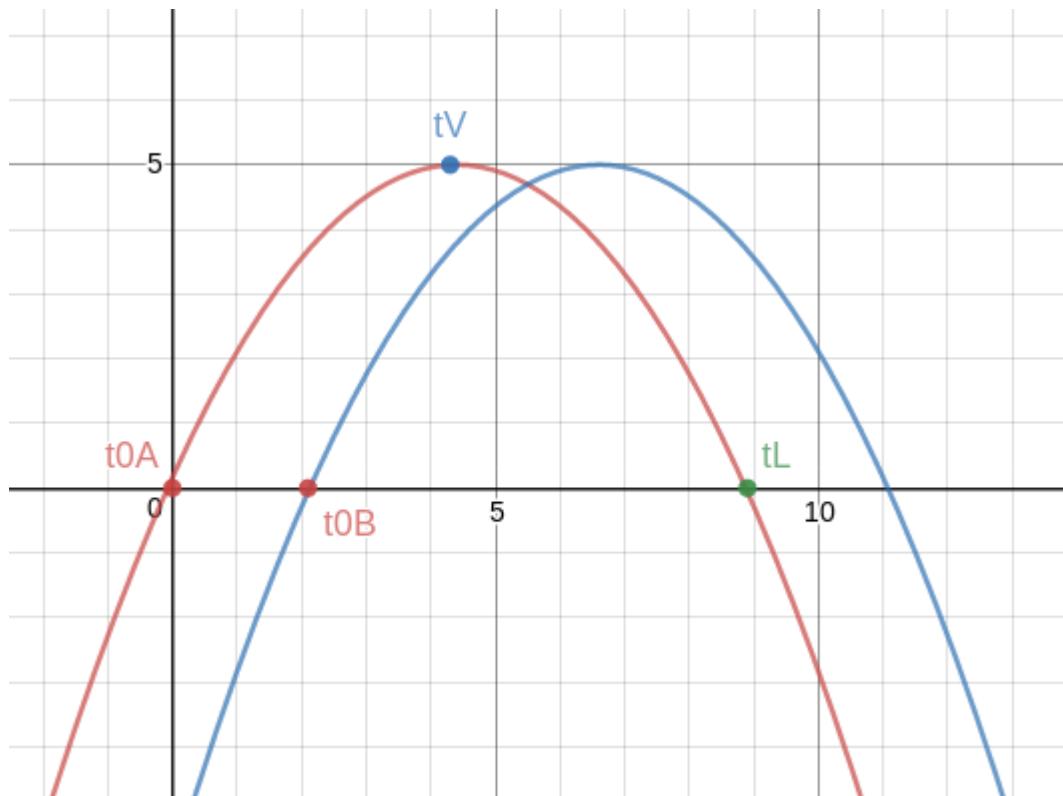
$$s_0 = 0 \text{ m}$$

$$t_{0A} = 0 \text{ s}$$

$$t_{0B} = \text{Arbitrario}$$

Si incontrano per  $s > 0$ ?

Se aspetto che il primo sasso vada a terra, no.



Come possiamo vedere, la possibilità che si incontrino è nell'intersezione delle due parabole.

1. **Primo Caso/Modo:**  $t_{0B} > t_{LA} = 2t_{max} = 2\sqrt{\frac{-2h_{max}}{g}}$

se ho che lo lancia dopo il landing dell'altro.

2. **Secondo Caso/Modo:**  $\begin{cases} s(t) = v_{0A}(t - t_{0A}) + \frac{1}{2}g(t - t_{0A})^2 \\ s(t) = v_{0B}(t - t_{0B}) + \frac{1}{2}g(t - t_{0B})^2 \end{cases}$  ottengo

~~$v_{0B}t + \frac{1}{2}gt^2$~~   $= v_{0A}(t - t_{0B}) + \frac{1}{2}g(t - t_{0B})^2$

Ottengo dunque che

$$0 = -v_{0A}t_{0B} + \frac{1}{2}gt_{0B}^2 - gt_{0B}$$

arrivando a  $t$

$$t = \frac{\frac{1}{2}gt_{0B}^2 - v_{0A}t_{0B}}{gt_{0B}} = \frac{t_{0B}}{2} - \frac{v_{0A}}{g}$$

## Grandezze vettoriali #

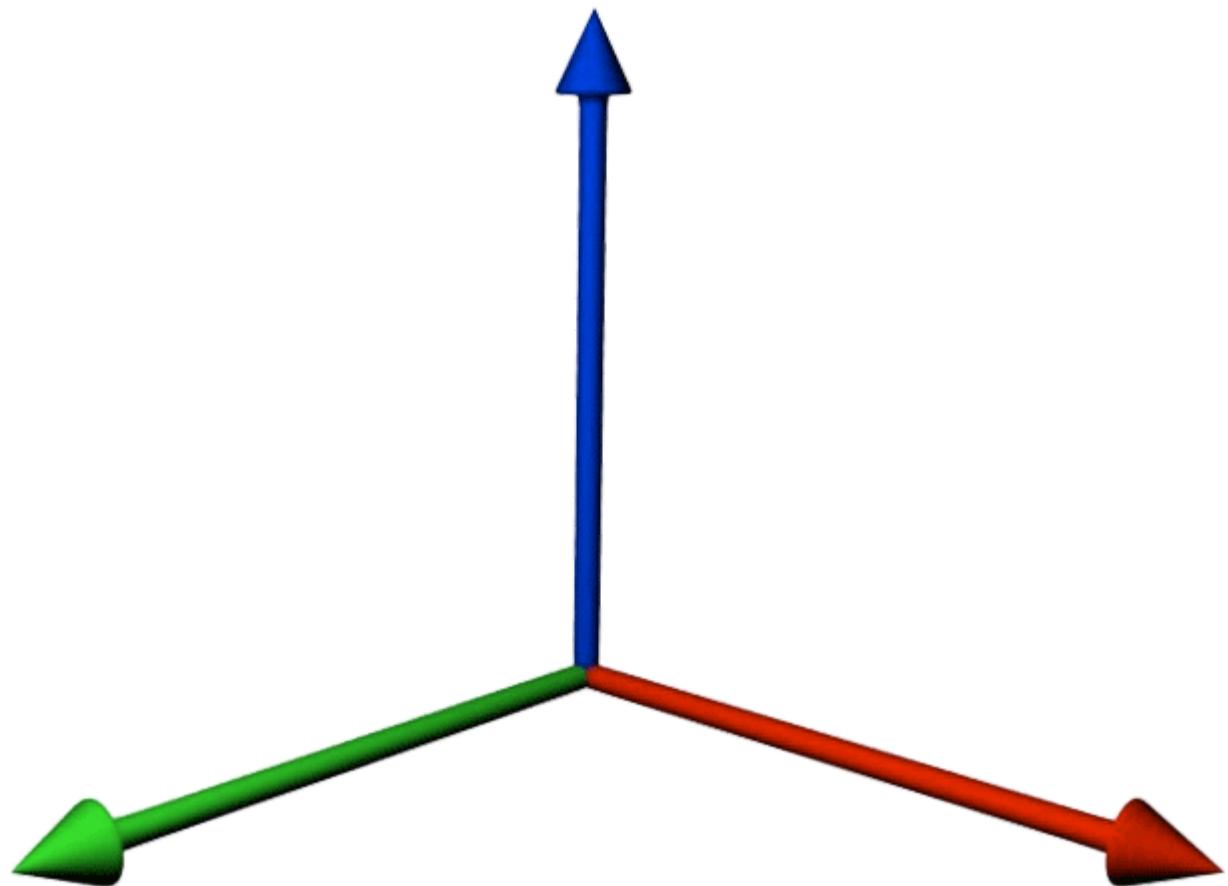
$$s \longrightarrow \vec{s}$$

$$v \longrightarrow \vec{v}$$

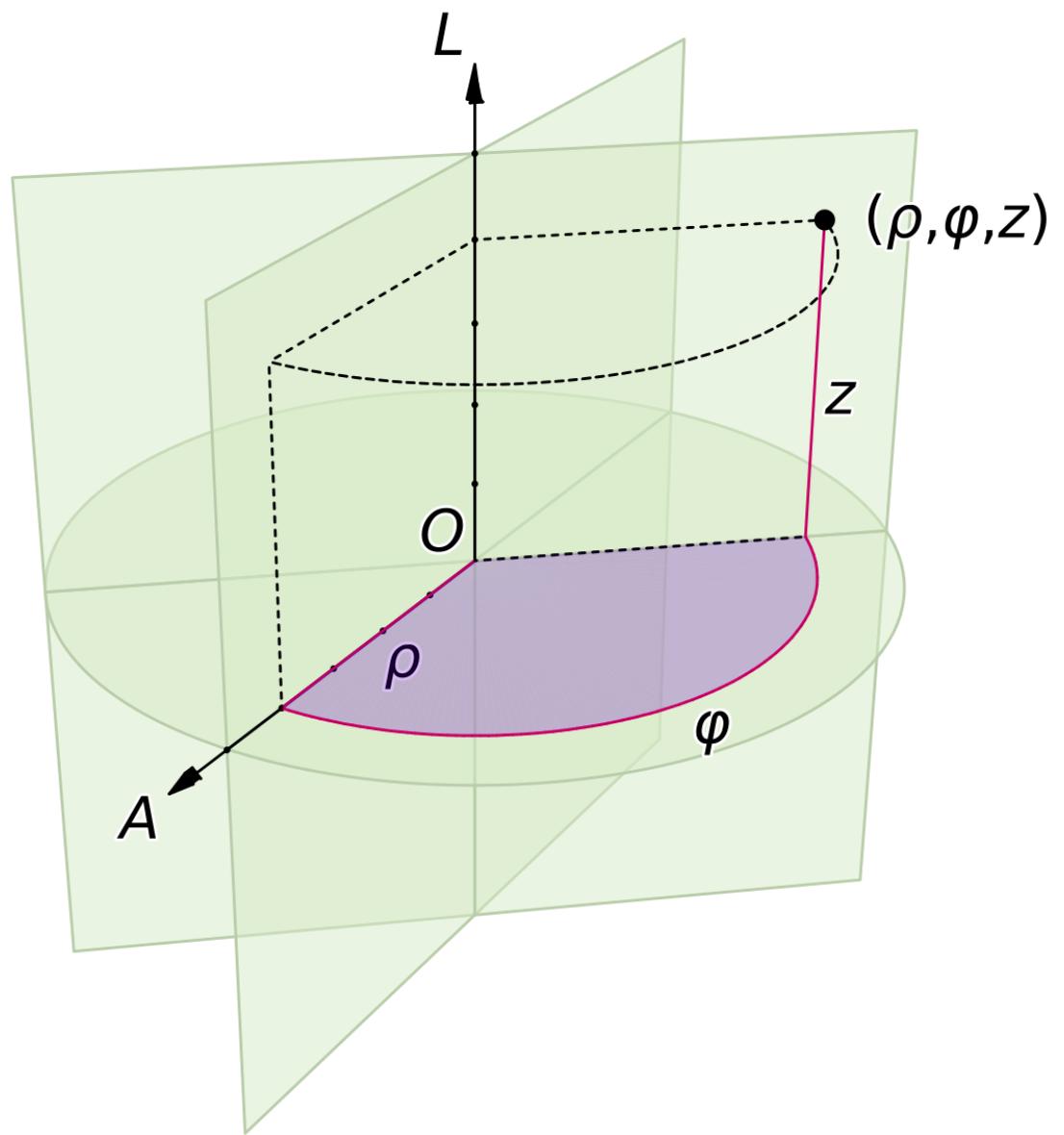
$$a \longrightarrow \vec{a}$$

Ci sono diversi tipi di assi

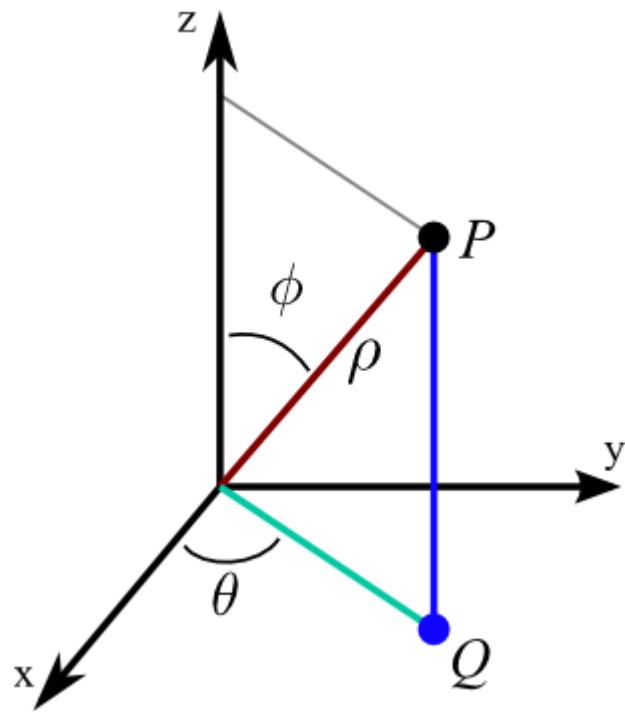
1. Cartesiano



2. Cilindrico



3. Polare



Formule (le quali non ho idea a cosa si riferiscono)

$$s \longrightarrow \Delta \vec{s} = \Delta \vec{r} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \Delta x \hat{x} + \Delta y \hat{y} + \Delta z \hat{z}$$

$$\vec{v}_M = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ \frac{\Delta y}{\Delta t} \\ \frac{\Delta z}{\Delta t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = v_x \hat{x} + v_y \hat{y} + v_z \hat{z}$$

## Velocità istantanea in più dimensioni

$$\vec{v}(t) = \lim_{t' \rightarrow t} \frac{\vec{s}(t') - \vec{s}(t)}{t' - t}$$

Al cambio di dimensioni posso avere valori in più.

La velocità, in ogni caso, è **sempre tangenziale alla direzione**.

## Accelerazione in più dimensioni

$$\vec{a}(t) = \lim_{t' \rightarrow t} \frac{\vec{v}(t') - \vec{v}(t)}{t' - t}$$

Prima avevo solo una variazione di velocità, qui invece ci dice che l'accelerazione c'è se la velocità in un certo istante è diversa dalla velocità in un altro istante. Ciò **non implica** che i due valori siano diversi. In matematiche:

$$\vec{a} = \vec{0} \Rightarrow \vec{v}(t') \neq \vec{v}(t) \Rightarrow v(t') \neq v(t)$$

Possiamo avere

1. Moto rettilineo uniforme (**MRV**)
2. Moto rettilineo uniforme vario (**MRVA**)
3. Moto non rettilineo uniforme (**MNRV**)
4. Moto non rettilineo non uniforme (**MNRRNV**)

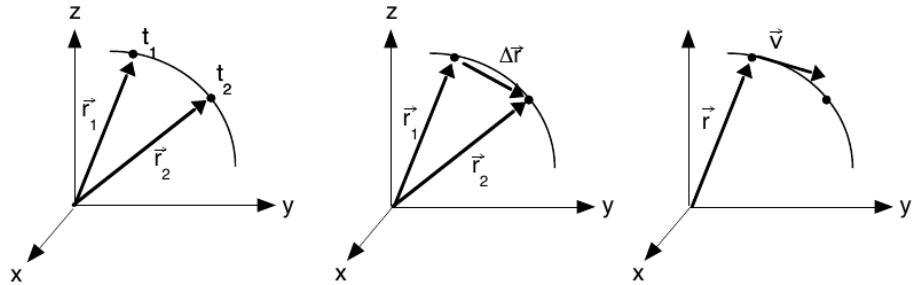


Figura 2.7: Vettori posizione del punto  $P$  agli istanti  $t_1$  e  $t_2$  (a sinistra). Vettore spostamento  $\Delta\vec{r}$  (al centro). Vettore velocità  $\vec{v}$  (a destra).

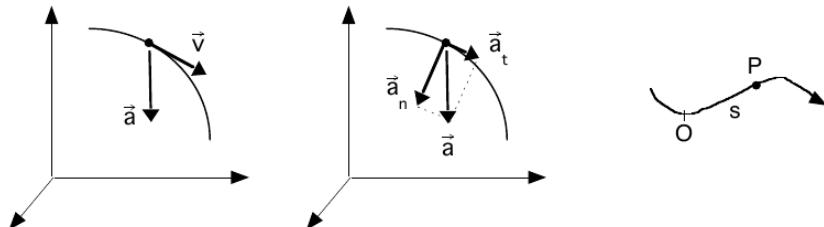


Figura 2.8: A sinistra: il vettore accelerazione è diretto verso la concavità della traiettoria. Al centro: componenti tangenziale e normale dell'accelerazione. A destra: coordinata curvilinea

## Moto circolare uniforme #

Ha velocità costante, con traiettoria circonferenza.

$$\begin{cases} x = r \cos \phi \\ y = r \sin \phi \end{cases}$$

per trovare le coordinate.

$$r(t) = \cos t = R \Rightarrow s = R\phi$$

Perchè  $R=s_\phi$ ...? boh(dubbio)

Ogni punto della velocità è tangente alla circonferenza (incerto)

La velocità è il prodotto della **velocità angolare** per il raggio.

**Velocità:**

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{d(R\phi)}{dt} = R \frac{dy}{dt} = \omega R$$

$\omega$  è la **pulsazione**, cioè la **velocità angolare**.

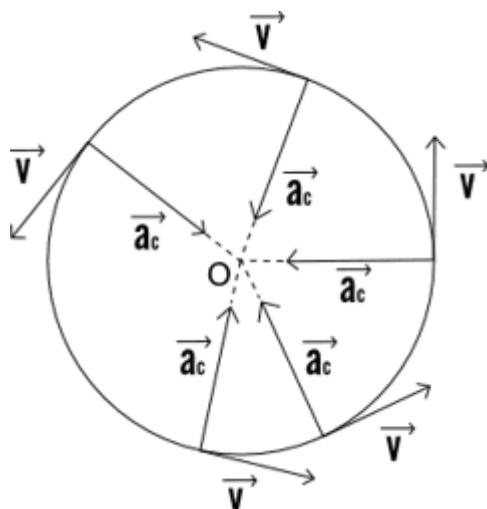
**L'accelerazione:**

$$a = \frac{dv}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = \alpha R$$

L'accelerazione è **diretta verso il centro**, cioè **accelerazione centripeta**.

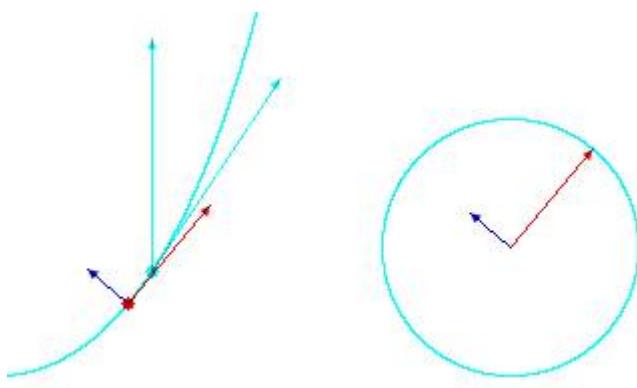
Accelerazione centripeta in un moto non circolare = **accelerazione normale**.

È normale moto, perpendicolare.



**Nota che:**

Se non ho una circonferenza, posso dire che **l'accelerazione ORTOGONALE** ci porta ad avere un'accelerazione centripeta verso una ipotetica circonferenza per la nostra curva:



$$v_x = \frac{dx}{dt} = R \frac{d \cos \phi}{dt} = -R \sin \phi \frac{d\phi}{dt}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = R \frac{d \sin \phi}{dt} = R \cos \phi \frac{d\phi}{dt}$$

Quindi ottengo che

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = R \frac{d\phi}{dt} = R\omega$$

con le accelerazioni

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -R[\cos \phi (\frac{d\phi}{dt})^2 + \sin \phi \cancel{(\frac{d^2\phi}{dt^2})}]$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = R[-\sin \phi (\frac{d\phi}{dt})^2 + \cos \phi \cancel{(\frac{d^2\phi}{dt^2})}]$$

**Nota bene:**  $\frac{d^2\phi}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{d\phi}{dt} \right]$

dove  $\left[ \frac{dy}{dt} \right] = \omega$  è costante, quindi la derivata di una costante è zero.

## 25/02/2019

---

$$\omega = \cos t$$

**Velocità angolare:**  $v = \omega r$

### esercizio palla di cannone

Calcolo della traiettoria di un oggetto sparato con un cannone.

Il cannone è posizionato su  $(0, 0)$ .

$$x_0 = 0 \quad v_{0x} = v_0 \cos \phi$$

$$y_0 = 0 \quad v_{0y} = v_0 \sin \phi$$

$$\vec{v}_0 = v_{0x} \hat{x} + v_{0y} \hat{y} \iff v_o, \phi$$

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_{0x}t \\ y(t) = y_0 + v_{0y}t + \frac{1}{2}at^2 \end{cases} \quad \begin{cases} x = v_{0x}t \\ y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad \begin{cases} t = \frac{x}{v_{0x}} \\ y = \frac{v_{0y}}{v_{0x}}x - \frac{1}{2v_{0x}}gx^2 \end{cases}$$

ottenendo

$$x = -\frac{b}{a} = \tan \phi \frac{2v_{0x}^2}{g} = \frac{2v_{0x}v_{0y}}{g}$$

Sottolineo che ho sostituito  $y = \tan \phi x - \frac{g}{2V_{0x}^2}x^2 = bx + ax^2$

La componente **perpendicolare** cambia la direzione del moto.

#### Nota

Non posso dopo un po' continuare a derivare perchè ottengo

$$\vec{F} = c \cdot \vec{a}$$

derivando rimarrebbe solo  $c$ .

## Inerzia #

### Primo principio di inerzia:

$$\vec{v} = \vec{0}$$

$$\vec{v} = \overrightarrow{\text{costante}}$$

Un corpo rimane in moto rettilineo uniforme fino a quando una forza esterna ne cambia e ferma la quiete del moto.

**Sistema di riferimento inerziale:** Sistema di sistemi di riferimento tra i quali, per passare tra di essi attraverso una **velocità costante**.

**Molto importante:** Se sono sopra un oggetto movente non posso affermare se si sta muovendo, perchè mi sto muovendo con esso.

### Secondo principio di inerzia:

#### Esperimenti carrelli

*IMMAGINE che non trovo*

avendo due carrelli che si tirano tra loro con una molla di mezzo cosa succede?

Beh se i carrelli sono uguali, ho i  $\Delta v_1 = \Delta v_2$

altrimenti, se carrello 2 è 2 volte la **massa** del carrello 1 ottengo  $\Delta v_1 = 2\Delta v_2$

idem se vale 3 ottengo  $\Delta v_1 = 3\Delta v_2$

da qui otteniamo che

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Sull'es di prima ottengo

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Forza è la variazione della quantità di moto per l'unità di tempo.

La forza è l'interazione.

per l'esercizio di prima, con  $v_1$  con stessa massa di  $v_2$  abbiamo

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} = -\frac{d\vec{p}_2}{dt}$$

$$\text{dove } \vec{F}_1 = \frac{d\vec{p}_1}{dt}, \vec{F}_2 = \frac{d\vec{p}_2}{dt}$$

OTTENENDO

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = \frac{dm}{dt}\vec{v} + m\frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\text{Noi sappiamo che } a = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

quindi abbiamo la **seconda legge della termodinamica**

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$\text{cioè } \vec{F} = m \cdot \vec{a} + \frac{dm}{dt}\vec{v}$$

**LA MAGGIOR PARTE DELLE VOLTE**  $\frac{dm}{dt}\vec{v}$  SI PUÒ IGNORARE PERCHÈ È NULLO, vale se abbiamo tipo un razzo mandato nello spazio.

Unità di misura: **NEWTON** =km/h

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$d\vec{p} = \vec{F}dt$$

per calcolare la

**forza media** dobbiamo avere l'impulso.

$$\text{Impulso: } \Delta\vec{p} = \int_{t_0}^t \vec{F}(\tau)d\tau$$

Avendo poi

$$\text{Forza media: } \vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$$

### Esercizio pallina da tennis

Ho una pallina da tennis, la tiro contro il muro che succede?

$m = 150g$  di pallina

$$v = 36 \text{ km/h} = 10 \text{ m/s}$$

otteniamo

~~$$\vec{p}_i = 1,5 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$~~ è sbagliato!

**Non ho un vettore dall'altra parte!** devo mettere  $\hat{x}$

$$\vec{p}_i = 1,5 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \hat{x}$$

ottenendo

$$\begin{cases} \vec{p}_i = 1,5 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \hat{x} \\ \vec{p}_i = -1,5 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \hat{x} \end{cases}$$

il professore dovrà fornirmi in quanto tempo si stretcha. ( $\Delta t$ )

### Principio di sovrapposizione:

Gli effetti delle forze sono equivalenti alla sovrapposizione degli effetti delle forze ( *somma* )

$$\vec{F}_{tot} = m \vec{a}_{tot}$$

$$\vec{s}(t) = \vec{s}_0 + \int_{t_0}^t d\tau \vec{v}_0(\tau) + \int_{t_0}^t d\tau + \int_{t_0}^t du \frac{\vec{F}(u)}{m} \quad (\cancel{du} - \cancel{du})$$

**in ordine di forza crescente:**

1. Forza di gravità
2. Forza debole
3. Forza elettromagnetica
4. Forza Forte

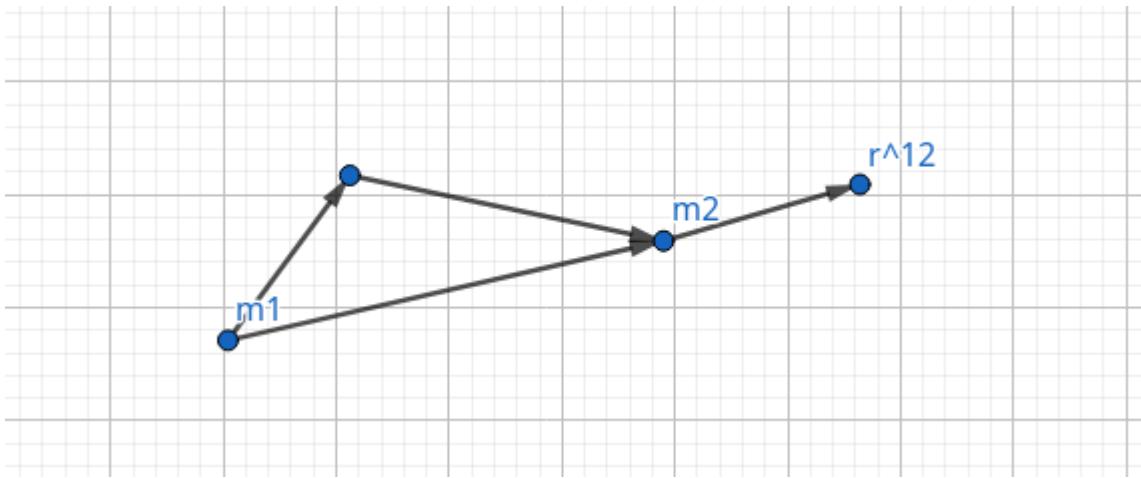
---

**01/03/2019**

---

**Forza di gravità**

#



La massa descrive **quanto intensamente** sento la gravità.

**Forza che 1 esercita su 2:**  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12}$

dove G è la costante di **gravitazione universale**

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

La massa  $m_1$  è influenzata dalla massa  $m_2$  e viceversa.

La gravità si propaga alla velocità della luce, ma non è istantanea, però per noi abbiamo velocità infinita.

Nota sulla elettricità:

$$\vec{F} = Kel \frac{g_1 g_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12} \text{ dove } Kel = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

## Forza Peso #

Forza con la quale descrivo il fenomeno della caduta dei gravi sulla superficie terrestre.

*Ho un palazzo alto 100 metri, butto un sasso.*

$$\vec{F} = -G \frac{Mm}{r^2} \hat{r} \text{ dove } M \text{ è la massa della terra, } m \text{ è la massa del sasso.} (\vec{P} = -m\vec{g})$$

**Teorema della forza centrale:** Posso assumere che la massa sia concentrata al centro dell'oggetto, poiché le forze applicate vanno al centro.

$$\vec{F} = -G \frac{M_T m}{(R_T + h)^2} = -\frac{GM_T}{R_T^2(1 + \frac{h}{R_T})} m$$

ora so che

$$(1 + \epsilon)^\alpha = 1 + \alpha\epsilon \text{ con } \epsilon \ll 1$$

quindi

$$\frac{1}{1+\epsilon} = 1 - \epsilon$$

So che

$$-\frac{GM_T}{R_T^2} \left(1 + 2\frac{h}{R_T}\right)m = -\frac{GM_T}{R_T^2} \text{ perch\`e } \left(1 + 2\frac{h}{R_T}\right) \text{ \`e dell'ordine di } 10^{-5}$$

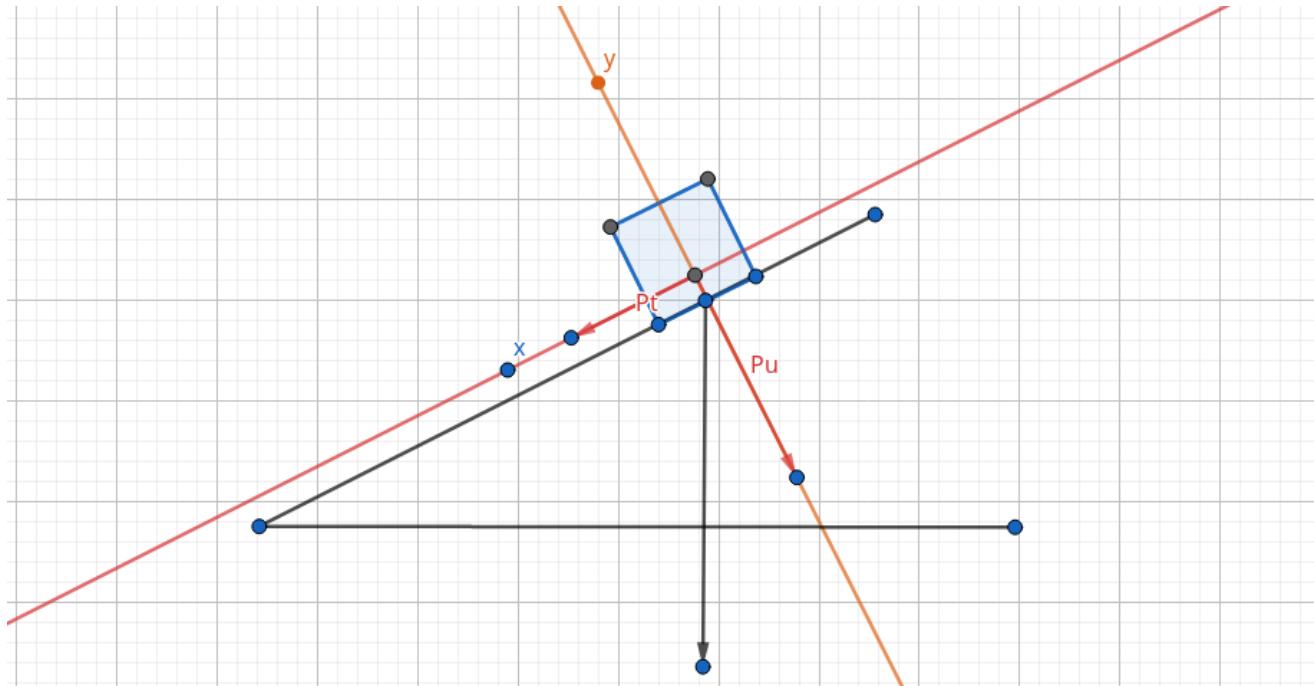
$$\vec{g} = G \frac{M_T}{R_T^2} \hat{R}_T$$

**La gravit\`a della luna \`e un sesto della gravit\`a della terra**

la massa \`e collegata in qualche modo a ci\`o?

NO.

### Piano inclinato



$$\vec{N} + \vec{P}_{perp} = 0$$

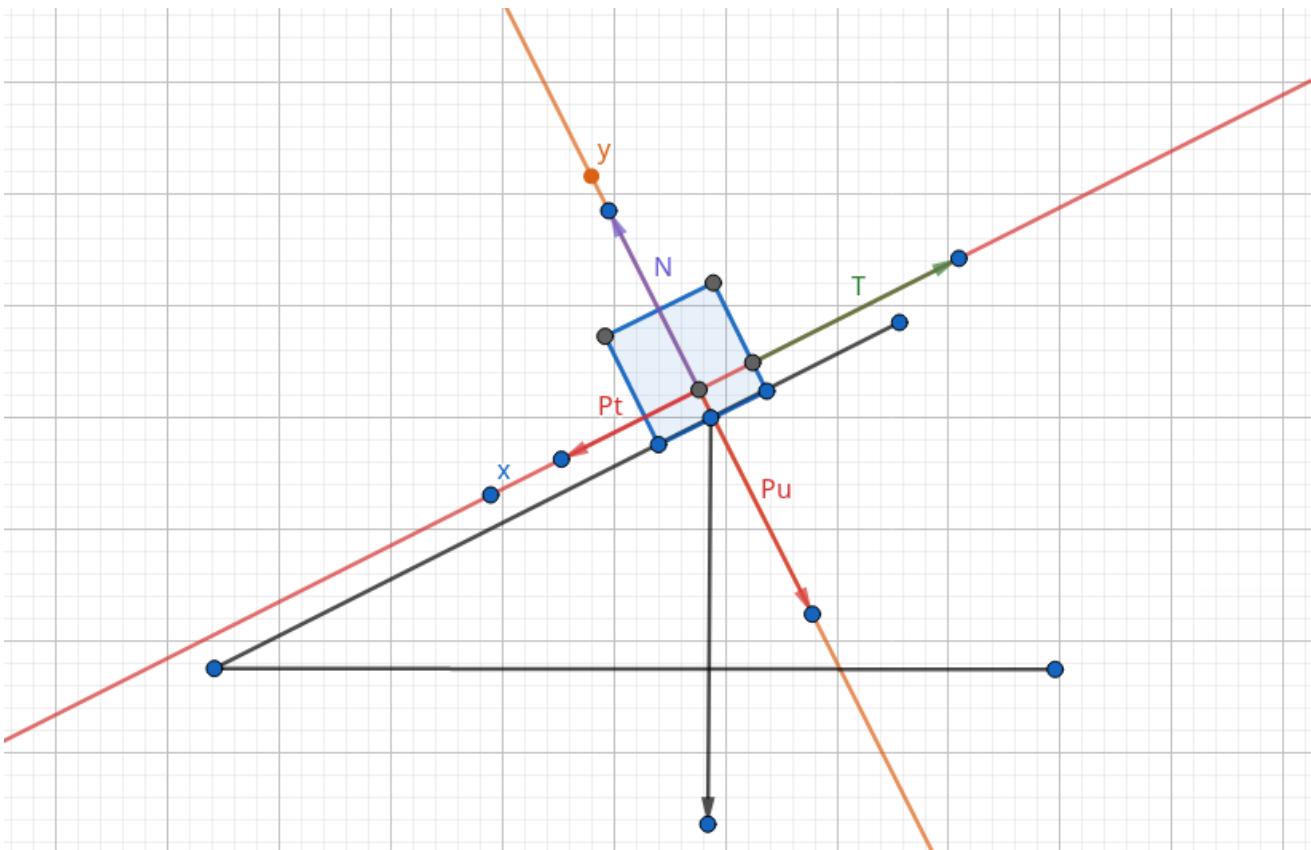
$$P_{parall} = P \sin \alpha$$

$$P_{perp} = P \cos \alpha$$

$$\begin{cases} t : ma_t = F_t = mg \sin \alpha \\ n : ma_n = F_n = 0 \end{cases}$$

da questo ottengo  $a_t = g \sin \alpha$

Se aggiungo una fune



ottengo che ho una forza  $T$  che sommata a  $P_t$  è  $= 0$

quindi ottengo

$$\vec{P} + \vec{N} + \vec{T} = \vec{0}$$

Importante:

$$\vec{F}_c = m\vec{a}_c \neq \vec{0}$$

Con la forza centripeta, posso immaginarmi come una fune che è collegata al centro della circonferenza.

Dunque il carico di rottura sale quadraticamente:

$$F_c = -m\omega^2 R = -G \frac{mM}{R^2}$$

otteniamo che

### Terza legge di Keplero

$$\omega^2 = \frac{GM}{R^3} \implies \omega = \frac{2\pi}{T^2} \cdot \frac{R^3}{GM} = \frac{GM}{4\pi^2 R^3} \text{ dove questa è costante.}$$

**Forza di attrito**

#

Forza di reazione vincolare.

$$\vec{F}_a | \vec{F}_t + \vec{F}_A = \vec{0}$$

### L'attrito statico

dipende da quanto l'oggetto "preme". Ovviamente dipende dalla forza peso, che è uguale e opposta a  $N$ . Quindi uso N

Nota bene che:

$$\vec{F}_a \leq \vec{F}_{a,max} = \mu_s |\vec{N}| \hat{t}$$

Questo esiste sempre.  $\mu_s$  è il **coefficiente di attrito statico**.

### Attrito dinamico

$$\vec{F}_{AD} = \mu_c |\vec{N}| \hat{t} \longrightarrow \vec{F}_{AD} = -\mu_c |\vec{N}| \hat{v}$$

Disco rotante:

Velocità  $\omega$ , ho la corona inglese sopra, forza di attrito  $\mu_s = 0,3$  qual è il massimo a cui posso far girare prima che se ne vada?

## 04/03/2019

*spiegazione disco rotante che ho perso*

### Esercizio: Macchina che frena(senza ABS) #

Ho una macchina che frena

$t_f$  =tempo frenata=?

$s_f$  =spazio frenata=?

$\mu_s$

$$\vec{F} = -\vec{F}_a = m\vec{a}$$

$$-\mu_c N = m \frac{dv}{dt}$$

$$-\mu_c N(t - t_0) = m(v(t) - v_0)$$

$$-\mu_c N(t_f - t_0) = m(v_t - v_0) \text{ dove } mg = N \text{ e } v_t = 0$$

ottengo:

$$\mu_c g t_f = v_0$$

Concludendo

$$t_f = \frac{v_0}{\mu_c g} \implies s_f = \frac{1}{2} a t_f^2 = \frac{1}{2} (-\mu_c g) \frac{v_0^2}{(\mu_c g)^2} = -\frac{1}{2} \frac{v_0^2}{\mu_c g}$$

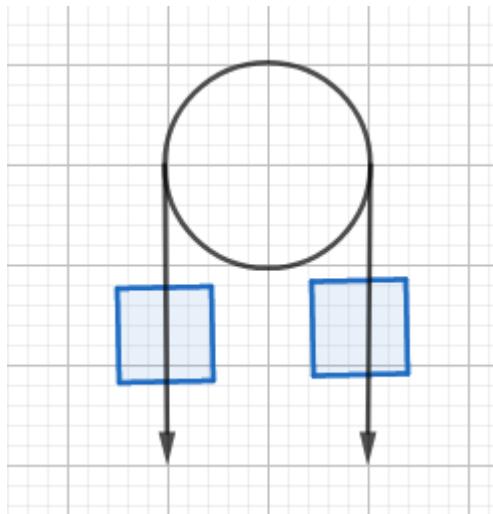
la posso calcolare integrando

$$-\mu_c N \frac{(t-t_0)^2}{2} = m[(s(t) - s_0) - v_0(t - t_0)]$$

ottenendo

$$-\mu g \frac{t_f^2}{2} = s_f - v_0 t_f$$

## Esempio della carrucola #



Ho due carrucole, attaccate ad una ruota.

Supponendo che la corda **non si estende**:

1. Si muovono a velocità uguali;
2. Le variazioni di velocità sono uguali.

Posso dunque supporre che  $\vec{a} = \vec{a}_1 = \vec{a}_2$

$$\begin{cases} m_1 \vec{a} = \vec{P}_1 + T \\ m_2 \vec{a} = \vec{P}_2 + T \end{cases} \implies \begin{cases} m_1 \vec{a} = \vec{P}_1 - T \\ m_2 (-\vec{a}) = \vec{P}_2 - T \end{cases} \implies \begin{cases} m_1 \vec{a} = m_1 g - T \\ m_2 \vec{a} = T - m_2 g \end{cases}$$

Ottieniamo:

$$(m_1 + m_2)a = (m_1 - m_2)g \implies a = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} g$$

Osservo che

Se le due masse sono uguali,  $m_1 - m_2 = 0$  non si muovono! l'accelerazione è nulla!

Se una delle due forze è zero otteniamo "g", quindi ottengo  $\vec{a} = \pm g$  cioè uno dei due cade.

Ad una massa, tipo un treno che va per dei binari:

1. Applico forza parallela **concorde**, posso affermare che sono **avvantaggiato dal moto**;
2. Applico forza parallela **discorde** (che ha il senso opposto). Posso affermare che sono **svantaggiato dal moto**.
3. Forza perpendicolare (applicata ad esempio in "giù") non sono avvantaggiato ne svantaggiato dal moto.

Voglio dunque ottenere una forza che dipende da:

1. Per quanto tempo la applico;
2. Come la applico(1,2,3)

**Lavoro:** Prodotto scalare forza con spostamento.

$$w = \vec{F} \Delta \vec{s} = \cos(\Theta_{F_1 \Delta s})$$

cioè

$$[w] = [FL] = M \frac{L}{T^2} L = [m \frac{L^2}{T^2}]$$

Con **unità di misura** pari a  $1N \cdot 1m$

La formula di prima **VALE SOLO SE UNIFORME SU  $\Delta \vec{s}$**

### Esempio: Lancio sasso in aria

Lancio in aria

$$w_{grav} = \vec{F} \cdot \Delta \vec{s} =$$

$$\begin{cases} \vec{F} = -mg \cdot \hat{z} \\ \Delta \vec{s} = h \hat{z} \end{cases} = \vec{F} \cdot \Delta \vec{s} = -mgh$$

$$w_{grav} = -mgh$$

cioè la gravità oppone.

Il sasso torna giù

$$w_{grav} = \vec{F} \cdot \Delta \vec{s} =$$

$$\vec{F} = -mg \hat{z}$$

$$\Delta \vec{s} = -h \hat{z}$$

ottengo

$$w_{grav} = mgh$$

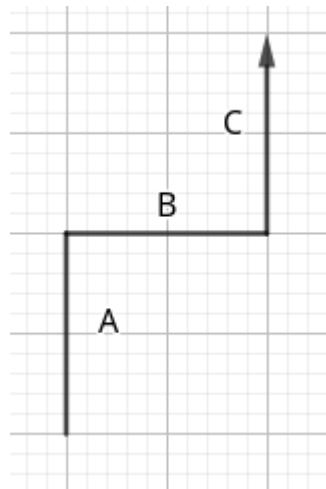
cioè la gravità aiuta.

Caso dove il sasso viene lanciato+ il sasso torna giù

$$\vec{F} = -mg$$

$$\Delta \vec{s} = \vec{0} \text{ quindi zero.}$$

Caso dove fa dei giri strani



In questo caso

$$\begin{cases} w_a = -mg\frac{h}{3} \\ w_c = -mg\frac{2}{3}h \\ w_b = 0 \end{cases}$$

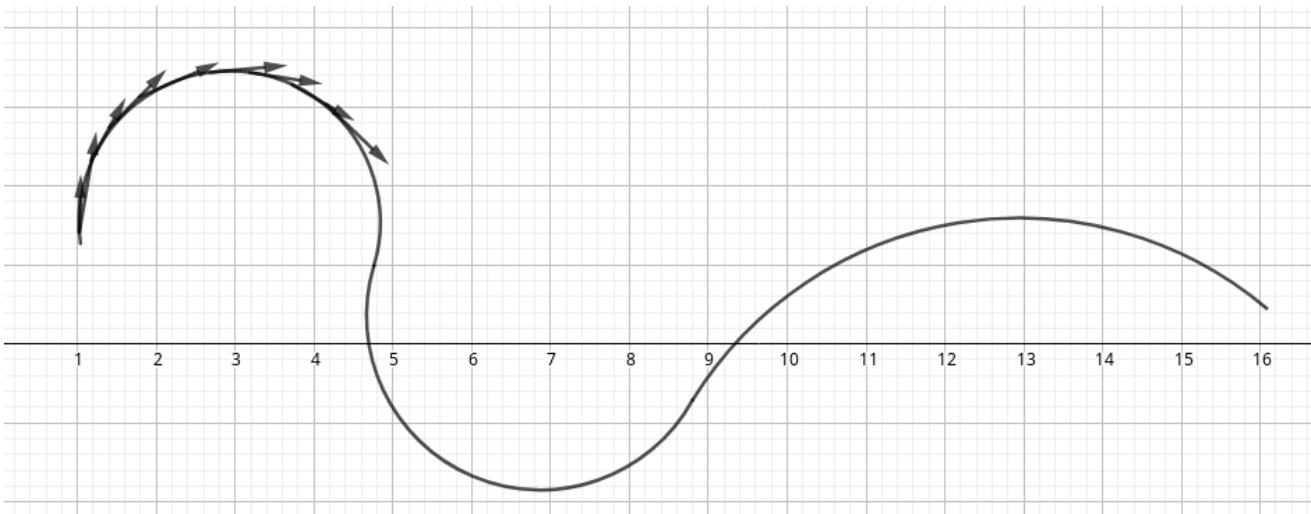
$$w_b = 0 \text{ perchè ho } \Delta \vec{s} = 0$$

ottengo che alla fine, sommandoli è  $= -mgh$ .

Questo ci fa capire che la formula rimane la stessa!

**Con Forza non costante:**

Cosa succede se la **forza non è costante?**



dunque questo grafico, con curva che chiameremo AB

$$\overrightarrow{AB} = \sum_{i=1}^N d\vec{s}_n \longrightarrow_{n \rightarrow \infty} \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

Quindi la vera definizione di lavoro è:

**Lavoro:**  $W_{A \rightarrow B} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s}$

## Potenza

#

### Potenza istantanea

Lavoro che compie nel tempo:  $\frac{dw}{dt}$

### Potenza media

Totale del lavoro nell'intervallo di tempo:  $\frac{w_{tot}}{\Delta t}$

**08/03/2019**

## Forza conservativa

#

$$W_{a \rightarrow a} = 0$$

Cioè  $\oint = \vec{F} \cdot d\vec{s}$

**Teorema:**  $\oint_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s}$  non dipende dal percorso  $A \rightarrow B$

**Dimostrazione:**

Ho due semimetà I e II

$$\oint_{II} \vec{F} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$I \oint_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} + II \oint_B^A \vec{F} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$I \oint_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = -II \oint_B^A \vec{F} \cdot d\vec{s} = II \oint_B^A \vec{F} \cdot d\vec{s} \implies wI_{a \rightarrow b} = wII_{a \rightarrow b}$$

■.

## Forza Non conservativa

#

Una forza non conservativa è la **forza di attrito**.

**Esempio:**

Ho un oggetto sul quale ho una forza esercitata

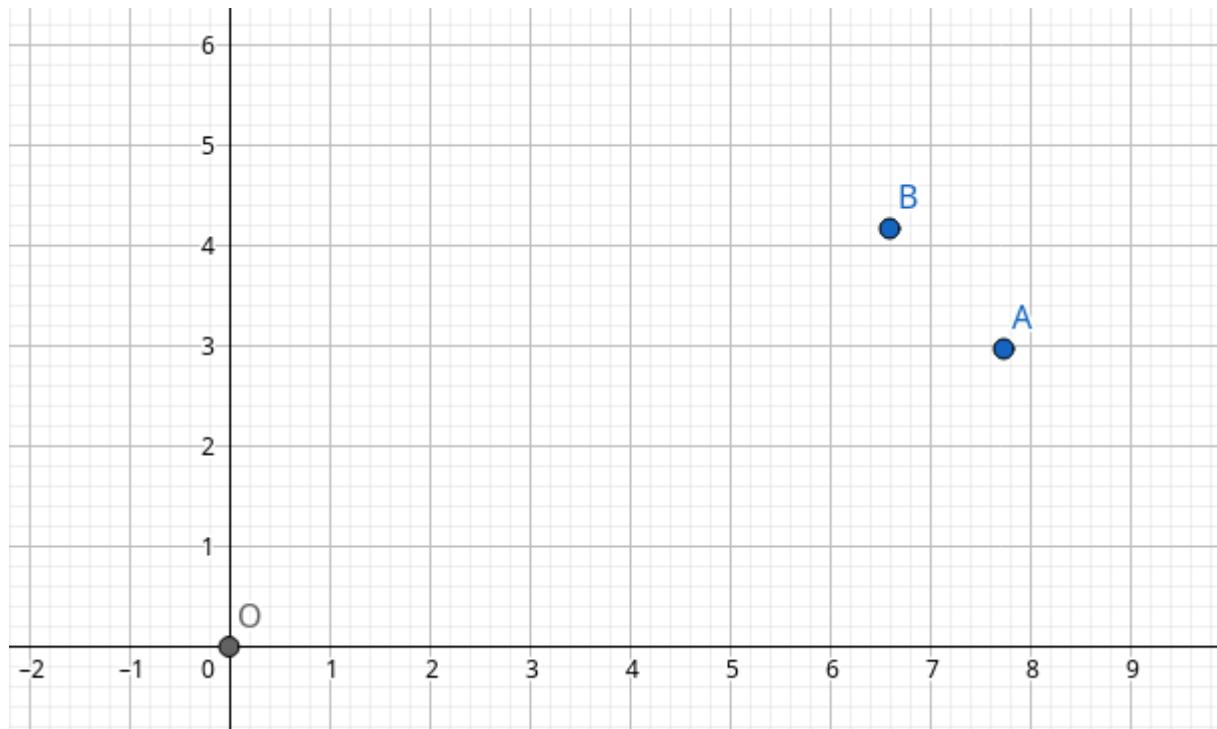
per andare da A a B quanto lavoro applica la forza d'attrito?

$$W_{A \rightarrow B}^{(A)} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = \vec{F}_A \cdot \int_A^B d\vec{s} = F_a \times \bar{AB} \cos \alpha_{\vec{F}_A, \bar{AB}}$$

Otteniamo che questa formula è  $= -\mu_d mgd = W_{B \rightarrow A}^{(A)}$

ci permette di dire che  $\implies W_{A \rightarrow A}^{(A)} = -2\mu_d mgd$  dove  $A \rightarrow A$  mi significa qualcosa che va da un punto, fa un percorso non nullo e torna dove era.

## Scelta origine del sistema di riferimento



Ho un asse cartesiano.

$$W_{O \rightarrow B} = \int_O^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = f(\vec{B})$$

$$W_{A \rightarrow B} = W_{A \rightarrow O} + W_{O \rightarrow B} = -W_{O \rightarrow A} + W_{O \rightarrow B}$$

che è uguale a

$$W_{A \rightarrow B} = f(\vec{B}) - f(\vec{A})$$

Ma allora facendo così ottengo che

Il valore di  $f$  è arbitrario, dipende dalla posizione di  $O$ , mentre le differenze di  $f$  sono non arbitrarie cioè non dipendono da  $O$ , posso avere un'origine qualsiasi.

## Energia Potenziale #

$$\int_O^B \vec{F} d\vec{s} = W_{A \rightarrow B} = \overset{\text{def}}{=} -(E_p(\vec{B}) - E_p(\vec{A}))$$

$$\text{dove } (E_p(\vec{B}) - E_p(\vec{A})) = \Delta E_p = \overset{\text{def}}{=} -W$$

Energia Potenziale:  $\Delta E_p = \overset{\text{def}}{=} -W$

tutto questo è possibile solo perchè il  $\Delta$  **non è arbitrario**.

mentre l'energia potenziale è definita a meno di costante arbitraria.

## Energia Cinetica #

$$W_{(W>0)} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_A^B m \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot d\vec{s} = \int_A^B m d\vec{v} \cdot \vec{v} = \text{caso speciale} = \int_A^B mv dv$$

Per fare questa cosa ho dovuto fare un trick brutalmente poco matematico: passare il  $dt$  sotto al  $ds$

$$= [m \frac{v^2}{2}]_A^B = \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2$$

Ottengo dunque che energia cinetica

- non richiede lavoro;
- non dipende da forze esterne;
- $W = \Delta E_K$  vale sempre;
- se c'è energia cinetica, qualcosa , una forza ci ha lavorato su.

Energia Cinetica:  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

## Bilancio energetico #

Avendo

$$A \rightarrow B$$

$$\vec{F}_{TOT} = \sum_i \vec{F}_i = \sum_i \vec{F}_i^{(Con)} + \sum_k \vec{F}_k^{(n.c.)}$$

$$W_{TOT} = \int_A^B \vec{F}_{TOT} \cdot d\vec{s} = W^{(cons)} + W^{(n.cons)} = \Delta E_k$$

$$\text{con } W^{(cons)} = -\Delta E_p$$

dove ho che *con* è forza **conservativa**

mentre n.c. è forza **non conservativa**.

$$\text{ottengo che } -\Delta E_p + W^{n.cons.} = \Delta E_k$$

Ottenendo il **Teorema generale del bilanciamento energetico**

$$\Delta E_p + \Delta E_k = W^{n.cons.}$$

Alla fine gli integrali li devo usare solo con forze non conservative.

## Varie casistiche

1. Caso: Non ho forze non conservative

$$\Delta E_p + \Delta E_k = 0$$

$$(E_p^f - E_p^i) + (E_k^f - E_k^i) = 0$$

$$(E_p^f + E_k^f) + (E_k^i + E_p^i) = 0$$

Quindi abbiamo

$$E = E_p + E_k$$

**è energia meccanica!**

$$\Delta E = W^{n.cons.}$$

2. Ci sono forze non conservative

$$W^{n.cons} = \Delta E \neq 0$$

## Energia Meccanica

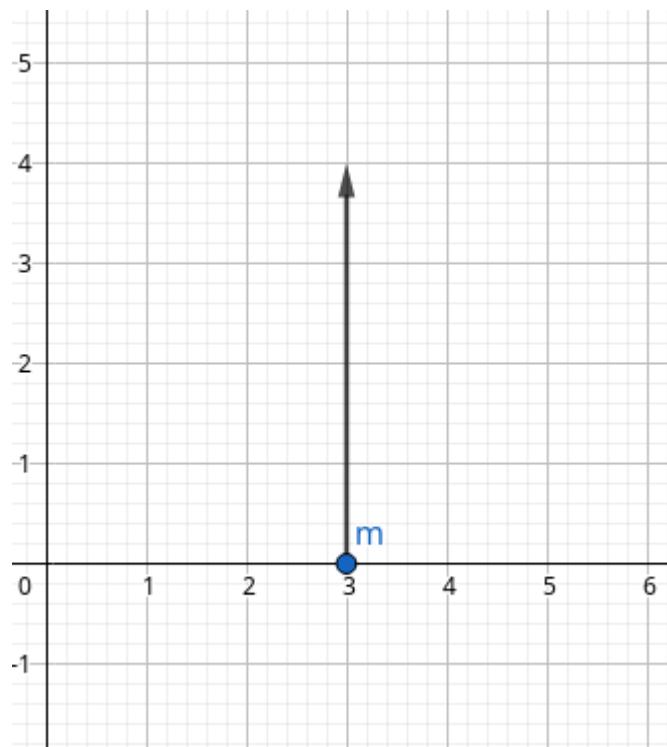
#

$$E = E_p + E_k$$

## Esercizi:

#

Lancio massa m in aria, a che altezza arriva?



$$E = \cos t$$

$$E^i = E_p^i + E_k^i = \frac{\sqrt{\pi}}{e} + \frac{1}{2}mv^i = \frac{1}{2}mv_0^2$$

$$E^t = E_p^t + E_k^t = \frac{\sqrt{\pi}}{e} + mgh + 0 = mgh$$

dall'insieme di queste due otteniamo

$$\cancel{\frac{\sqrt{\pi}}{e}} + gh = \frac{v_0^2}{2} + \cancel{\frac{\sqrt{\pi}}{e}}$$

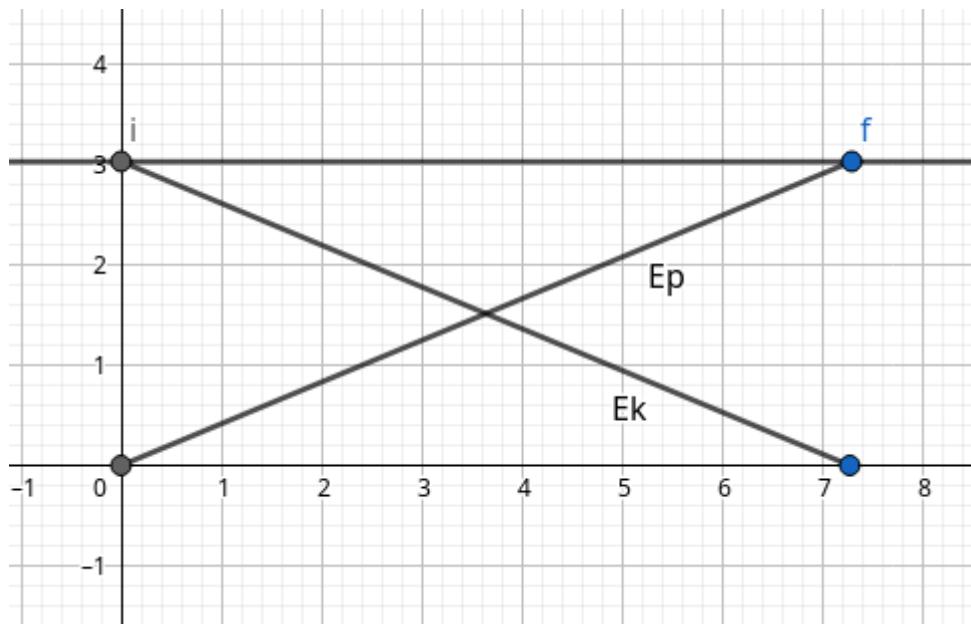
$$h = \frac{v_0^2}{2g}$$

$$\Delta E = 0$$

$$\Delta E_k = -\Delta E_p$$

cose che non ho fatto in tempo a ricopiare

Poiché le energie sono lineari, alla metà del grafico ho esattamente un'uguaglianza tra  $E_P = E_k$



### Per casa

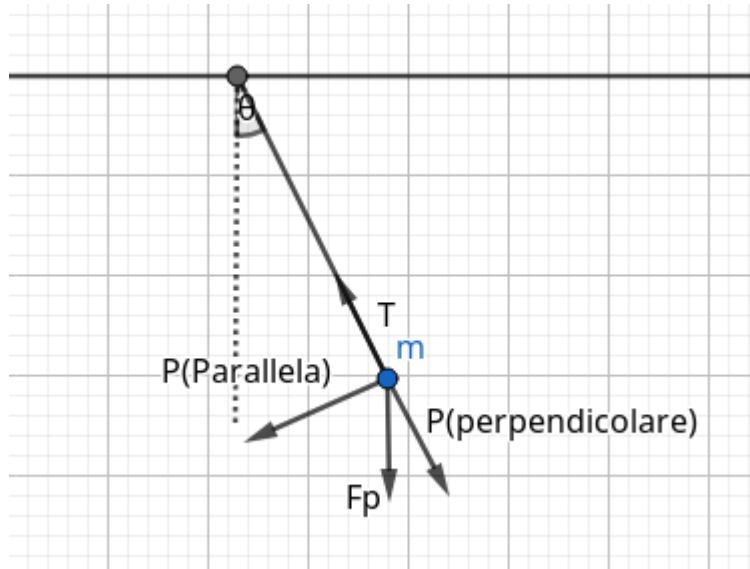
Problema del pendolo semplice: Filo di lunghezza  $l$ , viene lasciato il pendolo.

$$\theta \ll 1$$

1. Analisi delle forze
2.  $\theta = \theta(t)$
3. scegliere  $c_1, c_2$  (Sistema di coordinate a piacere)
  1.  $c_1 = c_1(t), \frac{dc_1}{dt}, v_1, a_1$
  2.  $c_2 = c_2(t), \frac{dc_2}{dt}, v_2, a_2$

## Moto armonico

### Problema del pendolo: soluzione



$$\begin{cases} x = l \sin \theta \\ y = -l \cos \theta \end{cases}$$

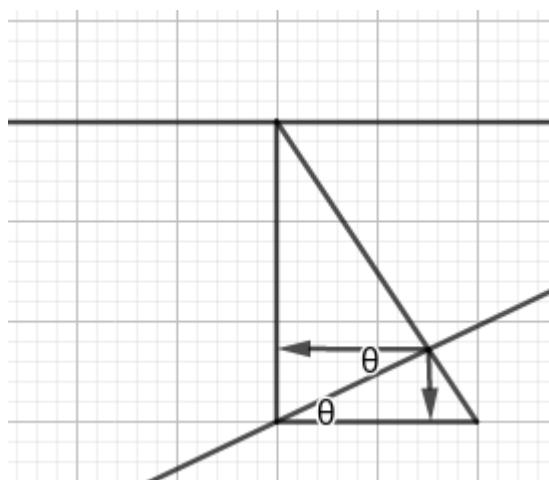
Dove  $l$  è la lunghezza del filo.

Derivando in  $\frac{d}{dt}$  ottengo

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = l \cos \theta \frac{d\theta}{dt} \\ \frac{dy(t)}{dt} = l \sin \theta \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad \text{riderivo in } \frac{d}{dt} \quad \begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = l[-\sin \theta (\frac{d\theta}{dt})^2 + \cos \theta \frac{d^2\theta}{dt^2}] \\ \frac{d^2y}{dt^2} = l[\cos \theta (\frac{d\theta}{dt})^2 + \sin \theta \frac{d^2\theta}{dt^2}] \end{cases}$$

nota bene che  $\frac{d^2x}{dt^2} \neq (\frac{d\theta}{dt})^2$

Ora per aiutarmi disegno un triangolo



noto che formo due angoli  $\theta$  coniugati interni!

Dunque ora, mettendo  $\vec{R} = \vec{P}_{parallela}$  e  $\vec{P} = \vec{F}_p$

$$\begin{cases} R_x = -R \cos \theta = -P \sin \theta \cos \theta \\ R_y = -R \sin \theta = -P \sin^2 \theta \end{cases}$$

$$\vec{R} = \vec{F} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \Rightarrow \begin{cases} R_x = m \frac{d^2 x}{dt^2} \\ R_y = m \frac{d^2 y}{dt^2} \end{cases}$$

Proseguendo:

$$\begin{cases} \cancel{\cancel{m}} \cdot (-g) \sin \theta \cos \theta = \cancel{\cancel{m}} \cdot l [-\sin \theta (\frac{d\theta}{dt})^2 + \cos \frac{d^2 \theta}{dt^2}] \\ \cancel{\cancel{m}} \cdot (-g) \sin^2 \theta = \cancel{\cancel{m}} \cdot l [\cos \theta (\frac{d\theta}{dt})^2 + \sin \frac{d^2 \theta}{dt^2}] \end{cases}$$

Ora divido per  $l$  e sposto tutto a sinistra

$$\begin{cases} \cos \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} - \sin \theta (\frac{d\theta}{dt})^2 + \frac{g}{l} \sin \theta \cos \theta = 0 \\ \sin \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \cos \theta (\frac{d\theta}{dt})^2 + \frac{g}{l} \sin^2 \theta = 0 \end{cases}$$

Ricordando le *serie di taylor mcLaureen*

$$\sin \epsilon \simeq \epsilon \quad \epsilon \rightarrow 0$$

$$\cos \epsilon \simeq 1 - \frac{\epsilon^2}{2} \quad \epsilon \rightarrow 0$$

$$(1 + \epsilon)^\alpha \simeq 1 + \alpha \epsilon \quad \epsilon \rightarrow 0$$

Continuamo con

$$\begin{cases} \theta'' - \theta(\theta')^2 + \frac{g}{l} \theta = 0 \\ \theta \theta'' + (\theta')^2 + \frac{g}{l} \theta^2 = 0 \end{cases} \text{ ora moltiplico la seconda equazione per } \theta \text{ e ottengo} \begin{cases} \theta'' - \theta(\theta')^2 + \frac{g}{l} \theta = 0 \\ \theta^2 \theta'' + (\theta')^2 \theta + \frac{g}{l} \theta^3 = 0 \end{cases}$$

Effettuo una somma della prima equazione con la seconda ottenendo:

$$(1 + \theta^2) \theta'' (1 + \theta^2) \frac{g}{l} \theta = 0$$

$\theta'' + \frac{g}{l} \theta = 0$  ma questa è una **differenziale!**

### Equazione differenziale armonica

$$x'' + cx = 0 \text{ con } c > 0$$

dove a è la **pulsazione al quadrato** del moto armonico. Ottengo la

$$\text{Pulsazione: } \omega = \sqrt{c}$$

Come soluzioni abbiamo

$$\begin{cases} \theta(t) = A \sin(\sqrt(c)t + B) \\ \theta'' = -A \sin(\sqrt(c)t + B)c \end{cases}$$

nell'esempio di prima otteniamo

$$\begin{cases} \theta(t) = A \sin \sqrt{\left(\frac{g}{l}\right)} t + B \\ \theta'' = -A \sin(\sqrt{\frac{g}{l}} t + B) \frac{g}{l} \end{cases}$$

Ora trovo A e B:

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_0 \text{ (angolo iniziale)} \\ B = \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

quindi la soluzione è  $\theta(t) = \theta_0 \sin\left(\sqrt{\frac{g}{l}} t + \frac{\pi}{2}\right) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} t\right)$ .

■

Da questo esercizio possiamo capire come la pulsazione fosse

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

La maggior parte delle volte  $c$  della equazione precedente sarà uguale a qualcosa tipo  $\frac{\alpha}{\beta^2}$

Abbiamo inoltre ottenuto che il **moto armonico è periodico**.

Avendo che

**Periodo:**  $T|\omega T = 2\pi \implies T = \frac{2\pi}{\omega}$

Tempo tra due riproposizioni nello stesso atto di moto, cioè stesso spazio con la stessa velocità.

più pulsazioni ho più il periodo è **corto**.

Da notare che nell'esercizio del pendolo precedente **non ho considerato l'attrito, quindi ho continue oscillazioni**. Cioè il pendolo non si ferma.

**Isocronia delle piccole oscillazioni:** Per angoli piccoli, maggiore spostamento **non significa** maggiore periodo.

## Forza Elastica

#

**Forza di richiamo(o Elastica):**  $\vec{F} = -k\vec{x}$

### Esercizio: Calcolo molla con piccole contrazioni

$$m = 10kg$$

$$k = 10^3 N/m$$

$$T = ?$$

$$F = ma$$

$$-kx = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

Ottengo

$$x'' + \frac{k}{m}x = 0$$

che è l'equazione armonica!

quindi ora ottengo la pulsazione  $\omega^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \sqrt{\frac{m}{k}} = 0,635$$

### Periodo

$$W_{AB} = \int_x^0 -ky(-dy) = -\frac{1}{2}kx^2$$

*Il meno è presente perchè vado da x a zero.*

Noto che questo integrale è  $\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_0^x kx dx = \frac{1}{2}kx^2 = -Ep$

### Esercizio: Ciclista

Un ciclista va a 25 km/h

La potenza che produce è  $P = 150w$

Attrito =? (Calcola l'attrito che colpisce il ciclista)

$$v = 25 \text{ km/h} = \frac{25}{3,6} \text{ m/s} = 6,9 \text{ m/s}$$

$P = \frac{dw}{dt} = \vec{F} \frac{d\vec{s}}{dt}$  Qui ho dovuto fare un trick poco matematico, **spostando il dt sotto il d $\vec{s}$**

$$P_a = \vec{F}_a \cdot \vec{v} = -Av$$

Sappiamo che  $P_c = -P_a$

Abbiamo dunque che

$$P_c = Av$$

$$A = \frac{P_c}{v} = 21,6 \text{ N} \simeq 2 \text{ Kg} \text{ cioè è come se spingesse circa } 2 \text{ kg}$$

---

---

## 12/03/2019

---

### Esercizio: Massa puntiforme che fa un cerchio

$$m = 50g = 50 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

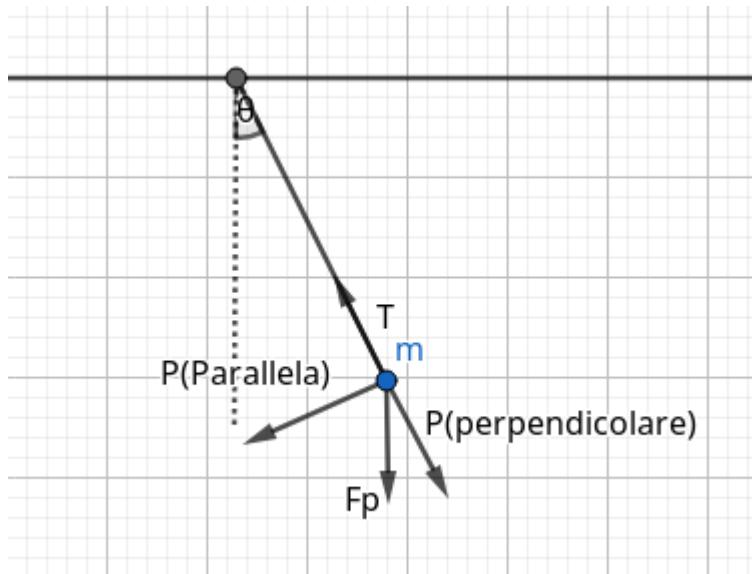
$$\theta = ?$$

$$\text{tensione filo} = ?$$

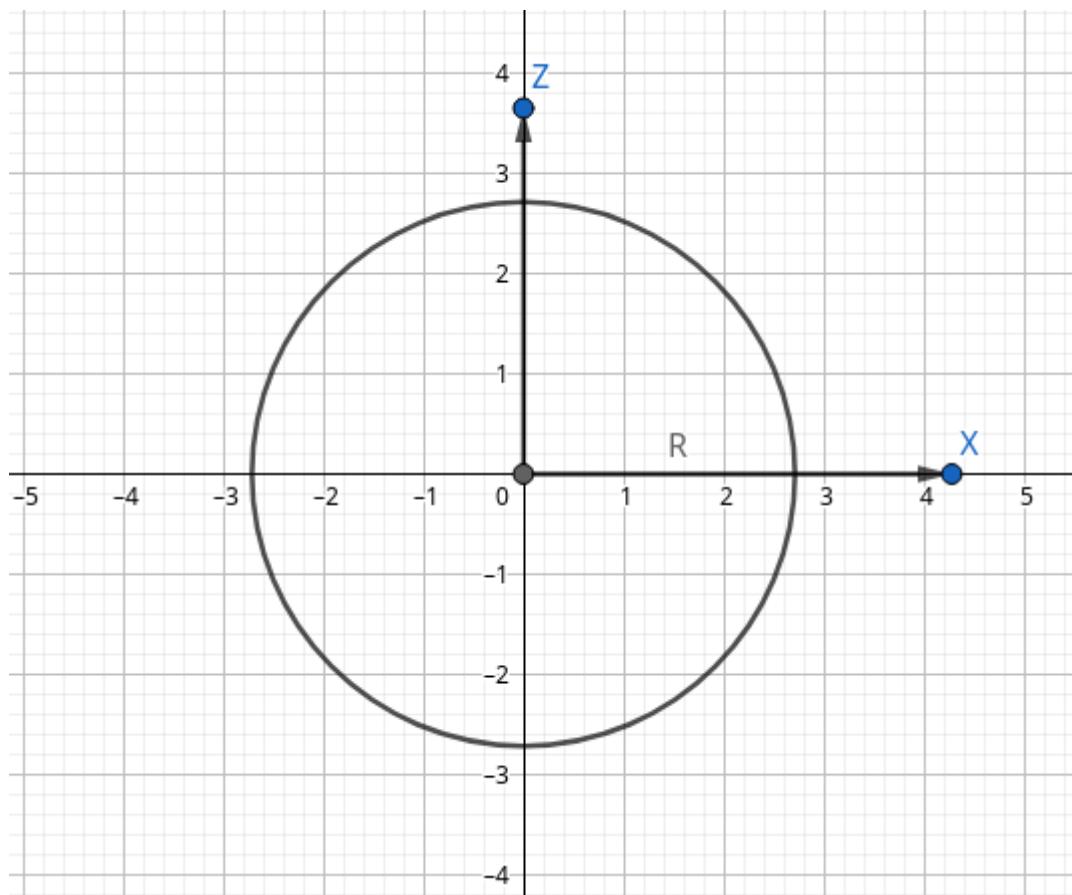
$$l = 0,5 \text{ m}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4} \text{ s}^{-1}$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{2} \text{ rad/s}$$



L'asse  $z$  entra nella lavagna.



$$m\omega^2 R = F_c$$

$$\frac{R}{l} = \sin \theta$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{R}{l}\right)$$

$$\cancel{\omega^2 l \sin \theta} = g \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{g}{\omega^2 l}\right) = \arccos\left(\frac{\frac{0.8}{4}}{\frac{1}{2}}\right)$$

La velocità angolare è troppo bassa per permettere all'oggetto di muoversi, quindi non ho un  $\theta$

$$0 \leq \frac{g}{\omega^2 l} \leq 1$$

$$\omega^2 \leq \frac{g}{l} | \omega \geq 4.5 \text{ rad/s}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \theta(\omega) = \frac{\pi}{2}$$

Per far arrivare  $\frac{g}{\omega^2 l}$  a zero, avendo  $g$  ed  $l$  che sono costanti, posso solo lavorare con  $\omega$ . Quindi per far sì che sia zero, devo applicare il limite qui sopra con omega che va ad infinito.

## Esercizio: Giro della morte

*non leggo i dati alla lavagna*

## Esercizio: Terra

Ho la terra, con un raggio  $R$ , una forza gravitazionale e  $\theta$  è l'angolo che voglio calcolare per capire qual è il punto di distacco (e optionalmente il punto di landing.)

## Termodinamica #

**Atomi:** Costituenti minimi della materia che conosciamo, sistemi aggregati composti da un nucleo e sistemi orbitali(elettroni) che gravitano attorno questo nucleo.

Gli atomi sono a **carica neutra**, quindi se gli elettroni hanno carica **negativa**, i protoni la hanno **positiva** e contraria agli elettroni(somma =0).

**Raggio nucleo** è dell'ordine alla  $10^{-15} \text{ m}$

**atomo**=  $10^{-10} \text{ m}$

**molecole**=  $10^{-8} \text{ m}$

**Nucleo**= Composto di nucleoni

**Elettroni:** non riusciamo a calcolarne il raggio, troppo piccolo.

**Costante di avogadro:**  $N_a = 6,022 \cdot 10^{23}$

Quanti atomi ho?

**MOLE:** Quantità di sostanza che contiene esattamente un numero di avogadro di componenti. misurata in **mol**.

$1 \text{ mol}$  = quantità di sostanza contenuta in  $m = A$  grammi dell'elemento, dove  $A$  è il **peso atomico**.

**Esempio:** Avendo un Idrogeno, ho una  $A=1$ , cioè una mole di  ${}^1H$  è la quantità di quanta sostanza in 1g di H

mentre

Avendo un Carbonio, ho una A=12, cioè una mole di  $^{12}C$  è la quantità di quanta sostanza in 12g di C

Avendo  $H_2O$ , ho una  $A_{effettiva} = 18$  cioè 1mol di  $H_2O$  è la quantità di sostanza in 18g di  $H_2O$

Stati della materia:

- **Solido:** Conservo volume e massa;
- **Liquido:** Ho un volume proprio ma non ho forma, assume quella del recipiente;
- **Gassoso:** Non ho un volume, non ho una forma, si espande prendendo tutto lo spazio disponibile.

## Energia interna

In un sistema gassoso, le molecole sono in costante movimento, avendo energia cinetica. Grazie a questa presenza di l'energia cinetica possiamo dire che il sistema ha una **energia interna**  $E_{interna} = U$

## Gas Ideale

Un gas che ha :

- Le molecole che non interagiscono tra di loro;
- Le particelle non sono interagenti anche con il recipiente;
- Il moto delle particelle è assolutamente casuale.

è definito **gas ideale**.

**Q:Cosa succede quando una particella tocca la parte del contenitore?**

*A: Rimbalza*

Il rimbalzo è calcolabile :  $i$ = iniziale;  $f$ =finale.

$$\vec{p}_i = p_x \hat{x} + p_y \hat{y}$$

$$\vec{p}_f = -p_x \hat{x} + p_y \hat{y}$$

$$\Delta \vec{P} = \vec{P}_f - \vec{P}_i = -2p_i \hat{x}$$

*Ma con il rimbalzo, non perdo energia?* No perchè è **perfettamente elastico** quindi non ho una perdita di energia, mentre in una pallina elastica ho una componente NON elastica che assorbe.

**Q: Quante particelle ho in una zona gassosa che urtano il contenitore?**

*A:*

*N?*

$N_u$  numero di urti nel tempo  $\Delta t$

$$\mathcal{N}_u = N$$

Attenzione, questo  $\mathcal{N}_u$  vuol dire la quantità di urti in un determinato istante di tempo!

Quindi è uguale al numero di particelle nel volume.

tutto ciò che ho dentro a quel contenitore sta urtando la parete in velocità  $v_x$ .

Se il gas è perfetto ed ideale, le particelle che urtano sono  $N$ .

$$N = v \cdot n \text{ dove } n \text{ è la densità di volumica } ([n] = [\frac{1}{L^3}]).$$

Quindi otteniamo che

$$\frac{N}{\Delta t} = \frac{nSL}{\Delta t} = \frac{nSv_x \cancel{\Delta t}}{\cancel{\Delta t}} = nSv_x$$

$nSv_x \Delta t$  è il numero di urti che ho.

In  $\Delta t$ , ottengo che il numero di urti nella quantità di tempo è  $nSv_x$ .

*Avendo tutte la stessa velocità  $v_x$  abbiamo che tutte andranno ad urtare la parete allo stesso momento, quindi ottengo la formula qui sopra.*

Tutte urtano l'oggetto perchè il nostro è un esperimento deterministico, muovendosi orizzontalmente, tutte che partono dalla stessa linea toccano allo stesso momento.

**Se ho particelle molto veloci, avrò più urti nel tempo.**

**Q:**Ognuna di queste particelle, che impulso trasferisce alla parete?

A:

$$\Delta P_x = N_y \Delta p = nSv_x \Delta t (-2mv_x)$$

dove l'ultima parte equivale a  $-2nS\Delta t m v_x^2$

Ora noto che ho

$$F_x = \frac{\Delta P_x}{\Delta t} = 2nSmv_x^2$$

**Osservo che:** Per ognuna delle pareti che considero, devo considerare tutte le particelle che hanno il rispettivo  $v_x$  ma che vanno nella direzione giusta (con il segno giusto).

**Osservo che:** Posso considerare la velocità globale della particella, non ho la  $v_x$  e  $v_y$ . Da  $v_x$  devo passare a  $v$ .

**Osservo che:**  $v_x$  è il valor medio delle  $v$ , cioè ammetto che ho delle variazioni.

Quindi passo da  $v_x^2 \rightarrow v^2$  attraverso il valor medio di  $v$  cioè  $\langle v_x^2 \rangle$

Ottengo che

$$v^2 = -nSm \langle v_x^2 \rangle$$

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \dots$$

Poichè ho scelto io il sistema di riferimento:  $mv_x^2 = \frac{1}{3} \langle v^2 \rangle$

$$F_x = \frac{\Delta P_x}{\Delta t} = 2nSmv_x^2 = -\frac{N}{V} S \frac{1}{3} \langle mv^2 \rangle$$

Ottenendo la formula della **pressione**:

$$P = \frac{F}{S} = +\frac{N}{V} \frac{1}{3} \langle mv^2 \rangle$$

Quindi la pressione  $P$  nel nostro volume  $V$  è

$$PV = N \frac{2}{3} \langle \frac{1}{2} mv^2 \rangle$$

dove  $\langle \frac{1}{2} mv^2 \rangle$  è **energia cinetica media**.

## Pressione

$[P] = \left[ \frac{F}{S} \right]$  dove **F** è **forza** e **S** è **superf.** misurata in  $1Pa$  cioè **Pascal**

Quindi la definizione è

$$P = \frac{dF}{dS}$$

Sotto ad un determinato valore, le variazioni di superficie sono nulle.

Abbiamo che:

$$1bar = 10^5 Pa$$

$$1atm = 1,015bar = 1,015 \cdot 10^5 Pa$$

In millimetri di mercurio

$$1mmHg | 1atm = 760mmHg$$

Facendo un po' di esperimenti ottieniamo che

$$PV = \text{costante } T$$

questo vale solo per gas molto rarefatti e poco reagenti(gas **ideali**) con **T misurata in Kelvin**.

Se misurata in C o F non vale.

**costante** =  $Rn$  dove **R** è **indipendente dal gas considerato** e **n** è **il numero di moli, la quantità di gas.**

Ricordando che  $PV = nRT$

$$[R] = \left[ \frac{PV}{nTe} \right] = \left[ \frac{F_{L^2} \cdot L^3}{QTe} \right] = \left[ \frac{F \cdot L}{QT_e} \right] = \left[ \frac{E}{QT_e} \right]$$

Esempio:

*Ho 13 moli di azoto liquido, a quanti atomi ho?*

Che sia liquido o meno poco ci interessa.

$N = n \cdot N_a$  dove  $N_a$  è il numero di avogadro e  $n$  è il numero di moli.

$$\text{otteniamo } nR = N \frac{R}{N_a} = NK_b$$

dove  $K_b$  è la costante di boltzman.

## Costante di Boltzman

$$K_b = \frac{R}{N_a} = \frac{8,314 J / \cancel{mol} K}{6,022 \cdot 10^{23} \cancel{K} / \cancel{mol}} = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$$

ottenendo che

## Equazione di stato di gas perfetti

$$PV = nRT \longrightarrow PV = NK_bT$$

Noto che la prima equazione la ottengo **sperimentalmente** mentre la seconda la ottengo **misurando**.

ora noto che  $\begin{cases} PV = \frac{2}{3}N \langle E_k \rangle \\ PV = NK_bT \end{cases} \rightarrow K_bT = \frac{2}{3} \langle E_k \rangle \text{ e } \langle E_k \rangle = \frac{3}{2}K_bT = 3 \cdot \frac{1}{2}K_bT$

**Il singolo componente del mio gas ha tre gradi di libertà in questo caso.**

Ora ottengo che

### Energia interna media in un gas perfetto monoatomico

$$U = E_i = ^{\text{monoatomico}} N \langle E_k \rangle \text{ con}$$

$$u = \frac{U}{N} = ^{\text{n.a.}} \langle E_k \rangle$$

### Equipartizione dell'energia cinetica

$$u = L \frac{K_b T}{2} \text{ dove } L \text{ è il numero di gradi di libertà.}$$

Vediamo dunque che dipende solo da  $T$  temperatura e dal numero di gradi di libertà.

### Esercizio moli

$$L = 3$$

$$n = 3 \text{ mol}$$

$$V_i = 831,4l$$

$$P = 3 \text{ atm}$$

Trasformazione isobarica

$$V_f = 2V_i$$

$$T_i, T_f, U_i, U_f = ?$$

$$PV = nRT$$

$$T = \frac{PV}{nR} \rightarrow T_i = \frac{P_i V_i}{nR} = \frac{31,015 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 8,314 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{3 \text{ mol} \cdot 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}} = 10150 \text{ K}$$

$$P = \frac{nRT}{V} \rightarrow \frac{\cancel{nR} T_i}{V_i} = \frac{\cancel{nR} T_f}{V_f} \rightarrow \frac{T_i}{V_i} = \frac{T_f}{2V_i} \rightarrow T_f = 2T_i = 20300 \text{ K}$$

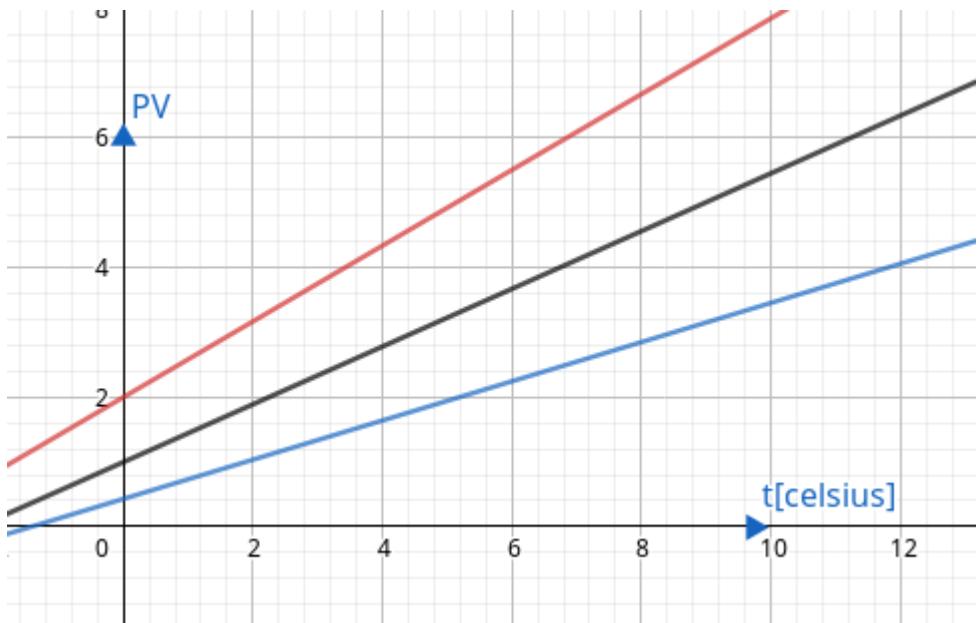
Calcolando

$$U = \frac{3}{2}nRT$$

$U_f = 2U_i$  ed  $U_i$  me lo calcolo.

### Esercizio

$$PV = \text{cost } t + A$$

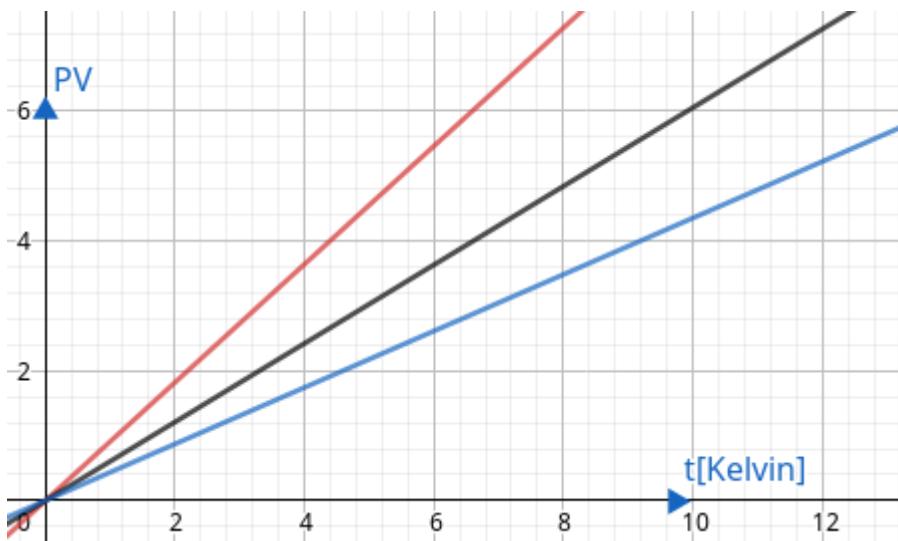


Noto che la temperatura minima possibile non dipende dal gas.

Adatto una scala diversa, spostando la  $y$  dove ho lo **zero assoluto**

**Zero assoluto:** Zero kelvin sotto il quale non ha più senso parlare di termodinamica.

$$0K = -273,16 \text{ celsius}$$



## Principi della termodinamica #

Ho un ambiente che chiamo universo e un sistema con un energia interna  $U$ . Come avviene lo scambio di energia?

Ricordiamo che quando si scalda, aumenta l'energia interna.

Posso avere degli scambi di:

1.  $W$  Lavoro:

1. Ordinato;
2. Coerente;
3. Organizzato.

## 2. $Q$ Calore

1. Disordinato;
2. Incoerente;
3. Disorganizzato.

### Esempio dei pistoni

Ho un pistone, con dentro un gas, ha una forza esterna che spinge dentro e fuori il pistone.

*Man mano che spingo, la pressione sarà maggiore, quindi la forza da applicare è maggiore. Questo aspetto lo trascuriamo, la forza applicata è sempre la stessa.*

$$W = \vec{F}_{ext} \cdot \Delta \vec{x} = F \Delta x > 0$$

Posso assumere che il lavoro esterno si tramuti tutto in variazione di energia interna:

$$W_{ext} = \Delta U \text{ cioè } U_i \rightarrow_{W_{ext}} U_f \Delta U = U_f - U_i = W_{ext}$$

Questo funziona perchè non ho altri scambi di energia di questo gas con l'esterno.

### Calore

Se metto un oggetto al sole si "scalda". Ma non ho lavoro, perchè **non ho spostamento**.

Quando ho un trasferimento di energia **senza lavoro**. Questo è chiamato **CALORE**.

---

---

## 25/03/2019

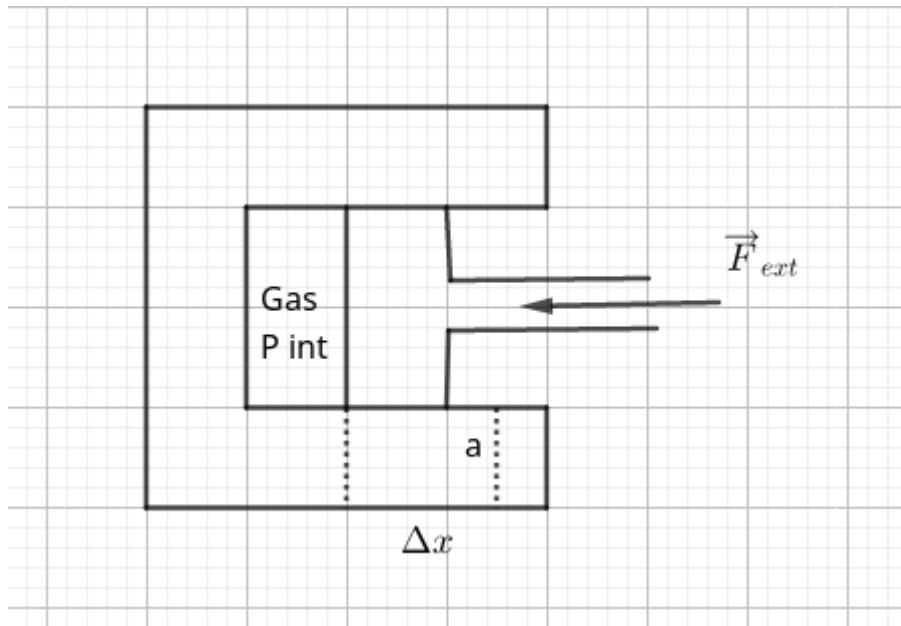
---

### Esercizio pistone

$$\vec{F}_{tot} = \vec{0}$$

$$\vec{F}_{ext} + \vec{F}_{int} = 0$$

$$\frac{\vec{F}_{ext}}{A} = \frac{\vec{F}_{int}}{A} \Rightarrow P_{ext} = P_{int}$$



$$\vec{F}_{ext} \cdot \Delta \vec{x} = F \Delta x = W_{ext} > 0$$

$$W_{ext} = \Delta U = U_1 - U_i > 0$$

La forza esterna va sempre pensata come la forza che **comprime/tenta di comprimere il gas**. Il volume si espande per un  $\Delta x$ , lentamente, la forza esterna prova a contrastarlo.

Il lavoro esterno, per questo motivo, sarà dunque **negativo**.

$$\vec{F}_{ext} \cdot \Delta \vec{x} = -F \Delta x = W_{ext} < 0$$

$$W_{ext} = \Delta U = U_f - U_i < 0$$

Assumiamo sempre che le due forze siano uguali e opposte

$$W_{ext} = -W_{gas}$$

Ottengo che

$$\Delta U_{gas} = -W_{gas}$$

La variazione dell'energia interna è **uguale al lavoro COMPIUTO dal sistema!**

cioè più generale

$$\Delta U = -W$$

Convenzionalmente diciamo che:

- $W > 0$  componente del sistema, sistema che fornisce la variazione;
- $W < 0$  Sistema che si **oppone** alla variazione.

Ricordiamo che  $U_{int}$  è *qualcosachenonhacapito* della temperatura.

I componenti sono  $Na$ · molecole.

Quando definisco devo avere il grado di **disordine**.

## Esercizio ruota bicicletta

$$r_{ext} = 25\text{cm}$$

$$r_{int} = 23\text{cm}$$

Tubolare

Ho un uomo con  $m = 100\text{kg}$

1. Calcolare il volume del tubo
2. Calcolare pressione all'interno quando l'uomo sale
3. Assumo che per gonfiare la ruota ho fatto 100 colpi di pompa dove, ad ogni colpo, mette  $V^{20*C} = 240\text{cm}^3$ , a che temperatura ho la ruota quando sale?
4. Calcolare il lavoro per gonfiare la gomma.

## Scatola con gas dentro

Ho una scatola con gas dentro

- Espongo la scatola al sole, ho **radiazione luminosa**.
- **Non** conto una ipotetica riflessione.
- Fornisco energia all'oggetto, il volume non cambia.
- Ho  $T_{gas}$  e  $T_{ext}$  (temperatura recipiente)

Se aspetto abbastanza ho un trasferimento di energia tra  $T_{ext}$  e  $T_{gas}$  tale che

$$\Delta T + T_{ext} = T_{gas}$$

Dove  $\Delta T$  è la variazione di temperatura provocata dalle radiazioni.

Ho un trasferimento di energia senza **lavoro meccanico**.

## Calore

**Calore:**  $\Delta U = Q$

Variazione di energia **senza lavoro meccanico**.

con:

- $Q > 0$  se è ricevuto dal sistema
- $Q < 0$  se è sottratto dal sistema.

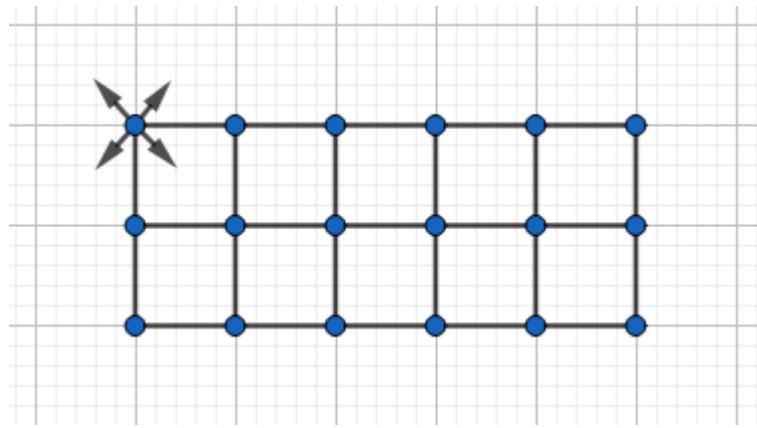
Ricordiamo che noi trattiamo **sistemi in equilibrio**, quindi il contenitore e il gas all'interno raggiungono la stessa temperatura (aspettando abbastanza).

## Primo principio della termodinamica

$$\Delta U = Q - W$$

Variazione di energia interna= Calore - Lavoro

## Conduzione



Atomi che "vibrano", percepibile da tutti gli atomi vicini. Aumentando la vibrazione avrà un aumento della vibrazione indotta.

Per conduzione: Sposto energia con calore.

La sua vibrazione è l'**energia media**, crea un'onda di calore.

La vibrazione viene trasmessa agli atomi vicini in modo "ammortizzato", cioè più debole, che a loro volta trasmetteranno ai loro vicini in modo più debole ancora, fino a quando sarà impercettibile. Questa vibrazione è il calore.

### Convezione

Ho un fluido, con una zona del fluido più calda, spostandolo ad una zona più fredda il calore si "dissipa".

Per esempio: in un sistema di raffreddamento a liquido, il liquido passa da freddo a caldo perché viene fatto passare in zone dove il motore ha bisogno di rilasciare calore. Il calore viene passato al liquido, che viene fatto circolare fino a raggiungere una zona aperta all'ambiente, nel quale disperde il calore che aveva ottenuto tornando freddo.

### Irraggiamento

A colpire il mio sistema è la **radiazione elettromagnetica**, cioè **energia pura**.

L'energia non viene "riflessa", viene assorbita facendo in modo che l'oggetto vibri e si scaldi.

**Riflessione:** Un fotone entra, l'atomo si eccita e si dissecchia subito, rispedendo lo stesso fotone (dove in realtà è viverso ma potente uguale).

*Curiosità: Un corpo nero ha temperatura costante ( $\approx 2.7K$ ).*

### Sistema Isolato

Sistema che non scambia **calore**, ne **lavoro** con il sistema esterno.

Il sistema è definito **chiuso** se ho inoltre una assenza di scambio di materia.

### Esempio sistema isolato

Ho un sistema isolato con un pendolo dentro.

Se torno dopo anni avendo dato una spinta al pendolo e ho del gas dentro, il pendolo sarà fermo (attrito). avendo  $U_i$  come energia interna iniziale e  $U_f$  energia interna finale:

$\begin{cases} Q = 0 \\ W = 0 \end{cases} \Delta U = 0 \implies U_f = U_i$  ma quindi otteniamo che

$$\begin{cases} U_i = U_i^{\text{pendolo}} + U_i^{\text{gas}} \\ U_f = \cancel{U_f^{\text{pendolo}}} + U_f^{\text{gas}} \end{cases}$$

abbiamo che  $\cancel{U_f^{\text{pendolo}}}$  perchè  $U_f^{\text{pendolo}} = 0$  visto che il pendolo è **fermo** a fine esperimento.

Otteniamo dunque:

$$\begin{aligned} U_f^{\text{gas}} &= U_i^{\text{pendolo}} + U_i^{\text{gas}} \\ U_f^{\text{gas}} - U_i^{\text{gas}} &= \Delta U_{\text{gas}} = U_i^{\text{pendolo}} \\ \text{Con } \Delta T^{\text{gas}} > 0 \text{ e } T_f^{\text{gas}} &> T_i^{\text{gas}} \end{aligned}$$

Ottengo delle osservazioni importanti:

1.  $U$  finale del gas è la  $U$  iniziale del pendolo + la  $U$  finale del gas.
2.  $U$  del pendolo iniziale è dunque  $\Delta U_{\text{gas}}$ .
3. *Se varia la temperatura il pendolo non si muove, perchè il gas si scalda in modo disordinato, non solo da un lato.*
4. Il disordine è presente.

## Trasformazioni

### Trasformazione isocora

$\Delta V = 0 \Rightarrow W = 0$  (volume non varia, non ho un lavoro che ci agisce)

$$\Delta U = Q$$

### Trasformazione adiabatica

$Q = 0$  (calore non varia)

$$\Delta U = -W$$

### Trasformazione isotermica

$\Delta T = 0 \Rightarrow \Delta U = 0 \iff Q = W$  con  $Q > 0, W > 0$  (temperatura non cambia)

### Capacità termica

Avendo un gas

$$\Delta Q = c \Delta T \implies c = \frac{dQ}{dT} \text{ Capacità termica} =$$

$$\frac{dQ}{dT}$$

Quindi La capacità termica è il variare del calore in relazione alla variazione di temperatura ( $c = \frac{dQ}{dT}$ )

Come unità di misura ha  $c = \frac{J}{K}$

*Un buon piumino ha una **alta capacità termica**, mentre un fondo di pentola ha una **bassa capacità termica**.*

Affermiamo anche che

Più massa = Maggiore capacità termica.

## Calore specifico

Di due tipi:

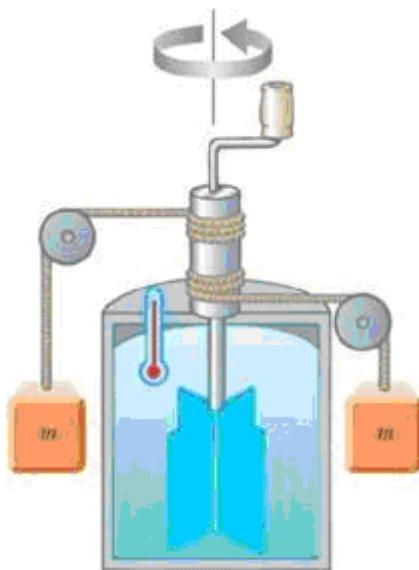
$$1. \text{ Calore specifico (per quantità di massa)} = c = \frac{c}{m} = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT}$$

$$\text{Unità di misura} = \frac{J}{Kg \cdot K}$$

$$2. \text{ Calore specifico (Molare)} = c = \frac{c}{n} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dQ}{dT}$$

$$\text{Unità di misura} = \frac{J}{mol \cdot K}$$

## Esperimento di Joule



**Mulinello di Joule**

$$W = mgh$$

$$W_{h_2O} = 0$$

$$\Delta U = Q \text{ (1 principio termodinamica)}$$

$$p = 1atm \quad 14,5^\circ C \rightarrow 15,5^\circ C$$

$$\text{Devo applicare un lavoro } W_G = 4,186KJ$$

Otteniamo dunque il valore di una **kilocaloria (Kcal)** che

$$1cal = 4,186J$$

$$C_{H_2O \text{ liquido}} = \frac{1Kcal}{1Kg \cdot 1K} = 4,186 \frac{KJ}{KgK}$$

Ricordiamo che

$$\Delta T = 1K = \Delta T = 1^\circ C$$

**Esempio pozzanghera**

Ho una pozzangera quadrata con uno strato di nylon sopra (influente, serve solo per evitare l'evaporazione) sappiamo che

$$W_{sole} = 700 \text{ W/m}^2$$

La pozzanghera è lunga e larga 50cm e profonda 1cm

$$T_i = 20^\circ\text{C}$$

$$\Delta U = Q - \cancel{W} \quad (\text{Non ho variazioni di volume, trasformazione isocora})$$

$$\Delta t = 8 \text{ hr}$$

$$T_f = ?$$

Quale sarà la temperatura finale della pozzanghera se il sole apparisse istantaneamente (e non lentamente) per 8 ore?

$W_{sole} \Delta t = Q = mc \cdot \Delta T$  cioè il calore immesso dal sole per irraggiamento nel tempo.

$$SW_{sole} \Delta t = mc \Delta T$$

è importante ricordare che devo considerare la superficie, anche se vedremo che sarà influente.

$$\Delta T = \frac{SW_{sole} \Delta t S}{mc} = \frac{W_{sole} \Delta t S}{\rho V c} = \frac{W_{sole} \Delta t \cancel{S}}{\rho \cancel{V} h c}$$

Ora abbiamo dunque

$$\frac{7 \cdot 10^2 \cdot 2,9 \cdot 10^4}{10^3 \cdot 10^{-2} \cdot 4,19 \cdot 10^3} K = 5 \cdot 10^2 = 500 K$$

è dunque aumentata di 500 gradi kelvin.

Questo avviene perché non ho considerato il **calore latente**.

## Calore latente

$$Q = \lambda m$$

$\lambda$  = Calore latente.

Si misura in  $J/Kg$ .

$$\Delta T_{\text{Cambio di stato}} = 0$$

è un calore che si verifica quando abbiamo una coesistenza tra vapore e liquido, una coesistenza di due stati.

## Stati della materia



$$\lambda_{SL} = 3,3 \cdot 10^5 J/Kg \text{ dove } SL \text{ sta per Solido Liquido.}$$

$$\lambda_{LV} = 2,7 \cdot 10^7 J/Kg \text{ dove } LV \text{ sta per Liquido Vapore.}$$

## Per casa

1. Ripetere esercizio precedente(della pozzanghera ) rimuovendo lo strato di nylon.
  2. Ho  $2kg$  di ghiaccio a  $-10^\circ\text{C}$ 
    3. Disegnare il grafico Temperatura/Calore (Temperatura asse  $y$ , Calore asse  $x$ )
    4. Disegnare il grafico Temperatura/ tempo (Temperatura asse  $y$ , tempo asse  $x$ )
- Aggiungendo che  $\frac{dQ}{dT} = 100\text{cal/hr.}$
- 
- 

## 29/03/2019

---

Ho un sistema e due corpi:

$$m_1, c_1, T_1$$

$$m_2, c_2, T_2$$

( $c$  è la capacità termica)

Quando i due corpi sono a contatto ho uno **scambio di calore**.

$Q_1 + Q_2 = 0$  perchè il calore che scambia con l'esterno è zero!  $Q_{tot} = 0$

Per la definizione di calore specifico,  $Q_1 = m_1 c_1 (T_f - T_1)$

$$Q_2 = m_2 c_2 (T_f - T_2)$$

Sommandoli, ottengo

$$\begin{aligned} Q_1 + Q_2 &= m_1 c_1 (T_f - T_1) + m_2 c_2 (T_f - T_2) \\ 0 &= (m_1 c_1 + m_2 c_2) T_f - (m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2) \end{aligned}$$

$$T_f = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$$

In generale

$$T_f = \frac{c_1 T_1 + c_2 T_2}{c_1 + c_2}$$

Vuoto: Non ho molecole.

### Esercizio

$$m_1 = 30g$$

$$t_1 = -15^\circ\text{C}$$

$$m_2 = 50g$$

$$t_2 = 60^\circ\text{C}$$

$$T_e = ?$$

traduciamo i dati in una forma utilizzabile

$$t_{1_k} = T_1 = 258K$$

$$t_{2_k} = T_2 = 333K$$

$$\lambda_{H_2O} = 3,3 \cdot 10^5 J/Kg$$

$$c_{H_2O} = \frac{1kcal}{Kg \cdot K} = 4,19 KJ/Kg \cdot K$$

$$Q_1 = m_1 c_1 \cdot (T_f - T_1)$$

$$Q_2 = m_2 c_2 \cdot (T_f - T_2)$$

sommendoli

$$Q_1 + Q_2 = (m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2) \cdot T_f - (m_1 \cdot c_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot T_2)$$

$$T_f = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$$

$$Q_{fus} = \lambda_{H_2O} \cdot m_1 = 10^4 J$$

$$Q_{ghiaccio} = m_1 \cdot c_1 \cdot (T_{fus} - T_1) = 900 J$$

$$Q_{Acqua}^{(max)} = m_2 \cdot c_2 (T_{fus} - T_2) = -1,26 \cdot 10^4 J$$

Il resto è un tentativo di uno studente.

Trovo il calore dell'acqua dopo che il ghiaccio si è sciolto

$$Q_{H_2O}^{res} = 1,7 \cdot 10^3 J$$

$$Q_{H_2O}^{res} = m_2 \cdot c_2 (T_* - T_{fus}) = 1,7 \cdot 10^3 J = 30g \cdot 4,19 KJ/Kg \cdot K \cdot (t_* - 0^\circ C)$$

$$\frac{1,7 \cdot 10^3 JKg^\circ C}{50g \cdot 4,19 KJ} = t_* = 0,85 \cdot 10^\circ C = 8,5^\circ C$$

$$Teq = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2} = \frac{30g \cdot 273K + 50g \cdot 281,5K}{80g} = 278,3K = 5^\circ C$$

## 01/04/2019

---

$$\vec{F}_{ext} = \vec{0} \Rightarrow \frac{d\vec{P}_t}{dt} = \vec{0} \Rightarrow \vec{P}_{tot} = \overrightarrow{const} \Rightarrow \vec{P}_{tot}$$

ottenendo

$$\vec{P}_{tot}^{iniziale} = \vec{P}_{tot}^{finale} \text{ Quindi otteniamo che}$$

Se niente perturba il moto del sistema, la quantità di moto totale si conserva.\

$$\text{In altre parole } \sum_{i=1}^N \vec{P}_i(\text{iniziale}) = \sum_{j=1}^M \vec{P}_i(\text{finale})$$

Noto che  $N$  e  $M$  non sono necessariamente uguali (non necessariamente stesso numero), vale anche per  $i$  e  $j$  (non necessariamente stesso corpo).

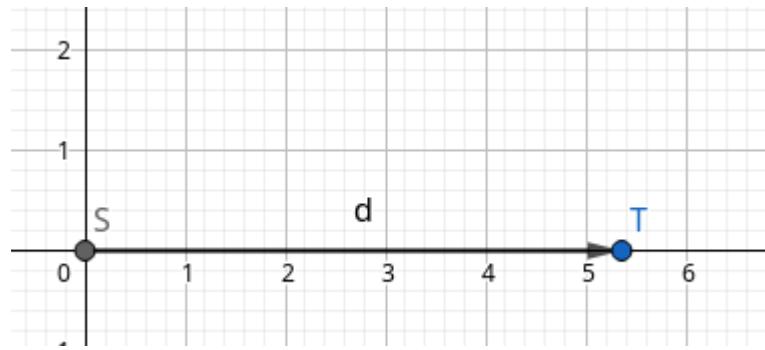
### Centro di massa

#

$$\frac{\vec{x}_{CM} = m_1 \vec{x}_1 + m_2 \vec{x}_2}{m_1 + m_2} \text{ Punto che meglio approssima l'equilibrio del sistema.}$$

In una dimensione, tolgo semplicemente i vettori.

## Esempio Sole Terra



Ho il Sole, che indicheremo con  $s$  e terra che indicheremo con  $T$

$$m_s = 2 \cdot 10^{30} \text{ Kg}$$

$$m_T = 6 \cdot 10^{24} \text{ Kg}$$

$d = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$  cioè la distanza tra la terra e il sole.

Calcolo  $r$ :

$$r_{CM} = \frac{M_s x_s + m_T x_T}{m_s + m_T} = \frac{m_T}{m_s c_1 + \frac{m_T}{m_s}}$$

Dove  $\frac{m_T}{m_s} = \epsilon \simeq 10^{-6}$

$$x_T = \frac{m_T}{m_s} \left(1 - \frac{m_T}{m_s}\right)$$

ottenendo

$$r_{CM} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ m} = 450 \text{ km}$$

## Esempio raggio sole

Avendo il raggio della terra

$$R_T \simeq 6,4 \cdot 10^3 \text{ m}$$

quanto sarà il raggio del sole?

$$R_s = ?$$

Lo ottengo.

Il sole è circa  $0,5^\circ$  di inclinazione rispetto alla terra, cioè  $8,5 \text{ millirad}$ , ( $1^\circ = 17 \text{ millirad}$ )

$$d \tan \frac{\phi}{2} = R$$

$$d \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} = R$$

$$1,5 \cdot 10^{11} \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} = R$$

$$6,3 \cdot 10^8 \text{ m} = R$$

$R = 630000 \text{ km}$  Raggio del sole.

## Utili da sapere per esame

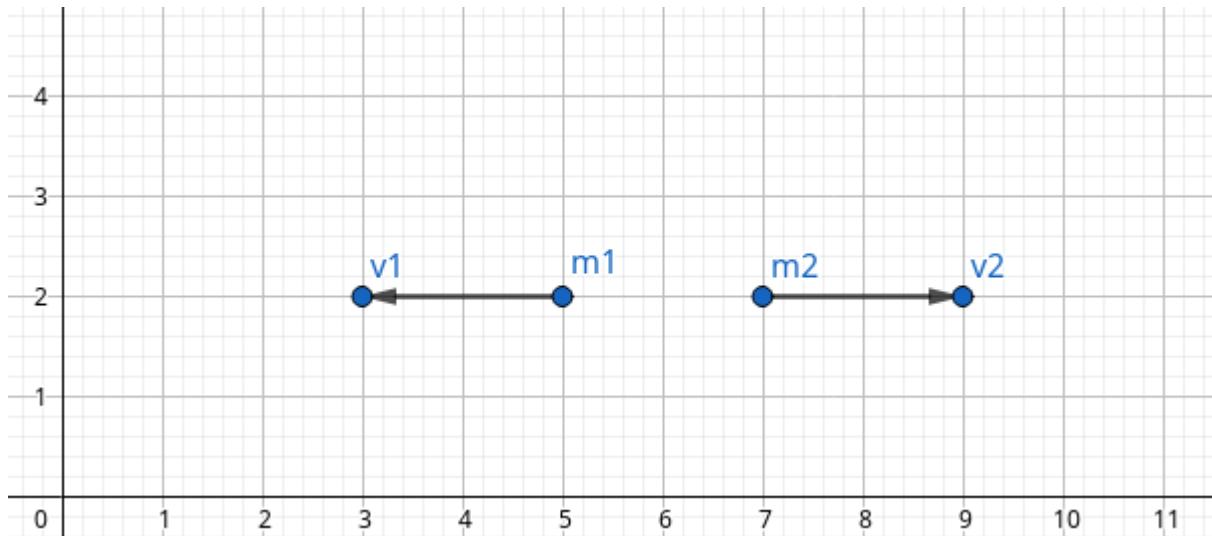
Se  $\epsilon \ll$  (molto piccolo) allora vale

- $1 + \epsilon^\alpha = 1 + \alpha\epsilon$
- $\tan \epsilon = \sin \epsilon = \epsilon$
- $\cos \epsilon = 1 - \frac{\epsilon^2}{2}$
- $\ln(1 + \epsilon) = \epsilon$
- $e^\epsilon = 1 + \epsilon$

Praticamente limiti che tendono a zero.

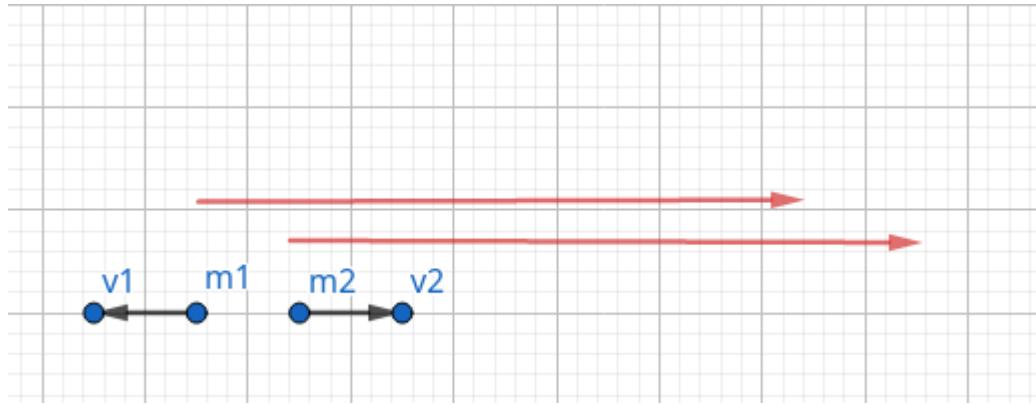
### Esempio su Aereo

Ho un aereo privato



Definiamo  $v_2 - v_1$  come la differenza tra le due frecce.

Posso affermare che la lunghezza nella prossima immagine sarebbe equivalente se non fosse per  $v_1$  che si oppone al nostro "aereo".



Ora avendo  $i$  che varia tra 1 e 2

ottengo

$$\vec{v}_i' = \frac{d\vec{x}_i}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{x}_i - \vec{x}_{CM}) = \frac{d\vec{x}_i}{dt} - \frac{d\vec{x}_{CM}}{dt} \text{ dove } \frac{d\vec{x}_i}{dt} = \vec{v}_i \text{ e } \frac{d\vec{x}_{CM}}{dt} = \vec{v}_{CM}$$

Ma noto che tutto ciò è **energia cinetica**

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i \vec{v}_i^2$$

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i \vec{v}_i^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i (\vec{v}_i - \vec{v}_{CM})^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i (\vec{v}_i^2 + \vec{v}_{CM}^2 - 2 \cdot \vec{v}_i \cdot \vec{v}_{CM}) =$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_{CM}^2 - (\sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i) \vec{v}_{CM}$$

Ottenendo

$$\begin{cases} E_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i \vec{v}_i^2 \\ E'_k = E_k \frac{1}{2} M v_{CM}^2 - \vec{v}_{CM} \cdot \sum m_i \cdot \vec{v}_i \end{cases}$$

Cioè che possiamo\*\* cambiare il sistema di riferimento senza variare il risultato\*\* (anche se l'energia cinetica varia!)

### La quantità di moto si conserva

$$\vec{x}_{CM} = \vec{0}$$

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = \vec{0}$$

Ora derivo in base al tempo

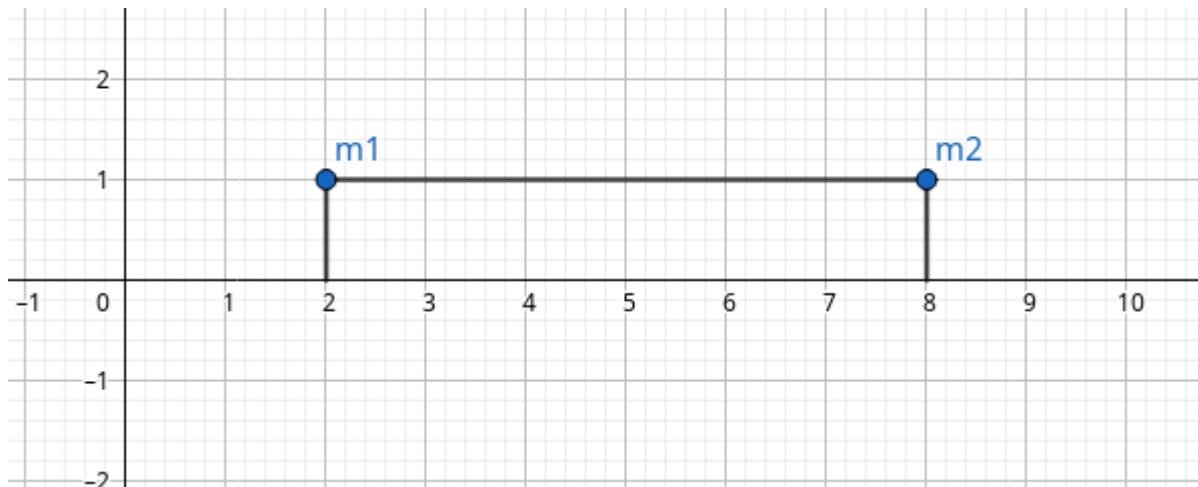
$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = \vec{0} \text{ cioè } \vec{P}_1 + \vec{P}_2 = \vec{0}$$

Ottengo

$\Delta \vec{P}_{tot} = \vec{0}$ , cioè la **quantità di moto** si conserva nell'urto!

### Esperimento barra

ho una barra, con due masse sopra all'estremità. La barra è su un materiale che non ha attrito.



Immaginiamo che la barra "scorra" verso una direzione, facendo impattare le due masse.

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{d}{2}$$

$$(m_1 + m_2) \frac{d \cdot x_{CM}}{dt} = m_1 \cdot \frac{dx_1}{dt} + \frac{m_2 dx_2}{dt} =$$

$$= m_1 v_1 + m_2 v_2 = P_1 + P_2 = P_{tot} = 0 \text{ ottengo che}$$

Se due masse impattano, **non avendo forze esterne**, il centro di massa **rimane nello stesso punto**. In questo caso, il centro di massa rimane a metà della barra.

$$x_1^{Finale} - x_2^{Finale} = \frac{d}{2}$$

$$x_{CM}^{Finale} = \frac{m_1 x_1^{Finale} + m_2 x_2^{Finale}}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 x_1^{Finale} + m_2 (x_1^{Finale} - \frac{d}{2})}{m_1 + m_2} = x_{CM}^{Iniziale} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{d}{2}$$

Concludendo

$$(m_1 + m_2) x_1^{Finale} = m_2 \cdot d$$

$$x_1^{Finale} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot d$$

## Urto perfettamente anaelastico

Definisco **urto perfettamente anaelastico** quando due masse, in un urto si "attaccano".

**Esercizio** Avendo un pendolo balistico

$$\Delta \vec{P}_{tot} = 0$$

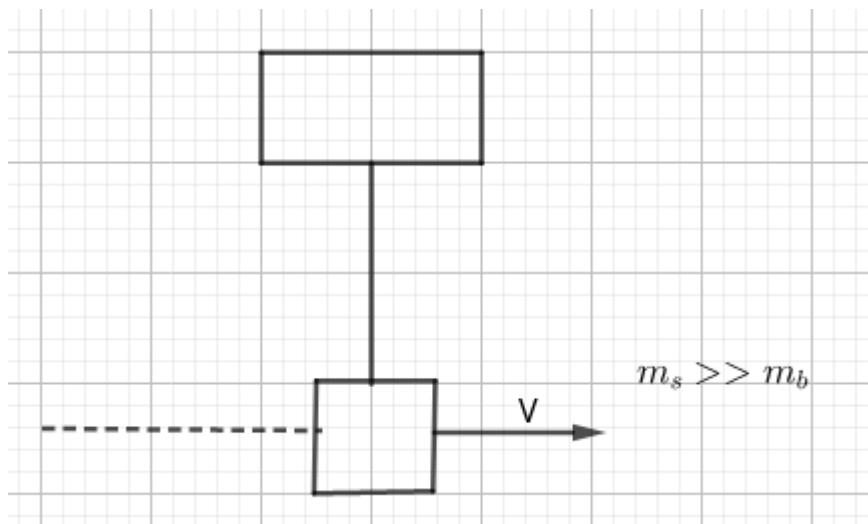
$$\vec{P}_{iniziale} = \vec{P}_{finale}$$

$$m_1 \vec{v}_1^{iniziale} + m_2 \vec{v}_2^{iniziale} = (m_1 + m_2) \cdot \vec{v}^{finale}$$

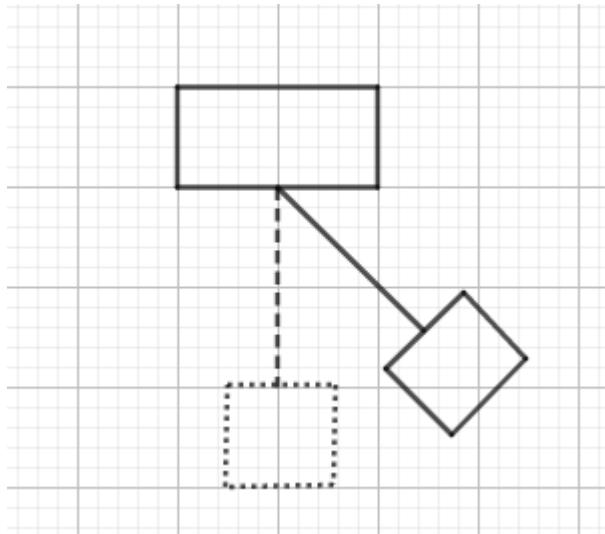
$$\vec{v}^{finale} = \frac{m_1 \vec{v}_1^{iniziale} + m_2 \vec{v}_2^{iniziale}}{m_1 + m_2} \xrightarrow[m_b]{v_b}$$

Più in specifico

Ho un proiettile sparato verso un sacco di sabbia. Si comporterà come un pendolo.



Il movimento sarà



$$M = m_s + m_b$$

$$m_b V_b + m_s \cancel{V} = MV$$

Il sacco essendo fermo all'inizio abbiamo  $V_s = 0$

ottengo

$h = l - l \cos \phi$  dove  $l$  è la lunghezza del cavo.

$$Mgh = \frac{1}{2} M V^2 \iff V = \sqrt{2gh}$$

$$V = \sqrt{2gh} = \sqrt{2gl 2 \sin^2 \frac{\phi}{2}} = 2 \sin \frac{\phi}{2} \sqrt{gl}$$

Utilizzando la formula di bisezione  $\sin \frac{\phi}{2} = \pm \sqrt{\frac{1-\cos \phi}{2}}$

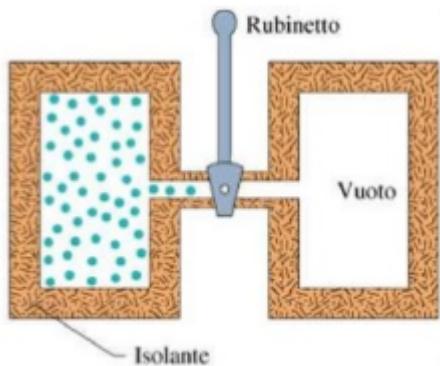
Ottengo dunque

$$V_b = \frac{m_b+m_s}{m_b} 2 \sin \frac{\phi}{2} \sqrt{gl} = \frac{m_b+m_s}{m_b} \phi \sqrt{gl} = \frac{m_s}{m_b} \phi \sqrt{gl}$$

### Esperienza di Joule (Espansione Libera)

Ho un contenitore:

- Pareti rigide e adiabatiche (non ho scambio di calore con l'esterno);
- Quantità di gas (moli) all'interno di un gas ideale all'interno di un comparto;
- Ho setto apribile e chiudibile tipo rubinetto.



Otteniamo che il gas si espande (espansione libera) e **non fa ne subisce lavoro!** Non ho scambio di calore con l'esterno!

L'energia interna del sistema non cambia per il primo principio della termodinamica.

$$\begin{cases} dW = 0 \\ dQ = 0 \end{cases} \quad dV = 0, dT = 0 = U = U(t)$$

Dove  $dt = 0$  è stato ottenuto **sperimentalmente**.

A Volume costante(isocora):

$$dV = 0 \quad dW = pdV = 0$$

$$dQ = nc_vdT \text{ con } c_v \text{ calore specifico;}$$

$$dQ = dV$$

ottengo

$$dU = nc_vdT \Leftarrow \text{Vale sempre. } \Delta U = nc_v\Delta T$$

**La temperatura del gas non cambia!** Quindi:

$U$  dipende solo da  $T$ .

## 05/04/2019

---

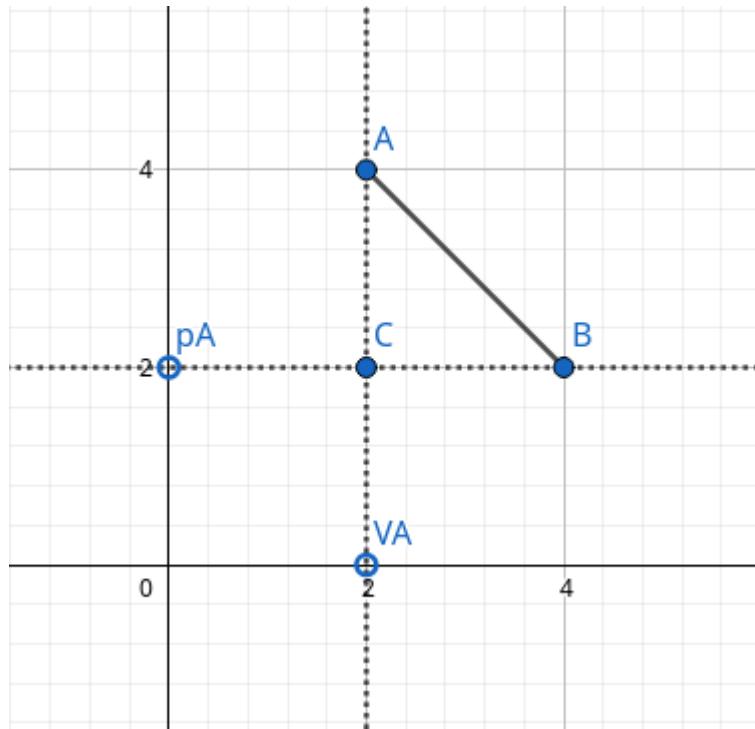
Sospensione lezioni per prove intermedie

## 08/04/2019

---

### Calore Specifico in base al processo

Abbiamo un grafico che descrive andamento di 3 gas.



$$\begin{cases} \Delta U = 0 \\ \Delta T = 0 \end{cases} \Rightarrow U = U(T)$$

$pV = mRT$  perchè ho un gas ideale.

Il punto A è composto da  $p_A, V_A, T_A$

Il punto B è composto da  $p_B, V_B, T_B$

Il punto C è composto da  $p_C, V_C, T_C$

$$\frac{p_A V_A}{nR} = T_A$$

$p_A V_A = nRT_A$  dove  $R$  e  $T_A$  sono costanti.

$$\Delta U = U_C - U_A = ?$$

Riprendo il calore specifico molare:  $c = \frac{1}{n} \frac{dQ}{dT}$ ,

ho un calore specifico che dipende dal processo considerato:  $c_{proc} = \frac{1}{n} \left[ \frac{dq}{dT} \right]_{proc}$

Ciò significa che una espansione **isoterma** crea un differente  $c_{proc}$  di una espansione **isocora**.

$$\Delta U = U_B - U_A = (U_B - U_C) + (U_C - U_A) = \Delta U_{BC} - \Delta U_{CA}$$

$A \rightarrow C : dU = dQ - \cancel{dV} (\cancel{dV} \text{ perchè isocora}).$

Quindi:  $dV = dQ = nc_V dT$

Uso  $V$  perchè ho il **volumen costante**.

Ottengo

$$dQ_{p_R} = nc_{p_R} dT.$$

Riprendendo:

$$nc_V dT \xrightarrow[c_V = \text{costante}]{} \Delta U_{CA} = nc_V \Delta T = nc_V(T_C - T_A)$$

$C \rightarrow B :_{\text{Isoterma}} dU = \cancel{dQ} - dW$  ma posso affermare che

$\rightarrow \Delta U_{CB} = U(T_B) - U(T_C) = 0$  con  $T_B$  temperatura **finale** e  $T_C$  temperatura **iniziale**.

$$\Delta U = \Delta U_{BC} + \Delta U_{CA} = nc_V \Delta T \\ nc_V(T_C - T_A)$$

dunque ottengo che con i gas ideali possiamo usare ciò.

$\Delta U$  è proporzionale a  $c_V$  e **non** dipende dalle trasformazioni, **vale sempre**.

## Relazione di Mayer

#

ho una isobara ( $p$  costante)

$$dV = dQ - dW \\ nc_V dT = nc_V dT - pdV$$

$$pV = nRT$$

$$d[pV] = d[nRT]$$

otteniamo

Differenziazione equazione di stato di gas perfetti:  $Vdp + pdV = nRdT$

Tornando a  $pV = nRT$

$$nRdT - \cancel{Vdp} (\cancel{Vdp} \text{ perchè la pressione è costante!})$$

$$= n(c_P - c_V)dT \text{ cioè}$$

Relazione di mayer:  $c_P - c_V = R$

Continuando abbiamo che

$$R > 0 \iff c_P - c_V > 0 \iff c_P > c_V$$

Per i diversi tipi di gasabbiamo:

1. **Gas Monoatomici**  $c_V = \frac{3}{2}R \Rightarrow c_P = \frac{5}{2}R$
2. **Gas Biatomici**  $c_V = \frac{5}{2}R \Rightarrow c_P = \frac{7}{2}R$
3. **Gas Poliatomici**  $c_p/R = a + bT + cT^2$

## Grafici p V

#

Ricordiamo che una *adiabatica non ha scambio di calore con l'esterno*.  $Q = 0$   
 $\Delta Q = 0$

Per il primo principio della termodinamica abbiamo che:

$$dV = \cancel{dq} - dW$$

$$nc_v dT = -pdV$$

Ricapitolando:

- **Isocora**  $V = \text{Costante}$
- **Isobara**  $p = \text{Costante}$
- **Isoterma**  $T = \text{Costante}$

ed una adiabatica come si comporta ?

$$n(c_P - R)dT = -pdV$$

$$nc_PdT = nRdT - pdV$$

$$nRdT = pdV + Vdp$$

$$-Vdp = pdV - nRdT$$

$$nc_PdT = Vdp$$

Ora unisco  $nc_PdT = Vdp$  con  $nc_vdT = -pdV$  ottenendo (il primo sopra il secondo sotto frazione)  $\frac{nc_PdT}{nc_vdT} = -\frac{Vdp}{pdV}$

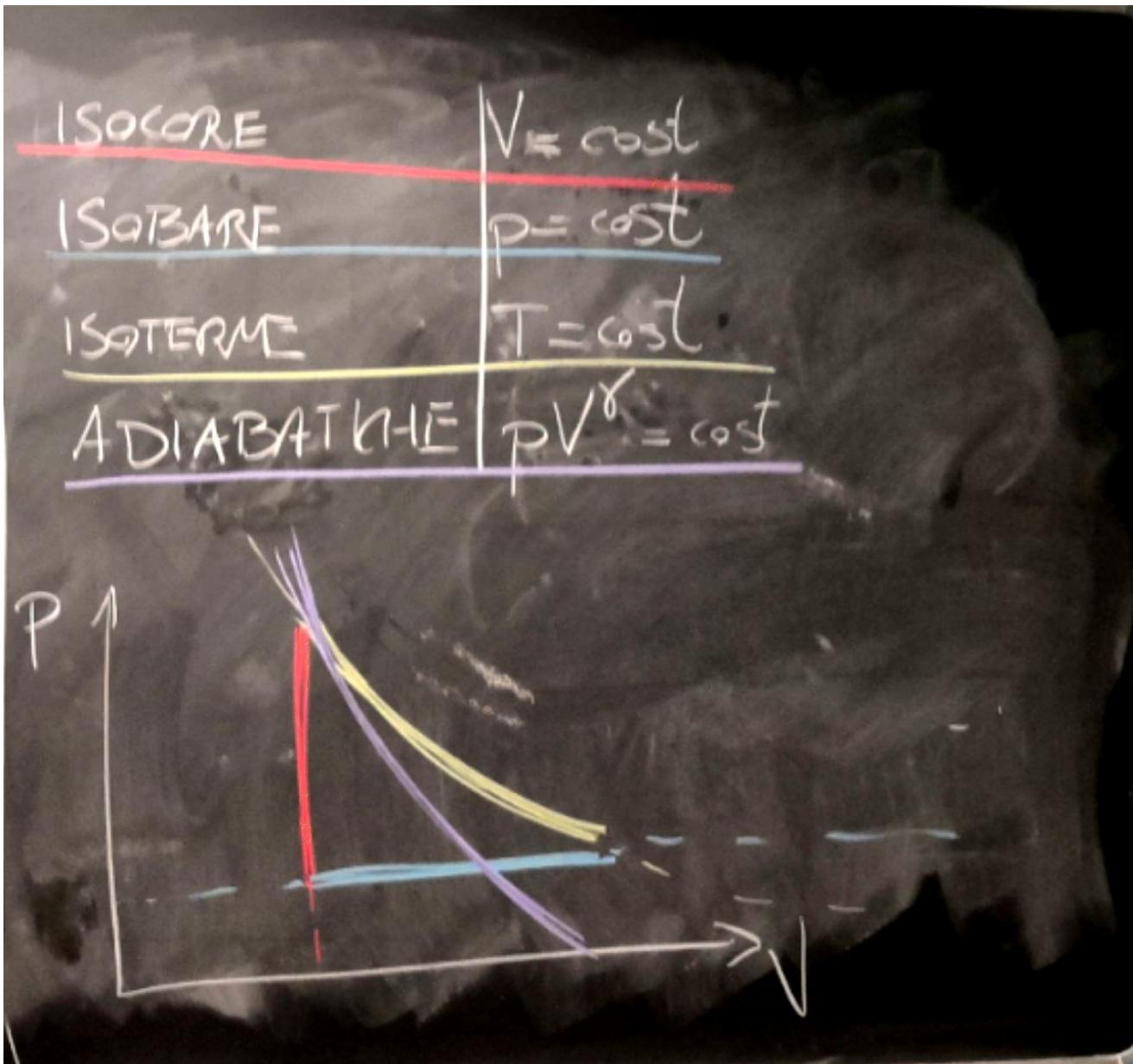
ho dunque ottenuto

$$\gamma = \frac{c_P}{c_V} = \frac{dp/p}{dV/V} > 1 \text{ cioè } -\frac{1}{\gamma} \frac{dp}{p} = \frac{dV}{V} \Rightarrow \int -\frac{1}{\gamma} d[\ln p] = \int d[\ln V]$$

ottengo

$$-\frac{1}{\gamma} \ln\left[\frac{p_{finale}}{p_{iniziale}}\right] - \ln\left[\frac{V_{finale}}{V_{iniziale}}\right]$$

$$pV_{iniziale}\gamma = p_{finale}V_{finale}\gamma \rightarrow pV^{\gamma-1} = \text{costante} \quad Tp^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{costante}$$



abbiamo dunque che

- **Isocora**  $V = \text{Costante}$
- **Isobara**  $p = \text{Costante}$
- **Isoterna**  $T = \text{Costante}$
- **Adiabatica**  $pV^\gamma = \text{Costante}$

In tabella otteniamo

Tipi	$dU$	$dQ$	$dW$
Isocore	$nc_V dT$	$nc_V dT$	$\emptyset$
Isobare	$nc_V dT$	$nc_p dT$	$-nRdT$
Isotermi	$\emptyset$	$pdV$	$pdV$
Adiabatiche	$nc_V dT$	$\emptyset$	$-nc_V dT$

Un Ciclo Termodinamico avviene quando lo stato **iniziale** coincide con lo stato **finale**.

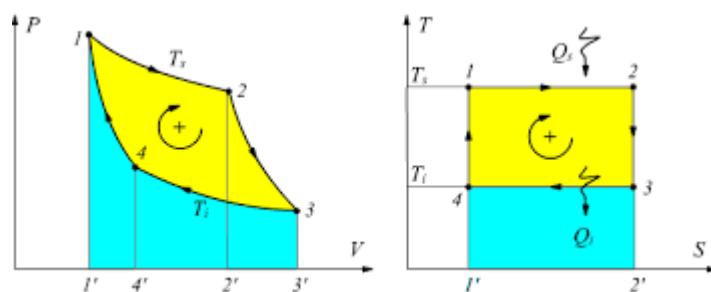
Possiamo anche dire che (*i* per iniziale e *f* per finale)

$$U_i = U_f \Rightarrow \Delta U = 0$$

$$p_i = p_f$$

$$V_i = V_f$$

$$T_i = T_f$$

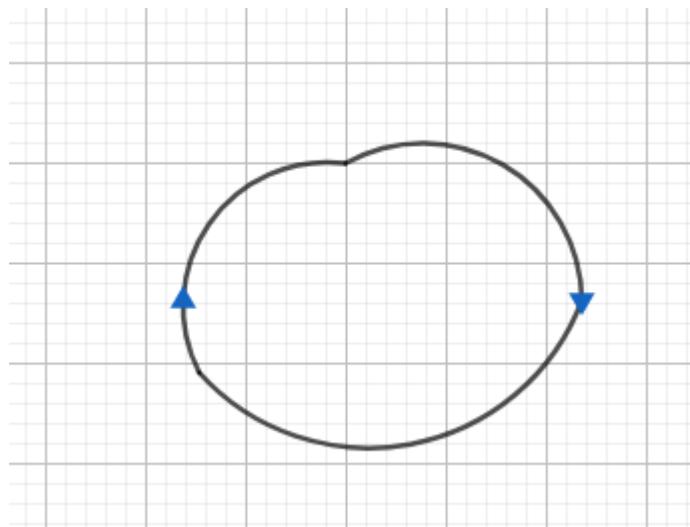


In questo esempio abbiamo l'area sottostante di colore azzurro, mentre l'area sovrastante in colore giallo. Noi consideriamo  $W_{superiore}$  come l'area sottesa della zona superiore, quindi area azzurra+area gialla.

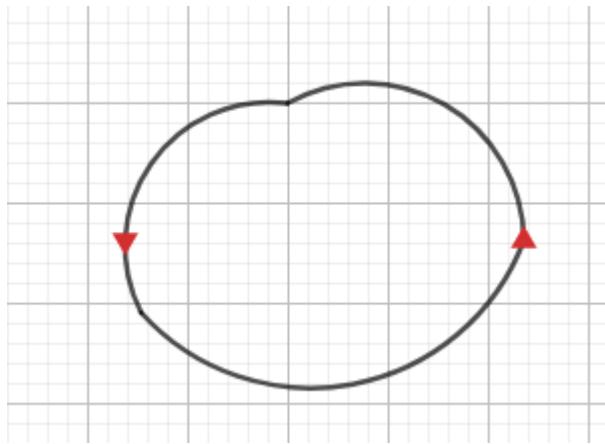
Consideriamo  $W_{inferiore}$  come l'area sottesa alla parte inferiore, quindi l'area azzurrina.  $W_{superiore} + W_{inferiore} = W$

Per determinare il **segno di w**, ho bisogno dei segni di  $W_{superiore}$  e di  $W_{inferiore}$ . Per vedere se è **compiuto o subito** ho bisogno del **verso di percorrenza**.

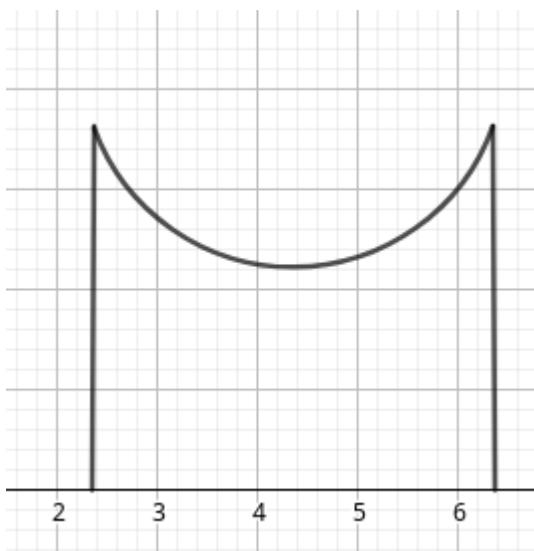
Affermiamo che  $|W_{superiore}| > |W_{Inferiore}|$   $\begin{cases} W_{superiore} > 0 \\ W_{inferiore} < 0 \end{cases}$  allora  $W > 0$ , senso **orario**.



$\begin{cases} W_{superiore} < 0 \\ W_{inferiore} > 0 \end{cases}$  allora  $W < 0$ , senso **antiorario**.



Un ciclo non compie lavoro quando ha una linea unica senza area all'interno.



$$\Delta U = Q - W$$

$$Q = W$$

Tutto il lavoro che fa la da come **calore**.

### Ciclo termico/Macchina termica

$$W > 0 \Rightarrow Q > 0$$

### Ciclo frigorifero/Macchina frigorifera

$$W < 0 \Rightarrow Q < 0$$

### Calore ceduto e calore assorbito

$Q_A$  = Somma di tutti i calori assorbiti, quindi  $Q_A > 0$ .  $Q_C$  = Somma di tutti i calori ceduti, quindi  $Q_C < 0$ .

### Lavoro subito e lavoro effettuato

$W_F$  = Somma di tutti i lavori effettuati, quindi  $W_F > 0$ .  $W_S$  = Somma di tutti i lavori subiti, quindi  $W_S < 0$ .

Ciò mi porta a

$$Q = Q_A + Q_C \quad Q = W \quad Q_A + Q_C = W_F + W_S \quad W = W_F + W_S$$

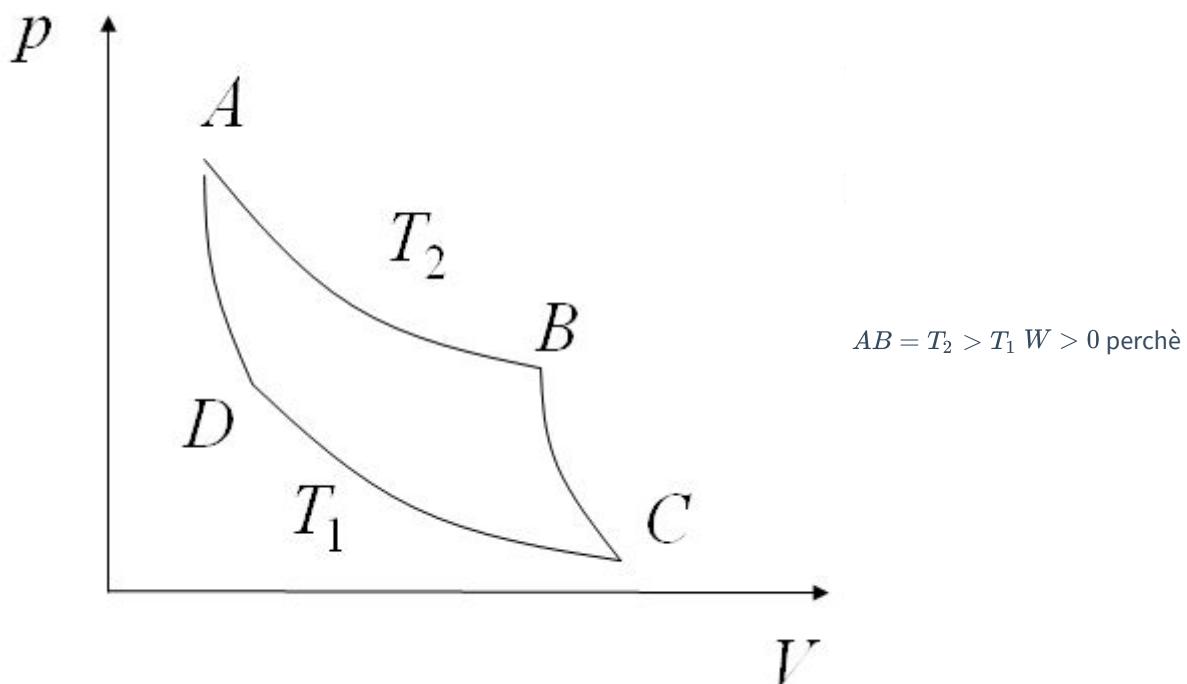
## Rendimento di una macchina termica

Il lavoro/Calore assorbito =  $\frac{W}{c_A} = \eta = \frac{Q_A + Q_C}{Q_A} = 1 + \frac{Q_C}{Q_A} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_A}$  e ciò vale per tutte le macchine termiche.

## Reversibilità di una trasformazione

Una trasformazione è reversibile se, qualsiasi sia il dettaglio, vedo una serie di **stati di equilibrio**. Uno stato di equilibrio di esempio, per un gas ideale:  $pVnRT$  per ogni punto.

## Ciclo di Carnot



$AB = T_2 > T_1$   $W > 0$  perché

orario.

Avendo il seguente ciclo possiamo affermare che:

- $AB$  è una **espansione reversibile isoterma**;
- $BC$  è una **espansione reversibile adiabatica**;
- $CD$  è una **compressione reversibile isoterma**;
- $DA$  è una **compressione reversibile adiabatica**.

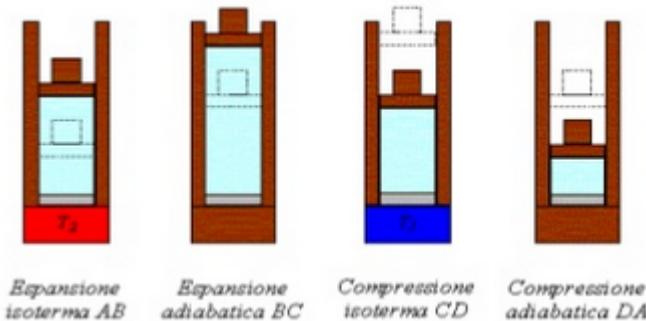
Sperimentalmente notiamo che  $0 \leq \eta < 1$

**12/04/2019**

Ho due sorgenti a temperature  $T_2$  e  $T_1$

Potrei connetterle con delle isocore, ma non lo faccio perchè avrei **scambio di calore**. Voglio che ci sia scambio di calore **nullo**, quindi utilizzo delle **adiabatiche** per collegare le due sorgenti.

Immagino di avere un pistone, rappresentato come punto *A* che deve arrivare ad uno stato *B*



Ho che

$$A \xrightarrow{\Delta U=0, Q=W} B \xrightarrow{\Delta U=-W, Q=0} C \xrightarrow{\Delta U=0, Q=W} D$$

Nel passo *A* abbiamo calore  $Q_I$  ceduto dalla sorgente  $T_2$

Nel passo *B* abbiamo lavoro  $W_I$  compiuto.

Nel passo *C* abbiamo calore  $Q_1$  ceduto alla sorgente  $T_1$

Nel passo *D* abbiamo lavoro  $W_{II}$  subito.

Abbiamo che

$$Q_2 = nRT_2 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) \text{(questo è così perchè } Q_2 = W_2 = \int_A^B pdV)$$

$$T_2 V_B^{\gamma-1} = T_1 V_C^{\gamma-1}$$

$$W_I = -\Delta U_{BC} = nc_V(T_2 - T_1)$$

$$T_2 V_B^{\gamma-1} \text{ è associabile a } B \text{ mentre } T_1 V_C^{\gamma-1} \text{ è associabile a } C$$

$$Q_1 = nRT_1 \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$$

$$T_1 V_D^{\gamma-1} = T_2 V_A^{\gamma-1}$$

$$W_{II} = -\Delta U_{DA} = nc_V(T_1 - T_2)$$

$$T_1 V_D^{\gamma-1} \text{ è associabile a } D \text{ mentre } T_2 V_A^{\gamma-1} \text{ è associabile a } A$$

Mi calcolo il rendimento  $\eta = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_A} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{nRT_1 \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)}{nRT_2 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}$  con un po' di calcoli noto che i due logaritmi sono uguali. Quindi

$$= 1 - \frac{nRT_1 \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)}{nRT_2 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)} = 1 - \frac{\cancel{nR} \cancel{T_1} \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)}{\cancel{nR} \cancel{T_2} \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$\text{dove abbiamo che l'inefficienza} = \frac{T_1}{T_2}$$

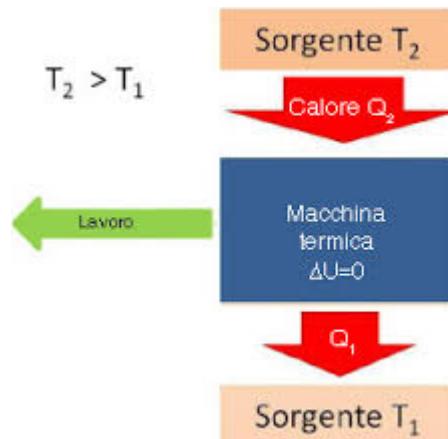
Di conseguenza abbiamo un'altra importante equazione

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \Rightarrow \frac{-Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

## Rappresentazione macchina termica

Con La macchina Termica reversibile.

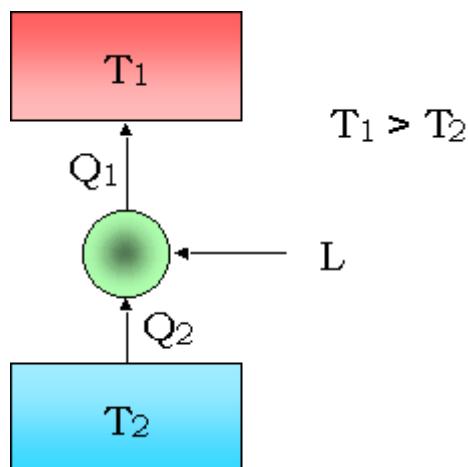
Il segno  $W = Q_2 - Q_1$  quindi lavoro ceduto, negativo.



## Rappresentazione macchina frigorifera

Con La macchina Frigorifera reversibile.

Il segno  $W = Q_1 - Q_2$  quindi lavoro ottenuto, positivo.



Coefficiente di prestazione di macchina frigorifera(COP):  $\xi = \frac{Q_A}{|W|}$

## Secondo principio della termodinamica

**Formulazione di Clausius:** Non posso avere un processo il cui unico risultato sia trasferire calore da temperatura T ad una temperatura più calda di T.

**Formulazione di Kelvin-Plank** è impossibile realizzare un processo il cui unico risultato sia trasformare il calore in lavoro.

Le due formulazioni sono equivalenti. Questo principio è legato allo stesso concetto del tempo.

### Dimostrazione per assurdo

Ho macchina  $\eta X$  generico e  $R$  reversibile.

$$W = Q'_2 - Q'_1$$

$$W = Q_2 - Q_1$$

$-W = -Q_2 + Q_1$  Ottengo una nuova macchina

$$q_1 = Q'_2 - Q'_1 = Q_2 - Q_1$$

$$q_2 = Q'_2 - Q_2 = +(Q'_1 - Q_1)$$

Il calore che assorbo da una, è il calore che cedo dall'altra Suppongo che questa macchina

$$\eta_x > \eta_R$$

$$\frac{W}{Q'_2} > \frac{W}{Q_2}$$

$$Q'_2 < Q_2$$

$q_2 = Q'_2 - Q_2 < 0$  Ma allora sto trasferimendo calore da una sorgente più fredda ad una più calda! Viola il secondo principio nella formulazione di Clausius! **per assurdo**  $\eta_x > \eta_R$  è falsa.

Quindi in teoria l'opposto è

### Teorema di Carnot

$\eta_X \leq \eta_R$  dove il minore vale se la macchina  $X$  è **irreversibile**,  $(\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2})$  L'uguale vale se la macchina  $X$  è **reversibile**.  $(\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2})$  (**importante tenere le temperature in KELVIN**)

**Corollario 1** Tutte le macchine reversibili hanno lo stesso rendimento  $1 - \frac{T_1}{T_2}$  se lavorano tra le stesse temperature.

**Corollario 2** Tutte le macchine irreversibili hanno un rendimento inferiore a  $1 - \frac{T_1}{T_2}$ .

è importante ricordare che un rendimento può essere solo  $0 \leq \eta < 1$ .

## 15/04/2019

Ricordando il teorema di carnot dalla volta precedente abbiamo che

$$1 - \frac{Q_1}{Q_2} \leq 1 - \frac{T_1}{T_2} \text{ e ricordiamo che } Q_1, Q_2 > 0$$

Effettuando delle operazioni algebriche ottienamo:

$$1 - \frac{Q_1}{Q_2} \leq 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} \geq \frac{T_1}{T_2}$$

$$-\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \rightarrow \frac{(-Q_1)}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$$

Ora sostituisco  $Q$  con  $\mathcal{Q}$

$$\mathcal{Q}_1 = (-Q_1)$$

$$\mathcal{Q}_2 = Q_2$$

$$\frac{\mathcal{Q}_1}{T_1} + \frac{\mathcal{Q}_2}{T_2}$$

Cioè ho spostato i segni sui calori stessi.

Ottenendo

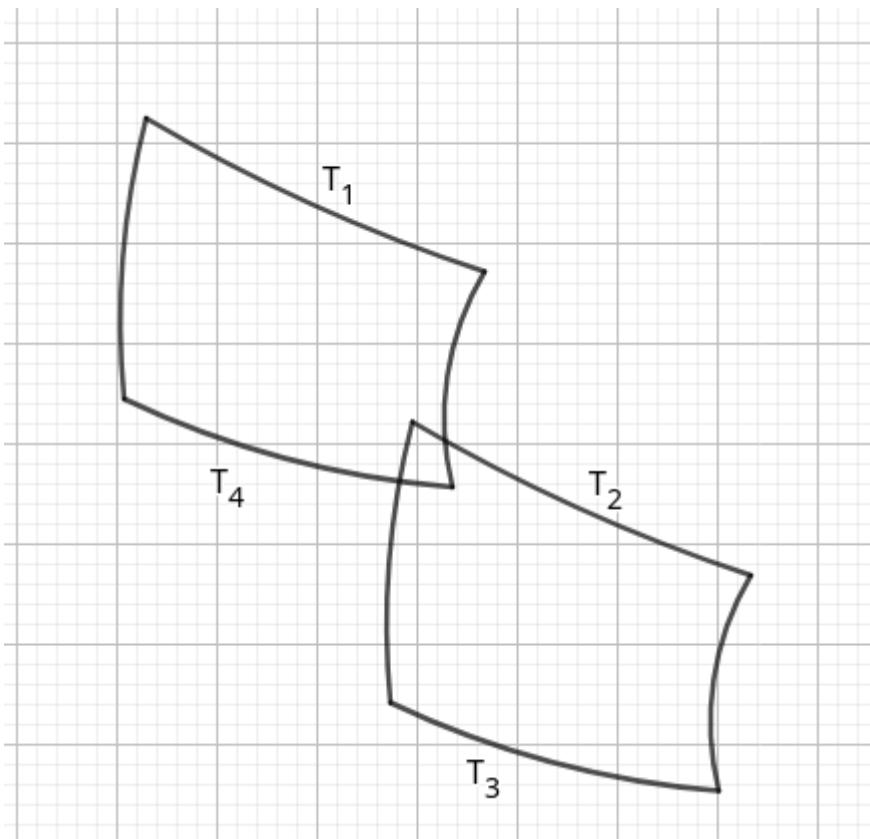
$$\frac{\mathcal{Q}_1}{T_1} + \frac{\mathcal{Q}_2}{T_2} + \frac{\mathcal{Q}_3}{T_3} + \frac{\mathcal{Q}_4}{T_4}$$

cioè

**Teorema di clausius**  $\sum_{i=1}^n \frac{\mathcal{Q}_i}{T_i} \leq 0 \rightarrow \oint_{\Gamma} \frac{d\mathcal{Q}}{T} \leq 0$

Questo integrale viene chiamato **integrale di clausius**

Dove  $\Gamma$  è la seguente area



dove i due cicli non devono essere

necessariamente uguali. (Li ho resi uguali per semplicità nel copia incolla grafico) quindi  $\eta_x \leq \eta_R \iff \oint \frac{d\mathcal{Q}}{T} \leq 0$

Se  $\eta_x$  è reversibile

$$\eta_x = \eta_R \Rightarrow \oint \frac{d\mathcal{Q}}{T} = 0$$

Cioè

Se il ciclo è **Reversibile**, l'integrale di clausius è **nullo**.

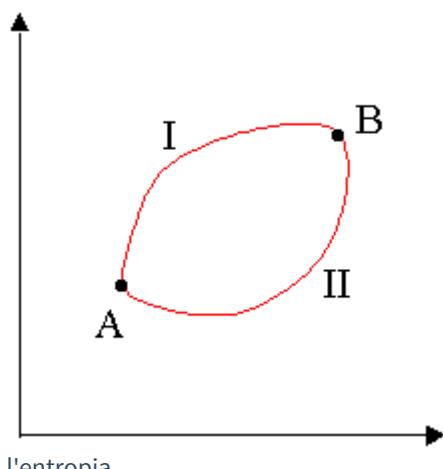
Proseguendo con l'integrale di prima, scompongo:

$$I \int_A^B \frac{dQ}{T} + II \int_B^A \frac{dQ}{T} = 0 \xrightarrow{\text{Reversibile}} I \int_A^B \frac{dQ}{T} - II \int_A^B \frac{dQ}{T} = 0$$

Ottengo che

L'integrale non dipende dal percorso!

Quindi potrei avere un percorso che va da  $A$  a  $B$  totalmente diverso da quello che da  $B$  va ad  $A$ , il risultato non cambierebbe.



ora ottengo  $I \int_A^B \frac{dQ}{T} = II \int_A^B \frac{dQ}{T} = III \int_A^B \frac{dQ}{T} = S_B - S_A = \Delta S$  dove  $S_B$  è

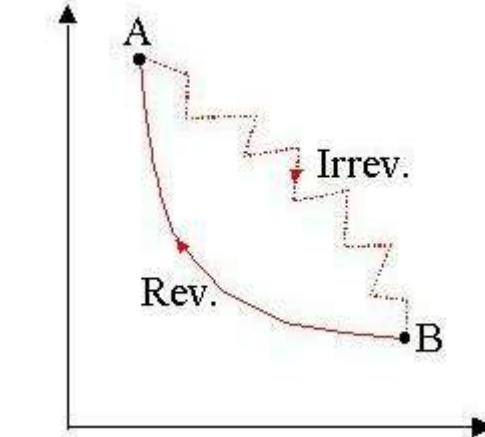
l'entropia

## Entropia

Entropia è una **funzione di stato** che :

$$\text{entropia} = S|\Delta S = S_B - S_A = \int_{A(\text{Reversibile})}^B \frac{dQ}{T}$$

Facciamo finta di avere un ciclo irreversibile per colpa di  $A \rightarrow B$



Ottengo che  $\oint dQ < 0 = I \int_A^B \frac{dQ}{T} + \int_B^A \frac{dQ}{T} < 0$

$$I \int_A^B \frac{dQ}{T} - II \int_A^B \frac{dQ}{T} < 0 \text{ cioè } I \int_A^B \frac{dQ}{T} < II \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

- La parte non reversibile è  $I \int$ ;
- Ciò che varia è che ora ho  $<$  al posto di  $=$

Dunque

$$\Delta S_{AB} > \int_A^B \frac{dQ}{T}$$
 reale irreversibile.

Ottengo dunque che

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} \leq \Delta S_{AB}$$
 dove = se reversibile  
< se irreversibile

Ottengo infine che

- $\Delta S = 0$  se **reversibile** ( $S_A^{Finale} = S_A^{Iniziale} = 0$ )
- $\Delta S < 0$  se **irreversibile**

### Esercizio di esempio

Avendo due sorgenti di calore  $T_2 = 380K$

$$T_1 = 280K$$

$$S = 100cm^2$$

$$d = 2,5cm$$

$\Delta S_{universo} = ?$  (calcolare l'entropia dell'universo)

Uso la **formula di Fourier**:  $Q = KS \frac{\Delta S}{d} t$

**Attenzione:** S sta per superficie, non entropia.

$$K_{1l} = 201 \frac{J}{mSK}$$

$$Q|_{1Sec} = 8040J$$

$$Q|_{1Min} = 4,824 \cdot 10^5 J$$

$$\Delta S_u = \frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2} = 453,4 \frac{J}{K}$$

---

Tornando alla formula precedente , scritta con i diffferenziali

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$S_B - S_A = \int_A^B \left( \frac{dQ}{T} \right)_{reversibile} > \int_A^B \left( \frac{dQ}{T} \right)_{irreversibile}$$

ricordando che  $\oint \frac{dQ}{T} < 0$  per l'irreversibilità.

---

Quindi, sull'es di prima, l'entropia dell'universo è definita con queste tre equazioni

$$\Delta S_{S1} = \frac{Q_1}{T_1} \text{ con } Q_1 > 0 \text{ perchè la sorgente } S1 \text{ assorbe.}$$

$$\Delta S_{S2} = -\frac{Q_2}{T_2}$$

$$\Delta S = 0$$

ottenendo

$$\Delta S_{TOT} = \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2}$$

### In un sistema isolato

Suppongo di avere un **sistema isolato**, cioè che non ho scambio di calore  $dQ = 0$

$$S_B - S_A = 0$$

$$S_B = S_A$$

Quindi

**Un sistema isolato:**

1. Se procede per **trasformazioni reversibili** allora l'entropia non varia;
2. Se procede per **trasformazioni irreversibili** allora l'entropia aumenta.

*L'entropia, microscopicamente è compatibile con il numero di stati macroscopici(?)*

$$S = c \ln[N] \text{ dove } N = \text{numero di stati possibili}$$

Quindi l'entropia in questo caso

Tende ad evolvere in **stati macroscopici compatibili con stati microscopici**, cioè ho più disordine.

Fornendo una definizione più precisa di disordine:

**Disordine:** Possibilità di scelta.

*Ci basta pensare ad una stanza con dei libri impilati uno sopra all'altro al centro della stanza. Successivamente avremo che i libri (usandoli) verranno spostati nei vari punti della stanza, creando disordine dallo stato iniziale i quali erano posizionati.*

## Elettromagnetismo #

**Forza di Coulomb:**  $K \frac{q_1 q_2}{d^2}$

$$udm[q] = 1C$$

$$[K] = [\frac{F}{qq} d^2] = [\frac{N \cdot m^2}{c^2}] = udm[K]$$

Dove  $K$  è una costante definita come

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

avendo

$$\epsilon_0 = \text{costante dielettrica del vuoto} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$$

### Paragone interessante

Forza di Newton =  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = K_G \frac{m_1 m_2}{r^2}$  Forza di Coulomb =  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \cdot \hat{r}_{12}$  Sono molto simili!

- Un oggetto senza massa **non è incline ad accettare interazioni** con la forza di Newton
- Un oggetto che non è carico **non è incline ad accettare interazioni** con la forza di coulomb.

Domande che sorgono:

- Perchè non posso avere masse negative?
- Perchè "d^2"? ( $\rightarrow$  Teorema di Gauss, il quale si applica anche alla massa). Vedremo approfonditamente nella prossima lezione.

## 19/04/2019

parte esercizio mancante

$$\Delta S_{TOT} = \cancel{\Delta S_{MAC}} + \Delta S_{env} =$$

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

$$\Delta S_{TOT} = \Delta S_{env} = 0 = \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2}$$

Sapendo che è Termicamente isolato ( $Q_{TOT} = 0$ )

Tornando all'elettromagnetismo

### Cariche puntiformi

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_{12}|^2} \hat{r}_{12} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

$$q_1 = 400_n C$$

$$q_2 = 100_n C$$

$$Q = 1_n C$$

$$r_1 = 2 mm$$

$$r_2 = 1 mm$$

$$\vec{F} = ?$$

L'inclinazione a muoversi la da la massa, non la carica. Ci manca la massa.

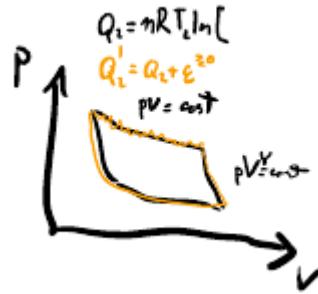
Supponiamo che i due punti siano fissati.

**Principio di sovrapposizione:** Le forze elettriche sono indipendenti dall'ambiente circostante.

$$\vec{F}_{1 \rightarrow Q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{400(nC)^2}{4(\mu m)^2} \hat{r}_1 =$$

$$= \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-16}}{10^{-6}} N = 9 \cdot 10^{-1} N = 0,9N$$

$$\vec{F}_{2 \rightarrow Q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{100(nC)^2}{1(\mu m)^2} \hat{r}_2 = 0,9N$$

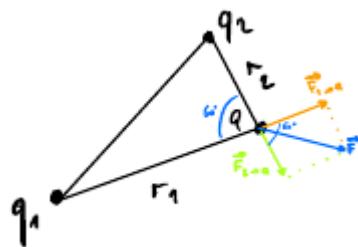


Come è possibile che siano entrambi  $0,9N$  nonostante la differenza tra le due cariche? per la distanza.

Ridisegnando l'angolo, faccio la regola del parallelogramma tra  $\vec{F}_{1 \rightarrow Q}$  e  $\vec{F}_{2 \rightarrow Q}$  ottengo  $\vec{F}$

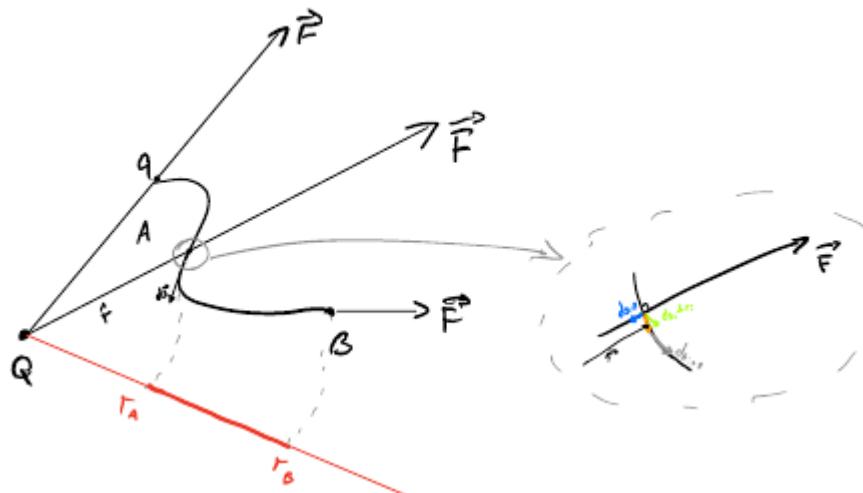
$$|\vec{F}| = \sqrt{3} \cdot 0,9N = 1,55N$$

Calcoliamo il lavoro!



$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{S} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \int_A^B \frac{1}{r^2} \hat{r} \cdot d\vec{S} = \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i^2} \hat{r}_i \cdot d\vec{S}_i \text{ che è uguale a } \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i^2} dS_i^{||}$$

Ricordiamo che per il lavoro conta solo lo spostamento parallelo al raggio. Posso immaginarmi di spostare lo spostamento parallelo su un asse.



Quindi alla fine l'integrale conta, indipendentemente dal "percorso" della funzione, tra  $r_A$  e  $r_B$ ! cioè

$$\frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_A}^{r_B} \frac{1}{r^2} dr = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right]$$

Conta solo lo **stato iniziale e lo stato finale**.

Otteniamo che la forza elettrica è una forza **conservativa**.

$$W_{A \rightarrow B} = U_A - U_B = -\Delta U$$

$$U_p = U(\vec{r}_p) = U(r_p) = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} + C_G$$

con p per punto (puntiforme)

avendo sorgente puntiforme e carica puntiforme.

$C_G$  è una costante. Facendo le differenze poi si semplifica.

### Autoenergia

Una carica può interagire con se stessa? in quel caso il raggio sarebbe **zero!** il che sarebbe un problema! Boh.

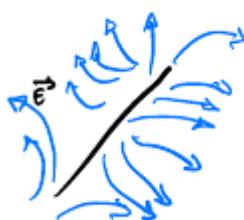
### Carica di prova e campo elettrico

$$\vec{F}_{TOT} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i Q}{r_i^2} \hat{r}_i$$

$$= Q \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

$$\vec{E}_{TOT} = \frac{\vec{F}_{TOT}}{Q} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Il campo elettrico ha un corrispettivo fisico. Un vettore associato a un punto nello spazio. Posso avere un punto a caso e poter disegnare il campo elettrico!



**Campo elettrico:** Funzione matematica calcolabile in qualsiasi punto dello spazio, associando a questo punto un valore(vettore, tensore, scalare etc...) Se il campo è **vettoriale lo descrive un vettore**.

Se **scalare lo descrive un numero**. (ad esempio la temperatura!)

Posso ottenerlo senza **descrivere necessariamente le sue sorgenti**.

$$\text{con i differenziali } \vec{F}_{TOT} \xrightarrow{1/Q} \vec{E}_{TOT} \quad \vec{U} \xrightarrow{1/Q} \vec{V} | \Delta V = \frac{\Delta U}{Q}$$

**29/04/2019**

$$\vec{E} = \underset{def}{=} \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Con unità di misura

$$[E] = \left[ \frac{F}{Q} \right] = udm[E] = \frac{N}{C} = \frac{V}{m}$$

$$W_e = \int_c \vec{F}_e \cdot d\vec{l} = ^{(*)} \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = ^{def} -\Delta U = -[U_B - U_A] = -q_0[V_B - V_A]$$

(\*) L'integrale lungo la curva posso farlo calcolando l'integrale agli estremi (non è una cosa immediata)

dove

$$-[U_B - U_A] = W_e = \int_A^B q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l} = q_0 \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = ^{def} -q\Delta V \text{ cioè differenza di potenziale}$$

### Carica puntiforme

In una carica puntiforme

$$\vec{F} = \frac{q_0 Q}{4\pi\epsilon_0 r} \hat{r}$$

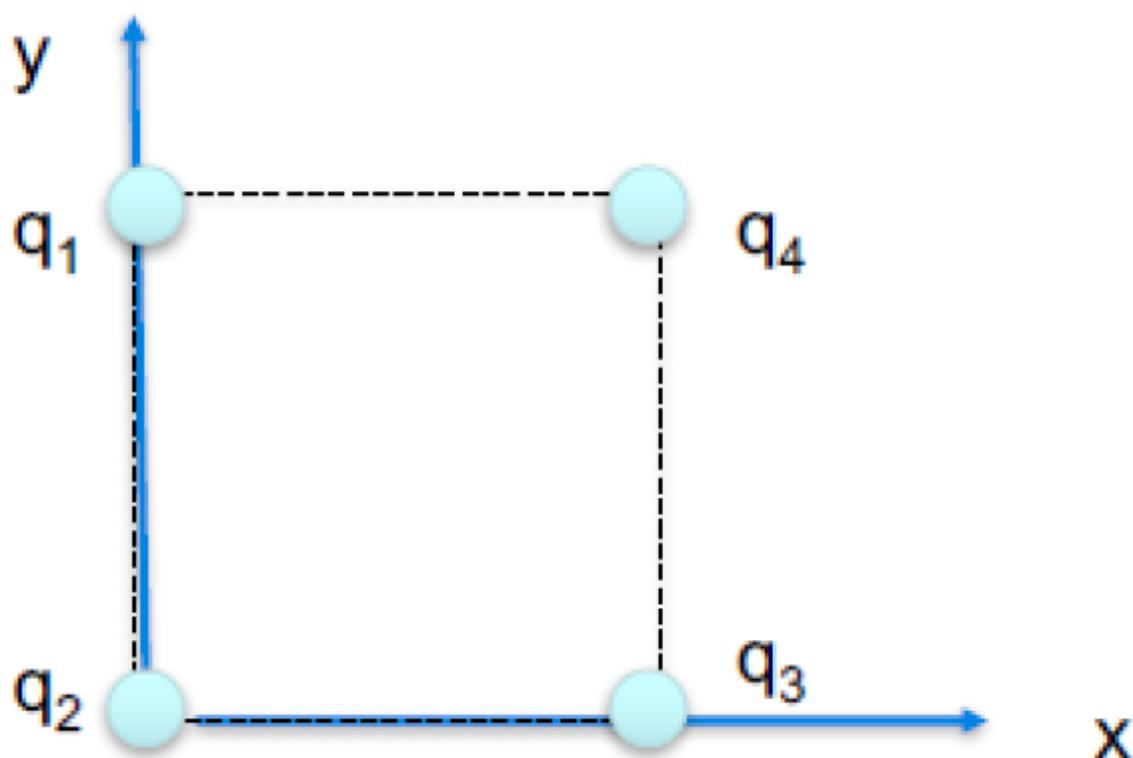
$$\vec{E} = \frac{q_0 Q}{4\pi\epsilon_0 r} \hat{r}$$

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} + \text{costante}$$

Questa costante vale zero!

### Energia elettrostatica delle cariche

Avendo quattro punti  $q_1, q_2, q_3, q_4$



$$W = -\Delta U_e|_{q_2} = -q_2 \Delta V_e = -q_2 \left[ \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} - \cancel{\frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 (+\infty)}} \right]$$

Il contributo di  $q_3$  verso  $q_2$  è

$$W = -\Delta U_e|_{q_3} = -q_3 \Delta V_e = -q_3 \left[ \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{13}} - \frac{\cancel{q_1}}{\cancel{4\pi\epsilon_0 (+\infty)}} + \dots \right]$$

Quindi otteniamo che è arbitrario come prendo i punti ( $r_{13}$ ,  $r_{12}$ )

Lo posso dunque scrivere come **energia elettrostatica delle cariche**

$$U_e = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} q_i V_{ji}$$

(l'un mezzo è lì presente perchè va a formare una matrice **simmetrica**.)

## Densità lineare

Ho un filo

$\lambda = \text{densità lineare di carica} = \frac{dq}{ds} \Rightarrow \lambda ds$  (definizione differenziale, infinitesimale, ha senso in un punto dove il tratto di filo è approssimabile con una retta/segmento)

con

$$q_L = \int_{P_0}^{P_0+L} \lambda(s) ds$$

Ho una superficie

$\sigma = \text{densità superficiale di carica} = \frac{dq}{d\Sigma} \Rightarrow \sigma d\Sigma$  dove  $\Sigma$  è la mia superficie con cariche.

con

$$q_S = \int_S^{P_0} \sigma(\Sigma) d\Sigma$$

Avendo un volume (tre dimensioni)

$\rho = \text{densità volumica di carica} = \frac{dq}{d\tau} \Rightarrow \rho d\tau$  dove  $\tau$  è il mio volume con cariche.

con

$$q_V = \int_V^S \rho(\tau) d\tau$$

## Esercizio idrogeno

Calcolo idrogeno

Ricordo che un protone è una sfera =  $\frac{4}{3}\pi R^3$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} c$$

$$R_n = 10^{-15} m$$

calcolo  $\rho$

$$\rho = \frac{dq}{d\tau} = \frac{Q}{\tau} = \frac{1e}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{1,6 \cdot 10^{-20} c}{4 \cdot 10^{-45} m^3} = 4 \cdot 10^{25} c/m^3$$

Ma come fa la densità ad essere negativa? la carica può essere negativa, quindi la densità di carica può essere negativa!

Ora provo a "spalmare" la carica su tutta la superficie

$$R_a = 10^{-10} m \text{ raggio nucleo}$$

$$\sigma = \frac{d_q}{d\Sigma} = \frac{Q}{4\pi R_a^2} = \frac{-16 \cdot 10^{-20} c}{12 \cdot 10^{-20}}$$

### Passaggio al continuo (PAC)

Ho un campo elettrico formato da una serie di cariche

$$\vec{E}(\vec{r}_p) = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_i - \vec{r}_p|^2} = (\sum_i dq_{i=ds}) \int_A^B ds \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_s - \vec{r}_p|^2} \hat{r}_{SP}$$

$$\vec{V}(\vec{r}_p) = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_i - \vec{r}_p|} = (\sum_i dq_{i=\rho d\tau}) \int^A d\tau \frac{\rho}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_\tau - \vec{r}_p|}$$

$$U_e = \frac{1}{2} \sum i \neq j \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_i - \vec{r}_j|} = \dots$$

### somma costante

$$W = \Delta E_k = -\Delta U_e = -q\Delta V$$

$$\Delta E_k + \Delta U_e = \Delta E_{TOT} = 0$$

$$\Delta [E_k + qV] = 0 \Rightarrow E_k + qV = \text{costante} !$$

### Esperimento di Rutherford

Degli studenti sparano delle cariche su una lamina in oro

$$E_k = 7 MeV \text{ dove } MeV \text{ è MegaElettronVolt}$$

$$q_\alpha = +2e$$

$z = 76$  cioè il numero atomico dell'oro

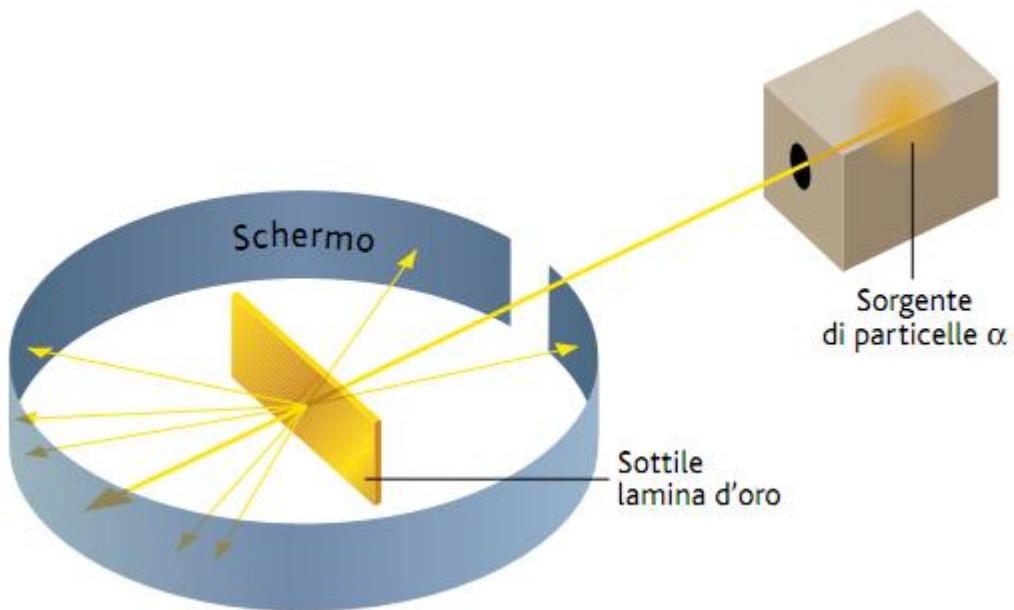
$$m_a = 6,64 \cdot 10^{-27} Kg$$

Si sono accorti che possono succedere diverse cose

la particella  $\alpha$  può passare tra gli atomi dell'oro

più mi avvicino ad un nucleo senza toccarlo più viene deviato

quando lo "colpisco" non lo tocco in realtà, perché il campo che c'è respinge la nostra particella spedita!



$$7 \cdot 10^6 eV = 1,6 \cdot 10^{-19} J$$

Inizialmente  $E_k^i + \cancel{D_i}$

~~$D_i$~~  perchè sono molto distante (quindi per le grandezze minuscole che prendiamo, con una distanza di un metro è pressochè infinita.)

Finale abbiamo  ~~$D_f$~~  +  $qV_f$

~~$D_f$~~  perchè l'energia cinetica alla fine è zero

$$\text{Energia cinetica iniziale } E_k^i = \frac{1}{2} m V_i^2 = 2e \frac{z_e}{4\pi\epsilon_0 x}$$

$$\text{con } x = \frac{2ze^2}{4\pi\epsilon_0 E_k^i} = 4,11 \cdot 10^{-16} mz$$

#### Considerazioni:

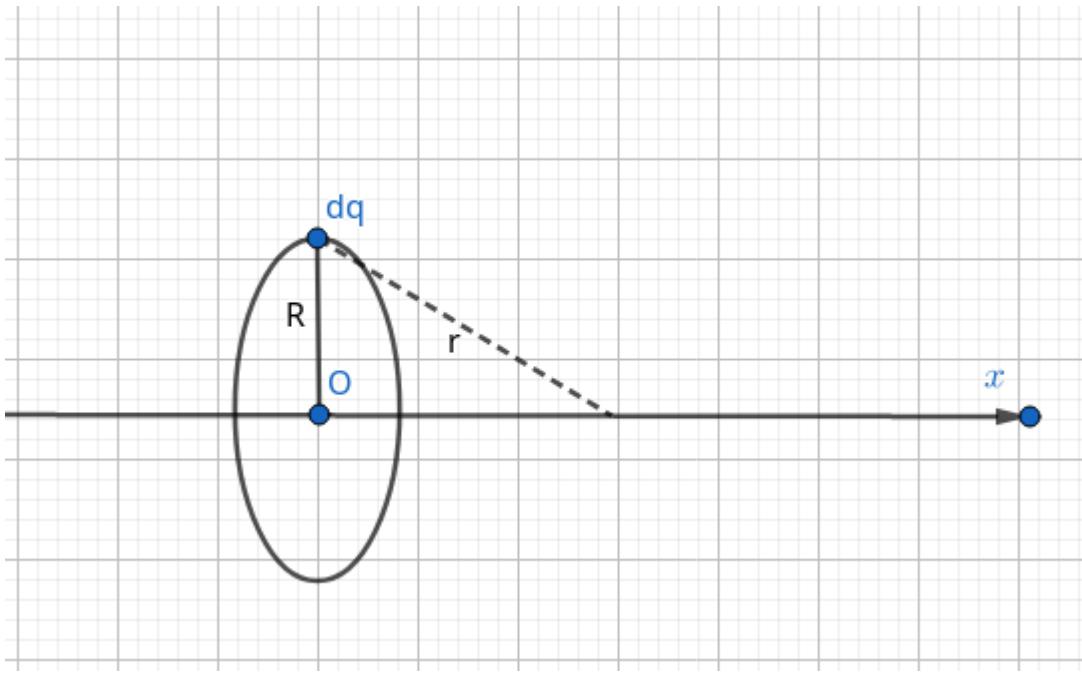
più alta è l'energia e più posso sondare distanze.

più è alto un numero atomico e meno ci avviciniamo!

Se continuo ad aumentare l'energia, il bersaglio si **rompe** prima di toccarlo!

#### Esercizio anello

Ho un anello di carica, spedisco una particella tra l'anello



$$V(x, 0, 0) = ?$$

$$\vec{E}(x, 0, 0) = ?$$

$$dV = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{\lambda ds}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$V = \int dV = \int_{\text{anello}} \frac{\lambda ds}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 r} \int ds = \frac{\lambda 2\pi R}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{R^2 + x^2}}$$

$$\text{con } \lambda 2\pi R = Q$$

### Considerazioni finali:

Se mi allontano tanto vedo una carica puntiforme, quindi la tratto come tale!

$$\text{se } x = 0 \Rightarrow \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$$

$$\text{se } \frac{R}{x} \ll 1 \Rightarrow \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 |x|}$$

## 03/05/2019

$$V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Abbiamo un **gradiente**

*Che cosa è un gradiente?*

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V = - \begin{bmatrix} \frac{\delta V}{\delta x} \\ \frac{\delta V}{\delta y} \\ \frac{\delta V}{\delta z} \end{bmatrix}$$

con  $\vec{\nabla}$  è il gradiente, composto da derivate parziali(?)

Dove ho le derivate parziali:

$$E_x = -\frac{\delta}{\delta x} V = 2V_0 xy(1-z)$$

$$E_y = -\frac{\delta}{\delta y} V = V_0 x^2 (1 - z)$$

$$E_z = -\frac{\delta}{\delta z} V = -V_0 x^2 y$$

Da queste tre ho:

$$\vec{E} = -\hat{r} \frac{dV}{dr}$$

## Circuitazione

**Circuitazione:**  $\oint q \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$

dove  $q \vec{E} = \vec{F}$ , ma possiamo togliere la carica  $q$  perchè costante, ottenendo:

$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$  che viene più semplicemente scritto come

$$\Gamma \vec{E} = 0$$

**Tutti i campi conservativi hanno circuitazione zero.**

Coinvolgo un integrale chiuso su un dominio chiuso ma è **lineare, unidimensionale!**

## Flusso

Immagino di avere un campo, vettoriale, che è la velocità delle particelle in un fluido.

Immagino di avere un flusso laminare controllato e che possa analizzare il vettore velocità( il campo è composto da un insieme di vettori velocità!).

Avendo un "setaccio" con il quale passiamo il nostro flusso, se è abbastanza piccolo, posso avere una ottima approssimazione di una superficie piana.

Oltre tutto ho un vettore **normale** che non è necessariamente perpendicolare al nostro.

Otteniamo la **definizione di flusso**:

$$d\Phi_{d\Sigma}(\vec{v}) =^{\text{def}} \vec{v} \cdot \hat{n} d\Sigma$$

Quantità matematica di un campo vettoriale

Allargando la superficie il flusso aumenta.

Il segno del flusso è **arbitrario** in base al vettore **normale**.

disegno così superficie

$$= \vec{E} \cdot \hat{n} d\Sigma = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \cdot \hat{n} d\Sigma = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \cos\theta \frac{d\Sigma}{r^2}$$

con  $\cos\theta d\Sigma$  scrivibile come  $d\Sigma_r$

diventando

$$\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{d\Sigma_r}{r^2}$$

Prendiamo la superficie ortogonale al vettore che stiamo valutando( $\cos\theta = 0$ )

## Angolo solido

Angolo portato alle tre dimensioni

Avendo un arco di circonferenza, portato ad un cilindro abbiamo

$$\frac{\hat{a}}{R} = \alpha$$

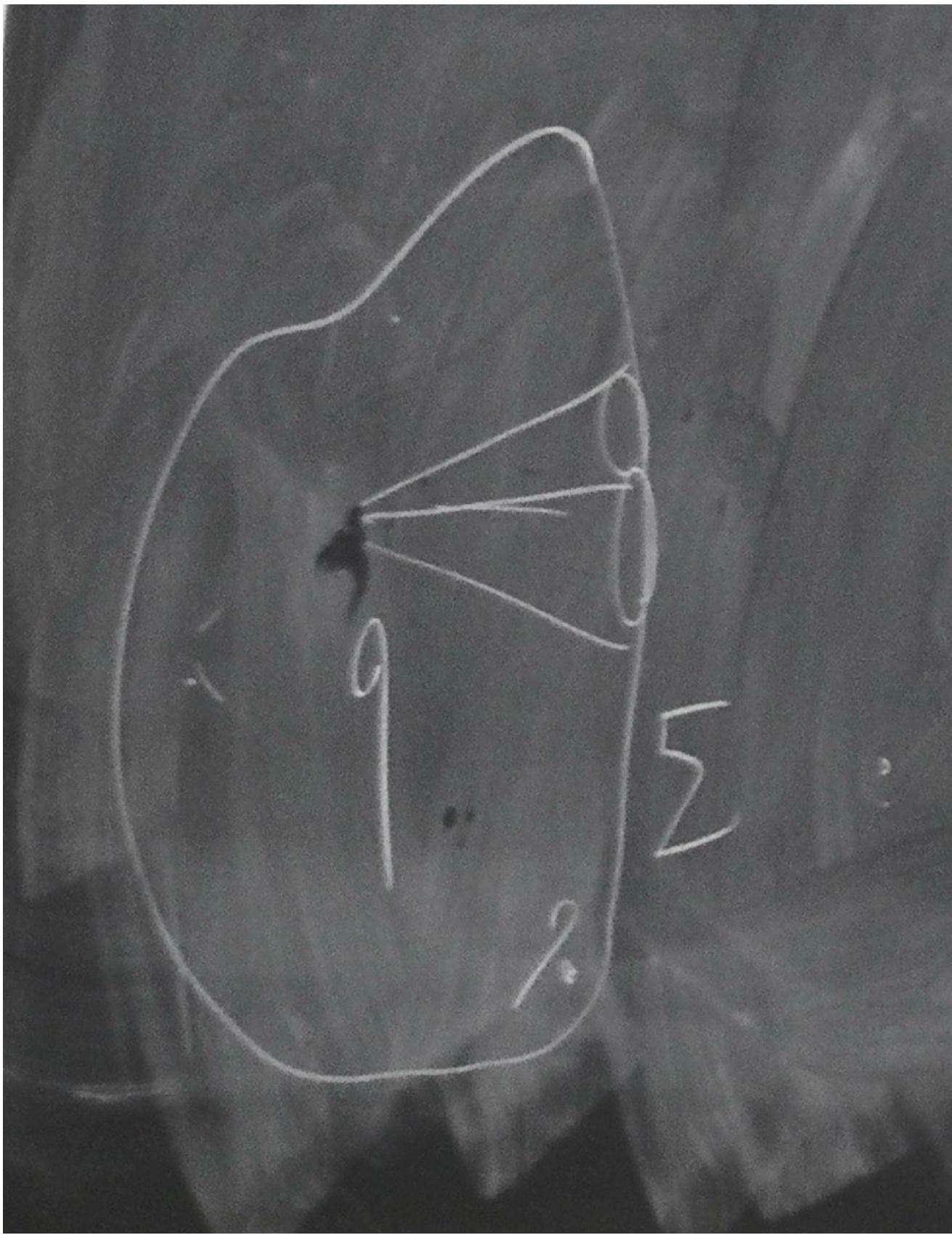
cioè

$$\frac{\hat{c}}{R} = \frac{2\pi\alpha}{\alpha}$$

ottenendo

$$\Omega_{TOT} = \frac{S}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi$$

### Teorema delle superfici di Gauss



$$\Phi_{\Sigma}(\vec{E}) = \int d\Phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} = \int d\omega = \frac{q}{\cancel{4\pi}\epsilon_0} \cdot \cancel{4\pi} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

cioè

$$\Phi(\vec{E}) = \frac{\sum_i q_i}{\epsilon_0}$$

Si basa sulla definizione di interno ed esterno.

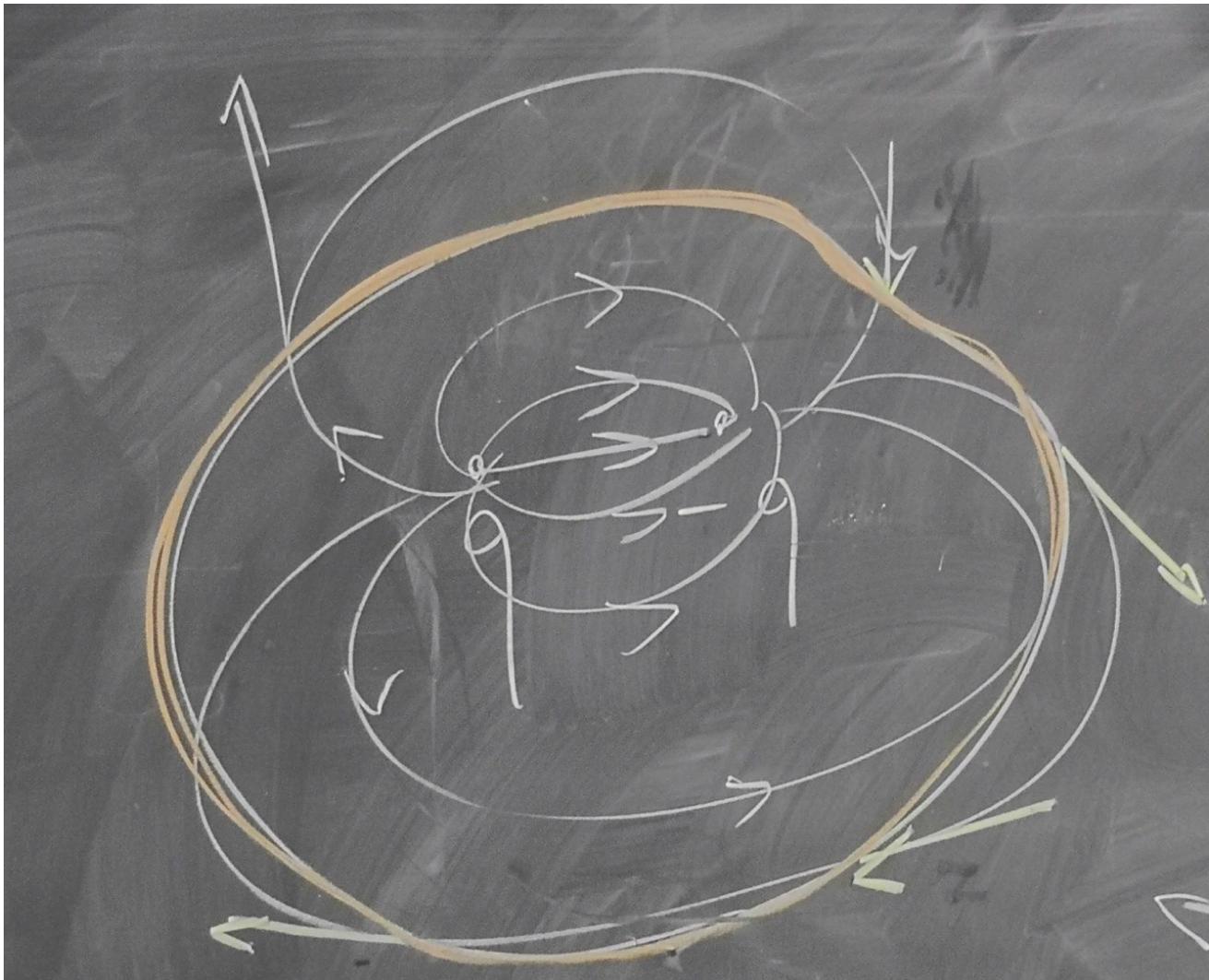
Vale cioè solamente sulle **superficie chiuse**.

Osservazioni:

1. Il teorema non parla della superficie, posso prendere qualsiasi tipo!
2. **Non devo specificare il raggio della sfera!** (il Flusso rimane lo stesso)
3. Il teorema non dipende dalla posizione della carica.
4. I campi sono sommabili, se avessi più cariche prendo la somma delle singole cariche!

Il flusso del campo elettrico dipende solo dall'angolo solido!

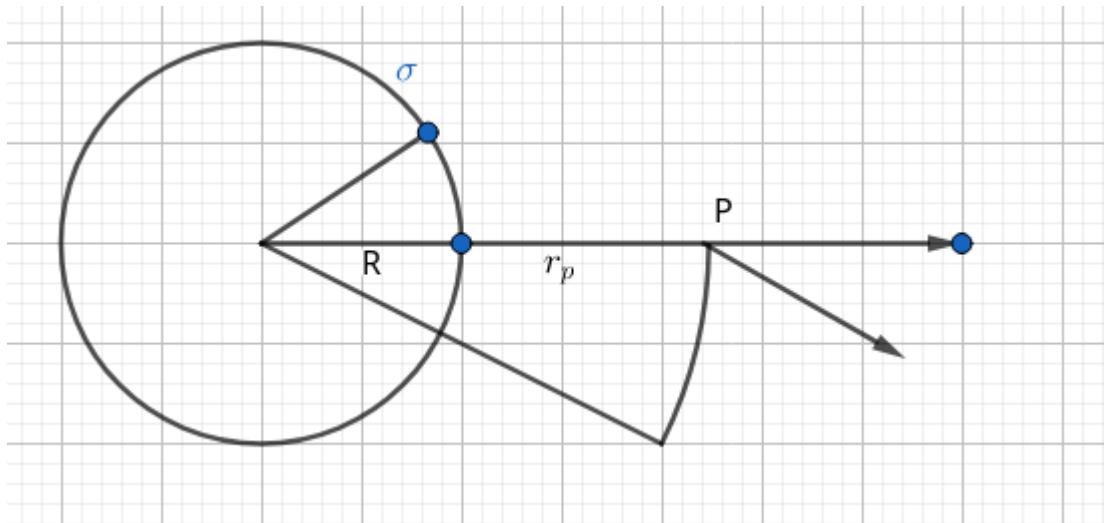
Esempio



I singoli contributi non saranno zero, il campo non è zero sulla superficie!

Esercizio

Quanto vale il campo elettrico in funzione della posizione?



$$\vec{E}(\vec{r}) = ?$$

Noto che il problema è puramente radiale.

Prendo un punto P a caso, sarà a distanza  $r_P$

otteniamo con il teorema di gauss

La fisica mi dice che

$$\Phi_{S_D}(\vec{e}) =^{phys} \frac{q}{\epsilon_0}$$

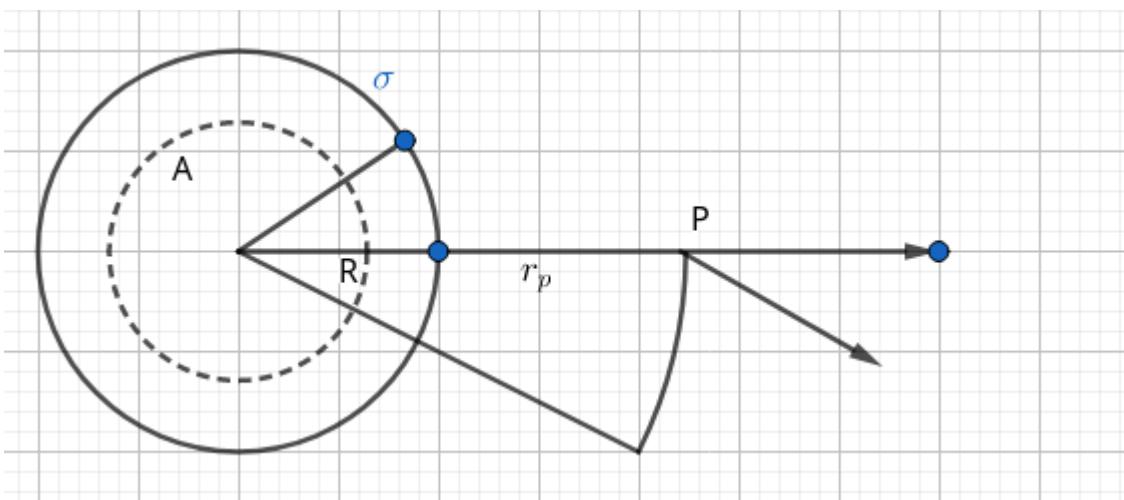
La matematica mi dice che

$$\Phi(\vec{e}) = E4\pi r_p^2$$

ed ottengo

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_p^2}$$

Ma è uguale alla carica puntiforme! Però questo non vale in un caso generico. Infatti se assumo di avere una circonferenza dentro, abbiamo tutte le cariche all'esterno. Quindi la nostra A avrà  $E = 0$ . In specifico:



La fisica mi dice che

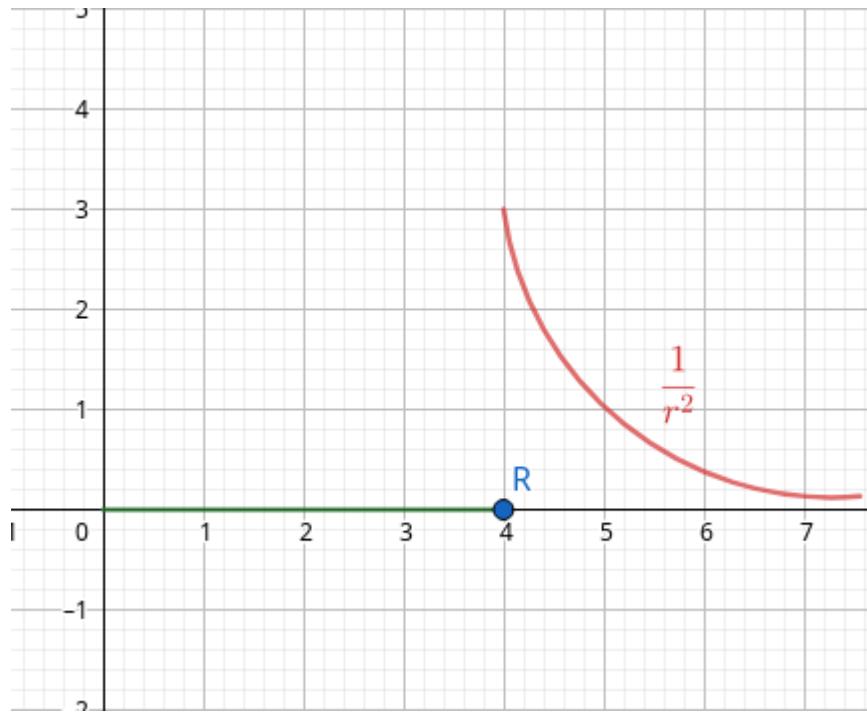
$$\Phi_{S_A}(\vec{e}) =^{phys} 0$$

La matematica mi dice che

$$\Phi(\vec{e}) = E4\pi r_A^2$$

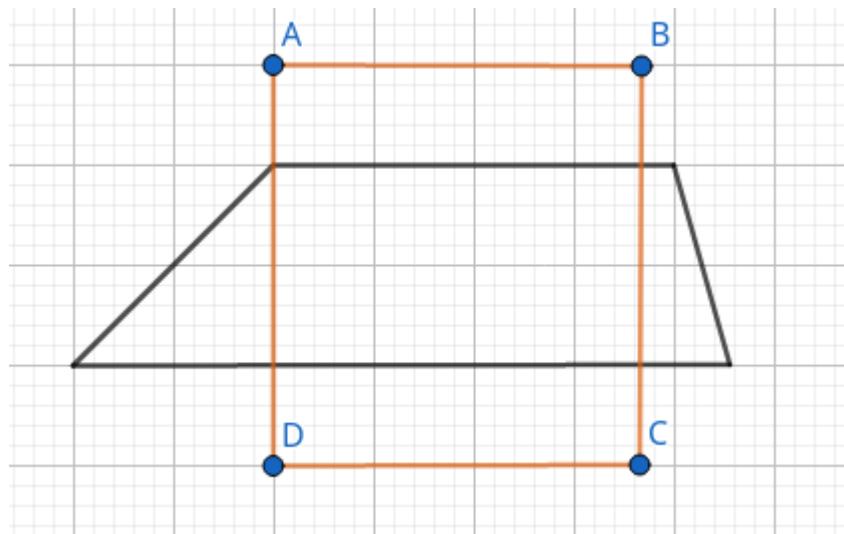
ed ottengo

$$E = 0$$



06/05/2019

### Esempio uno



$$\Gamma(\vec{E}) = 0$$

$$\Phi(\vec{E}) = \frac{q_{int}}{\epsilon_0}$$

Come varia il campo elettrico al variare della superficie?

ho  $\sigma(x, y, z)$  e  $\vec{r} = (x, y, z)$

Ho che  $\bar{A}B = \bar{C}D$

$$\bar{B}C = \bar{D}A << \bar{A}B$$

$$\bar{B}C = o(\bar{A}B)$$

come sappiamo il campo elettrico che è in un punto è la somma dei campi che esercitano in quel punto.

ottengo la circuitazione

$$\Gamma_{\square}(\vec{E}) = \oint_{\square} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \vec{E}_2 \cdot \overrightarrow{AB} + \cancel{(\vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1) \cdot \overrightarrow{BC}} + \\ \vec{E}_1 \cdot \overrightarrow{CD} + \cancel{(\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2) \cdot \overrightarrow{DA}}$$

Li cancello perchè sono infinitesimali!

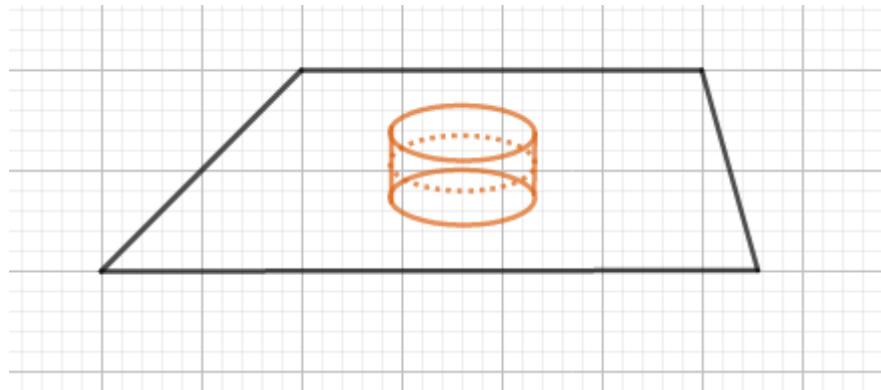
ottengo

$$\Gamma(\vec{E}) = 0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = E_{2t} - E_{1t} = 0 \Rightarrow E_{2t} = E_{1t}$$

cioè il campo elettrico non varia, è conservativo

## Esempio due

Abbiamo un cilindro



$$\Phi_{cyl} \vec{E} = \vec{E}_2 \cdot \hat{n}_2 S + \cancel{(\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2) \cdot \hat{n}_2 S_2} + \\ + \vec{E}_1 \hat{n}_1 S = (E_{2n} - E_{1n})S$$

Posso rimuovere anche qui perchè è infinitesimale.

Ottengo dunque che

$$\Phi \vec{E} = \frac{q_{int}}{\epsilon_0} \Rightarrow E_{2n} - E_{1n} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Campo elettrico varia di  $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$

Unendo questi due otteniamo

$$\begin{cases} \Gamma(\vec{E}) = 0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = E_{2t} - E_{1t} = 0 \Rightarrow E_{2t} = E_{1t} \Rightarrow \vec{E}_2 - \vec{E}_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \\ \Phi \vec{E} = \frac{q_{int}}{\epsilon_0} \Rightarrow E_{2n} - E_{1n} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \end{cases}$$

con  $n > \epsilon_0$

*correzione esercizio per casa che mi sono perso*

## Campo elettrico di un piano indefinito di carica

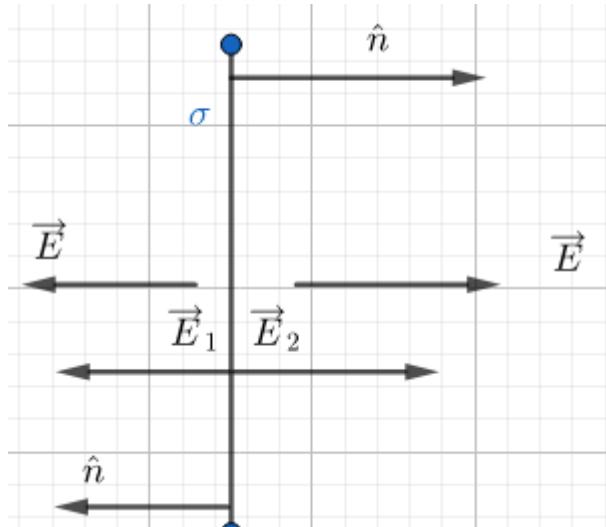
Come fa il campo elettrico nello spazio?

$$\vec{E}(\vec{r}) = ?$$

**Q: Posso assumere di avere distanza infinita ?**

A:  $\frac{L_P}{d}$  quindi ogni punto sarebbe uguale all'altro se avessi distanza infinita.

Avendo una piana di carica positiva, il campo elettrico infinito sarà così



$$\vec{E}_2 - \vec{E}_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n}_2$$

$$\vec{E}_2 - (-\vec{E}_2) = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n}_2 \Rightarrow \vec{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{n}$$

Dato che il piano è infinito, non si ha una dipendenza dalla distanza, infatti  $\frac{\infty}{d=1m} = \infty$

come  $\frac{\infty}{d=1GPa} = \infty$

## Conduttori

**Conduttore:** Materiale sul quale un certo tipo di elettrone può muoversi liberamente.

1. Se un conduttore è neutro la somma delle cariche fa zero.
2. Se ho un conduttore all'equilibrio allora ho le cariche ferme
3. Se le cariche sono ferme, nessuna di loro subisce forze, di nessun tipo, nemmeno elettriche.

Se ho o meno le cariche all'interno non mi interessa perché influiscono solo quelle esterne.

$$\vec{E}_{int} = \vec{0}$$

### Induzione

Se ho una barra conduttore, dentro è zero e tutte le cariche sono negative all'esterno. Se una carica si depositasse all'interno, dovrebbe agire in base al campo elettrico sul bordo.

Se ho una penna bic, la carico sfregandola su una maglietta, non essendo conduttore (plastica) si piazzano tutte all'esterno!

Appena lo avvicino alla mia barra conduttore **induco un moto di cariche**.

**L'induzione** è dunque l'indurre un moto di cariche tra qualcosa a qualcos'altro.

*Le cariche negative vanno al contrario della freccia che creiamo*

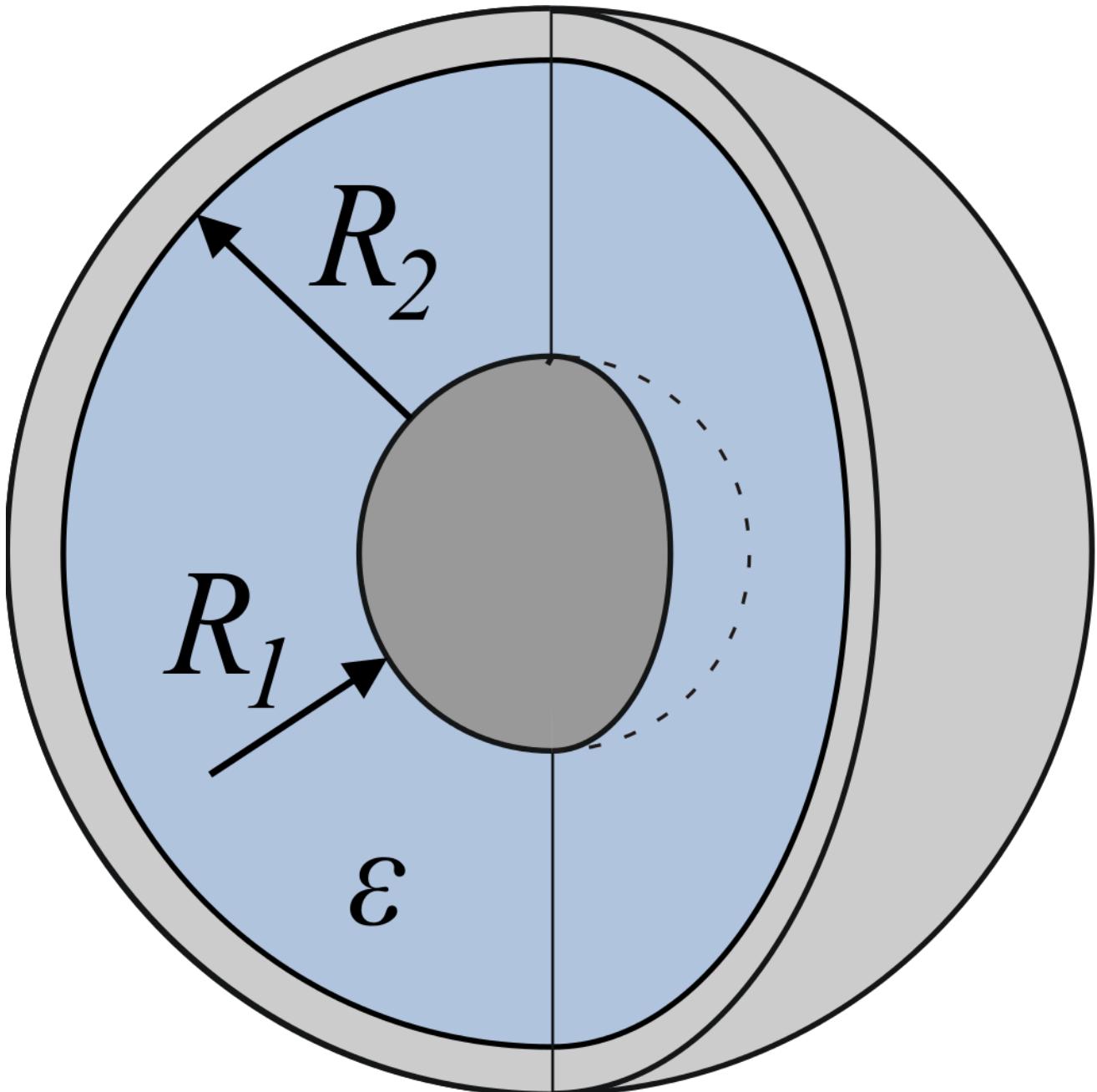
### Induzione Completa

Supponiamo di avere due conduttori

una sfera ed una sfera che la "abbraccia".

La sfera interna è carica positivamente, la sfera esterna si caricherà negativamente.

( Vedi immagine: condensatore sferico)

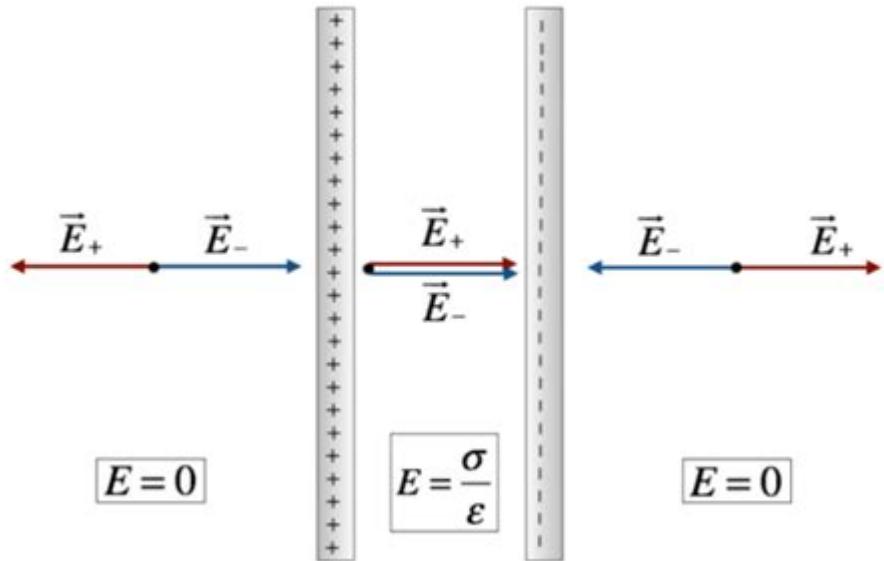


Ho dunque un caso di induzione **completa** tra i conduttori, perchè TUTTE le linee di un conduttore vengono intercettate dall'altro. Tutte le linee di campo che escono da uno dei due conduttori viene intercettato dall'altro.

Se avvicinassi la sfera carica positivamente ad un conduttore, **avrò un ammasso di cariche negative dalla parte più vicina alla sfera**, perchè le linee di campo della sfera caricata positivamente.

Se avessi due linee di campo , una positiva ed una negativa, quella negativa intercetterebbe quasi tutte le linee di campo delle positive.

*Questo perchè si annullano a vicenda .(vedi immagine: condensatore piano)*



*Non ci soffermiamo sugli effetti di bordo.*

La superficie di un conduttore è **equipotenziale** cioè sempre costante.

$$E = 0 = -\frac{dV}{dr} \Rightarrow V = \text{costante}$$

Più carica verso e più il potenziale della sfera **aumenta**. Per il principio di **sovraposizione** posso calcolare ogni punto di carica della sfera.

### Capacità

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$udm[C] = \frac{1C}{1V} = 1F \text{ un farad.}$$

Un farad è grandissimo. Infatti si utilizza spesso pico/nano/femto/micro-Farad.

Se abbiamo un sistema in induzione completa, la capacità è data da due conduttori

$$C = \frac{Q}{V_2 - V_1}$$

### Esempio

Due armature quadrate

$$S = 1m^2$$

$$d = 1mm$$

$$E = \frac{10KV}{m}$$

$$C = 8,85 \cdot 10^{-9} F$$

Calcolare la carica delle armature.

(Si trovano in vuoto/aria).

## Calcolo Q

$$Q = C\Delta V$$

$C$  ce lo fornisce il problema, calcolo  $\Delta V = E \cdot d$

$$Q = CEd = 8,85 \cdot 10^{-9} F \cdot 10^4 \cdot 10^{-3} c$$

$$\text{Ottenendo } Q = C\Delta V = 8,9 \cdot 10^{-8} c$$

### Osservazioni:

1. Un condensatore mi serve per portarmi in giro energia.
2. Per caricarlo devo fare del lavoro, per colpa della differenza di potenziale.

## 10/05/2019

### Corollari

$$\vec{E} = \vec{O} \text{ all'interno}$$

Posso immaginare che tutte le cariche siano appoggiate all'esterno.

Non è vero che dentro il campo è nullo, però stiamo guardando macroscopicamente.

*la materia è vuota, abbiamo molta distanza (relativamente alla grandezza usata) tra nucleo ed elettroni*

**Corollario** (del fatto che il campo è zero all'interno, macroscopicamente parlando)

1. Il campo è zero perchè alla fine consideriamo statico.

$$\Phi_{\Sigma}(\vec{E}) = {}^{MATH} \oint_{\Sigma} \vec{E} \cdot \hat{n} d\Sigma = 0 \text{ perchè } \vec{E} = \vec{O} \text{ mentre } = {}^{PHYS} \frac{q_{int}}{\epsilon_0}$$

2. Le superfici dei conduttori sono equipotenziali:

$P_1, P_2 \in \text{conduttore}$

$$V(P_1) - V(P_2) = - \oint_{P_1}^{P_2} \vec{E}_{int} \cdot d\vec{l} = 0 \text{ sempre perchè } \vec{E}_{int} = \vec{O}$$
$$\Rightarrow V(P_1) = V(P_2)$$

3. Ho più carica concentrata sui punti di curvatura minore che su un'area più vasta. (effetto punta)

$$\vec{E}_{ext} \neq \vec{O}$$

$$\vec{E}_{int} = \vec{O}$$

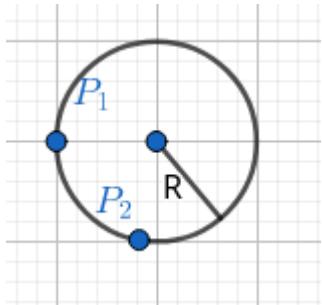
$$\vec{E}_{ext} - \cancel{\vec{E}_{int}} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{u}_n$$

Tutta la carica va a distribuirsi nei carichi di curvatura minore perchè devono avere la stessa differenza di potenziale.

Vale solo se i punti sono interni

## Osservazioni sulla capacità

$$C = \frac{q}{V}$$



Calcoliamo la capacità della sfera

$$V(P) - V(+\infty) = - \int_{+\infty}^{r_p=R} \vec{E} \cdot d\vec{r} = + \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_R^{+\infty} \frac{1}{r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{R}$$

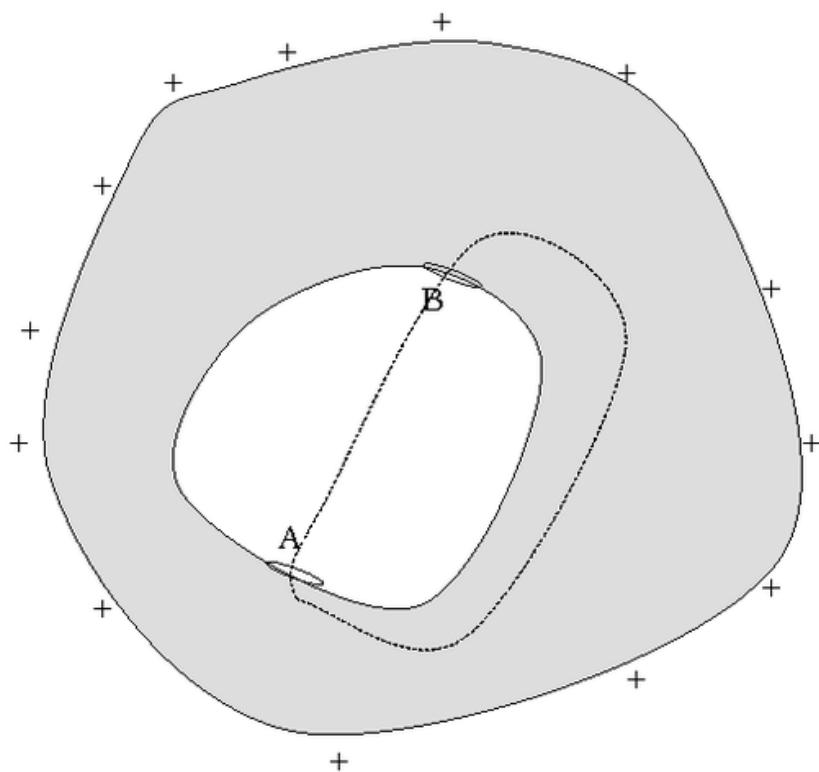
Ottengo

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R} \Rightarrow C = \frac{q}{V} = 4\pi\epsilon_0 R$$

1. La capacità non dipende dalla carica che mettiamo
2. Dipende dal corpo, dalla sua geometria (quanto è grande)
3. Dipende dal materiale (dato da  $\epsilon$ )

## Conduttore cavo

immagino che il mio conduttore sia cavo



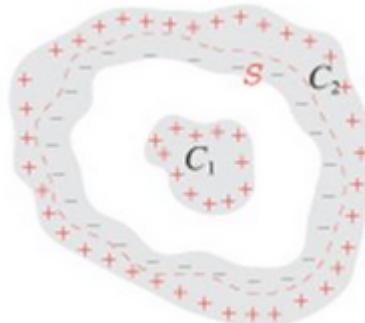
Ho un campo elettrico, dalle cariche + alle cariche -, con la circuitazione del campo elettrico (= 0 perché il campo è conservativo)

Avendo due tratti, *I* non nel campo, mentre *II* nel campo.

~~$$\int_I \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_{II} \vec{E} \cdot d\vec{l} \neq 0$$~~

Se sulla superficie interna di un conduttore ci fosse carica violerebbe la circuitazione! quindi anche se faccio una cavità non posso avere cariche nella cavità interna!

### Schermatura e induzione completa(cavo dentro cavo)



$$\Phi_{\Sigma}(\vec{E}) = ^{MATH} \oint_{\Sigma} \vec{E} \cdot \hat{n} d\Sigma = 0 \text{ perché } \vec{E} = 0 \text{ mentre } = ^{PHYS} \frac{q_{int}(\Sigma)}{\epsilon_0}$$

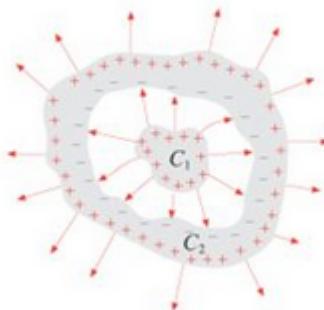
Ma ho un problema, perché ho un campo dentro.

La carica si dispone in base alla curvatura.

Ma posso affermare che la carica negativa è nella parte interna del  $C_2$ !

Ottengo una **induzione completa**!

Quindi ho un campo anche interno del conduttore cavo, se ho un altro conduttore dentro.



Qualsiasi cosa io faccia sul conduttore dentro, non è percepibile da fuori.

**Q:Cosa succede se tolgo/metto carica all'esterno?**

A: Niente.

Creo uno **schermo elettromagnetico** o **gabbia di faraday**

Non è possibile far penetrare informazioni dall'interno all'esterno.

**Q:Cosa succede se sposto il tutto in una zona con una fortissima carica?**

A: Viene variato solo il campo del conduttore esterno..

*Non è possibile far penetrare informazioni dall'interno all'esterno.*

**Q:Cosa succede se li faccio toccare?**

A: All'interno cambia il campo, all'esterno non succede niente.

## Protezione dagli sbalzi

Immagino di avere un pezzo molto importante di un circuito. Se ho uno sbalzo di tensione, dovrei essere capace di proteggermi per evitare che si fulmini.

Ad esempio ho due chip collegati con differenza di potenziale rispettivamente  $8v$  e  $5v$

il primo va da  $0 - 8$  il secondo va da  $0 - 5$

Ma non è detto che lo veda alla stessa potenza, perché lo zero del primo potrebbe essere un  $40v$  del secondo!

Collegando a massa("a terra"), cioè ad un conduttore comune, ho lo stesso **zero** per tutti.

**Q: E se il conduttore che ci attacco è più grande?**

A: la carica si sposta su quello più grande!

**Q: E se il conduttore che ci attacco è la terra?**

A: In quel caso la carica esterna sul mio primo conduttore è quasi nulla!

Questa è la famosa **messa a terra**, fa in modo che il riferimento di potenziale sia **stabile** e non cambia.

**Q: Ma se la carica esterna va tutta sulla terra, la carica interna cosa fa?**

A: niente. La carica interna è schermata da quella esterna.

## Condensatore piano

$$C = \frac{q}{V_2 - V_1} = \frac{q}{\Delta V}$$

$$C_{piano} = \frac{q}{\Delta V} = \epsilon_0 \frac{\Sigma}{h}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$\Delta V = Eh = \frac{\sigma h}{\epsilon_0}$$

Cresce al diminuire della distanza Dipende dal materiale

## Condensatore sferico

$$\Delta V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] \text{ cioè } [V_1 - V_2]$$

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}$$

$$\lim_{R_2 - R_1 \rightarrow 0} C_{sphere} = C_{piano}|_{\Sigma=4\pi R^2 r} \quad h=\epsilon$$

## Condensatore cilindrico

$$\vec{E} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \hat{u}_r$$

$$\Delta V = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

cioè

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 d}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

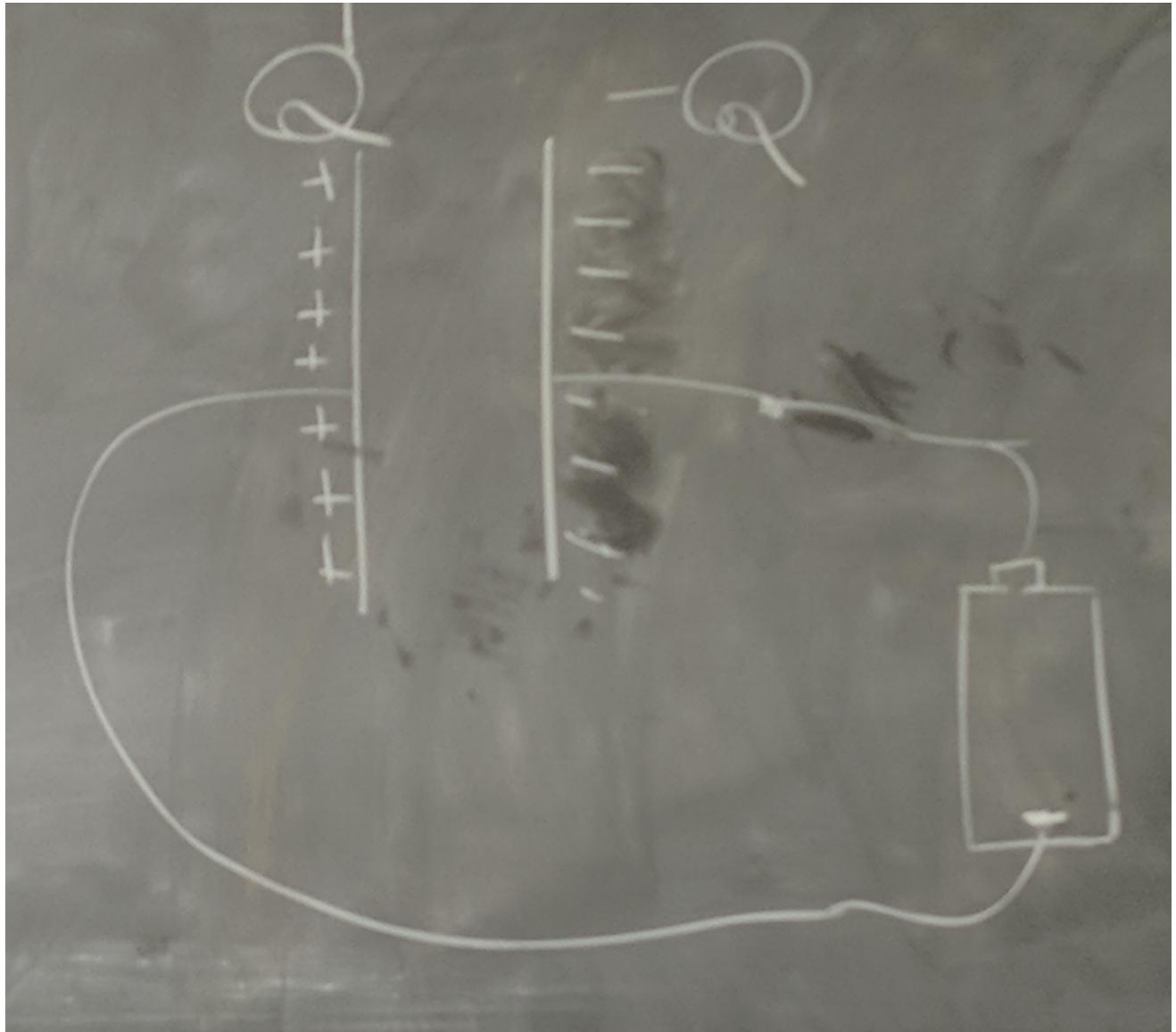
# 13/05/2019

## Energia immagazzinata in un condensatore

Per muovere una carica all'interno di un campo elettrico

$$dW = q\vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Ho un condensatore inizialmente scarico, un interruttore che sta tra il condensatore e la batteria.



La capacità del condensatore ricordiamo che è

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

$$Q = C \cdot \Delta V$$

Appena clicchiamo sull'interruttore, la prima carica si muove.

Quando parte il secondo elettrone, va ad agire in un sistema **non più privo di cariche**.

Essendo come già una, incontra un campo. Per spostare la seconda, devo effettuare del **lavoro**.

Per la terza ancora più lavoro della seconda.

Dobbiamo agire contro il campo elettrico formatosi.

Provo a calcolarmelo

$$\Delta V = E \cdot h$$

$$dW = \cancel{\frac{q \cdot E dl}{}} = dqE \cdot h = dq\Delta V = dq \frac{q}{C}$$

$$W|_0^Q = \int_0^Q q dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} =_{(1)} \frac{1}{2} C(\Delta V)^2 = \frac{1}{2} Q \Delta V$$

Questa è la carica nel mio condensatore.

Ora taglio il cavo agli estremi del condensatore.

Il condensatore **conterrà energia** sotto forma di lavoro utilizzato per caricarlo.

$$U = W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Se ci aggiungo **un led, il led si accende.**

$$U = \frac{1}{2} C(\Delta V)^2 = \frac{1}{2} C \cdot E^2 \cdot h^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{\Sigma}{\lambda} E^2 h \cancel{A}$$

Sappiamo che  $\Sigma \cdot h = V$  volume

otteniamo, come risultato generale

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 V \Rightarrow u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

Sottolineo:

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

In quel punto ho una densità di energia proporzionale al quadrato di  $E$

Abbiamo energia ovunque!

Questa energia è immagazzinata dallo spazio tempo. È ovunque. La luce e tutti i vari tipi, è energia, quindi anche le onde elettromagnetiche. Portano energia.

Solo per il fatto che ci sia luce, ho un campo elettrico, quindi ho energia.

## Esercizio

Le cariche sono sulla superficie

$$R = 10^{-15} m$$

$$q = 1e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

$$r \geq R$$

questa è la quantità di energia che un protone immette nell'universo.

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \right)^2 = \frac{1}{32\pi^2\epsilon_0} \frac{e^2}{r^4}$$

$$U = \int_R^{+\infty} d\tau u = \int_R^{+\infty} 4\pi r^2 dr \frac{1}{32\pi^2\epsilon_0} \frac{e^2}{r^4} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \int_R^{+\infty} dr \frac{1}{r^2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0}$$

$$\text{big}[\frac{1}{2}\big]_R^{+\infty} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 R}$$

**Osservazioni:**

L'elettromagnetismo non funziona per le cariche puntiformi, avrei energia infinita su un punto!

La carica positiva e la carica negativa **forniscono lo stesso contributo**, avendo il quadrato.

## Esercizio generico

1

Condensatore piano

$$F = -\frac{dU}{dx}$$

condensatore collegato ad un generatore  $U =_{\Delta V = \text{costante}} \frac{1}{2}C(\Delta V)^2 = \frac{1}{2}\epsilon_0 \frac{\Sigma}{x}(\Delta V)^2 \Rightarrow F = -\frac{dU}{dx} = \frac{1}{2}\epsilon_0 \frac{\Sigma}{x^2}(\Delta V)^2$

Condensatore Isolato  $U =_{q=\text{costante}} \frac{1}{2} \frac{Q^2}{2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 \Sigma}} x \Rightarrow F = \frac{-dU}{dx} = -\frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 \Sigma}$

2

Un condensatore piano è composto da due armature

All'interno del condensatore ho un materiale dielettrico con costante 2 che lo riempie completamente

$$C = 1pF$$

$$\Sigma = 1mm^2$$

$$h = ?$$

$$\epsilon_r = 2$$

Calcola  $h$ .

$C = \epsilon_0 \frac{\Sigma}{h}$  è generale, nel nostro esempio con il materiale scelto:

$$C = \epsilon \frac{\Sigma}{h} \text{ con } \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \text{ (definizione)}$$

$$C = \epsilon \frac{\Sigma}{h} \Rightarrow h = \frac{\epsilon \Sigma}{C} = \frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-6}}{10^{-12}} m = 17,7 \mu m$$

3

Sull'oggetto precedente, viene immagazzinata una carica  $Q = 10\mu C$

Calcolare  $u = ?$  e  $U = ?$

$$u = \frac{1}{2}\epsilon E^2$$

mi calcolo  $E = \frac{\Delta V}{h}$  = so che  $\Delta V$  lo ottengo da  $C = \frac{Q}{\Delta V}$

quindi

$$E = \frac{\Delta V}{h} = \frac{Q}{Ch} = \frac{Q}{\epsilon \frac{\Sigma}{h}} = \frac{Q}{\epsilon \Sigma}$$

Non dipende da  $h$ .

Tornando a  $u$

$$u = \frac{1}{2}\epsilon E^2 = \frac{1}{2}\epsilon \left(\frac{Q}{\epsilon \Sigma}\right)^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon \Sigma^2} = \frac{10^{-10} \cdot C^2}{2 \cdot 2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-12} C^2} \frac{J}{m^3} = 3 \frac{10^{-12}}{10^{-12} \cdot 10^{-12}} \frac{J}{m^3} \simeq 3 \cdot 10^{12} \frac{J}{m^3}$$

Ho una distanza molto piccola, per quello ho così tanta energia!

**ATTENZIONE A NON USARE LA FORMULA DEL PUNTIFORME**, non vale qui.

quindi abbiamo

$$u = 3 \cdot 10^{12} \frac{J}{m^3}$$

$U = \dots = 53J$  (*non ho fatto in tempo a copiarla, ma basta applicare la definizione di  $U$* )

**4**

Sull'es precedente, calcolare il campo

$$E = \frac{\Delta V}{h} = \frac{\frac{Q}{C}}{h} = \frac{10 \cancel{V} C}{1pF17,7 \cancel{m}} = 6 \cdot 10^{11} \frac{V}{m}$$