

# Fisica I

Luca Seggiani

1 maggio 2024

## 1 Introduzione al corso

*"Che cos'è la fisica?"* La fisica è la disciplina che si occupa della descrizione quantitativa dei fenomeni naturali. Fondamentale alla fisica è il metodo scientifico, che si applica attraverso:

- Osservazione del fenomeno
- Realizzazione di misure
- Formulazione di un'ipotesi
- Sperimentazione dell'ipotesi
- Formalizzazione di una teoria (o formulazione di una nuova ipotesi)

per la realizzazione di misure, è necessaria la scelta di apposite:

## 2 Unità di misura

Le unità di misura permettono di confrontare grandezze fisiche a campioni scelti prima della misurazione. Si possono fare le seguenti distinzioni:

### **Grandezze scalari e vettoriali**

- Grandezze scalari: grandezze che possono essere rappresentate da semplici numeri reali (e.g. temperatura, massa, tempo...)
- Grandezze vettoriali: grandezze che vengono rappresentate da vettori sul piano o nello spazio (e.g. spazio, accelerazione, forza...)

### Grandezze intensive ed estensive

- Grandezze intensive: grandezze che non dipendono dall'estensione fisica di un corpo ma dalle proprietà delle sostanze che lo compongono
- Grandezze estensive: grandezze che dipendono dall'estensione fisica di un corpo

### Grandezze fondamentali e derivate

- Grandezze fondamentali: grandezze che vengono definite indipendentemente da altre
- Grandezze derivate: grandezze che si definiscono sulla base delle grandezze fondamentali

Le grandezze fondamentali (e le loro unità di misura nel S.I.) sono:

Grandezza	U. D. M.	Simbolo
Spazio	Metro	m
Massa	Kilogrammo	kg
Tempo	Secondo	s
Temperatura	Kelvin	K
Intensità di corrente	Ampere	A
Intensità luminosa	Candela	Ca
Quantità di materia	Mole	mol

## 3 Analisi dimensionale

In fisica le equazioni devono essere dimensionalmente coerenti, ovvero le grandezze espresse in entrambi i lati dell'equazione devono essere omogenee fra di loro (avere la stessa unità di misura). Per verificare la correttezza di un'equazione si può effettuare l'analisi dimensionale, ad esempio:

$$x = \frac{1}{2}at^2$$

(spostamento  $x$  di un corpo sottoposto ad accelerazione  $a$  in tempo  $t$ ) diventerà:

$$[L] = \frac{[L]}{[t^2]}[t^2]$$

che è chiaramente vero.

(Nota: i coefficienti dei termini non figurano nell'analisi dimensionale)

## 4 Errori, precisione ed accuratezza

L'errore misura la discrepanza fra la grandezza effettiva che vogliamo misurare e il valore restituito dallo strumento di misura utilizzato. Esempio: un righello con riportati centimetri e millimetri restituirà valori del tipo:  $15.2\text{cm} \pm 1\text{mm}$ , ovvero 15 centimetri e 2 millimetri con un'errore di 1 millimetro.

Di una misurazione ottenuta da uno strumento possiamo conoscere la precisione e l'accuratezza:

- Accuratezza: L'accuratezza di una misura rappresenta la differenza (quindi l'errore) fra la misura e la grandezza effettiva
- Precisione: La precisione di una misura è data dal numero delle sue cifre significative

Le comuni operazioni algebriche modificano la precisione di una misura in tale modo:

- Somma / Differenza: La precisione di una somma o una differenza è data dal numero minore di posizioni decimali occupate degli operandi
- Prodotto / Rapporto: La precisione di un prodotto o di un rapporto è data dal numero minore di cifre significative degli operandi

## 5 Sistemi di riferimento

Criterio generale per la scelta di un sistema di riferimento è la semplicità (ad esempio, è conveniente scegliere sistemi con basi fra loro ortogonali e levogiri). Vediamo alcuni esempi di sistemi di riferimento comuni su una retta, su curve parametriche, sul piano e nello spazio:

## 6 Sistemi di riferimento monodimensionali

Su una determinata retta  $r$ , è sufficiente scegliere un'origine  $O$  e una direzione di scorrimento della retta. Avremo quindi:

$$P(x)$$

sulla singola coordinata  $x$  per indicare qualsiasi punto su  $r$ . Il concetto si estende facilmente a curve parametriche di qualsiasi tipo, assumendo la nostra coordinata (adesso  $t$ ) come fattore di scorrimento sulla curva ( $C$ ):

$$C(t) = (C_x(t), C_y(t), C_z(t))$$

## 7 Sistemi di riferimento bidimensionali

Su un piano possiamo definire i due sistemi di riferimento comuni:

- Coordinate cartesiane: individuo univocamente ogni punto con una coppia ordinata  $(x, y)$  (ascissa e ordinata)
- Coordinate polari: allo stesso modo, individuo ogni punto con l'angolo  $\theta$  all'origine e la distanza  $\rho$  dalla stessa.

Si può agilmente passare da coordinate cartesiane a polari e viceversa in questo modo:

- Polari  $\rightarrow$  cartesiane: notato che  $\rho$  è l'ipotenusa di un triangolo rettangolo di angolo  $\theta$ , ho;

$$x = \rho \cos \theta \quad y = \rho \sin \theta$$

- Cartesiane  $\rightarrow$  polari: ottengo  $\rho$  con pitagora:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$$

e  $\theta$  applicando:

$$\theta = \arctan \frac{y}{x}$$

ricordando il quadrante di appartenenza di  $(x, y)$  (l'inversione di  $\tan(x)$  comporta la restrizione del dominio a  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ )

## 8 Sistemi di riferimento tridimensionali

Come per i sistemi bidimensionali, in 3 dimensioni abbiamo:

- Coordinate cartesiane: individuo univocamente ogni punto con una tripla ordinata  $(x, y, z)$  (asse x, y, e z)
- Coordinate cilindriche: come per le coordinate polari, definisco un  $r > 0$  distanza dall'origine, un'angolo  $\theta$  sull'asse z, e un'elevazione  $z$  sempre sull'asse z, ottenendo la tripla  $(r, \theta, z)$ . Posso convertire agevolmente in coordinate cartesiane attraverso:

$$x = r \cos \theta \quad y = r \sin(\theta) \quad z = z$$

e viceversa:

$$z = z \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \theta = \arctan \frac{y}{x}$$

- Coordinate sferiche: questa volta scelgo due angoli,  $\phi \in [0, 2\pi]$  sull'asse  $z$  e  $\theta \in [0, \pi]$  sulla perpendicolare del segmento che forma angolo  $\phi$  con l'asse  $x$  (che deciderà l'elevazione del punto), e sempre una distanza  $r$  dall'origine. Questa volta dovrò usare le formule di conversione:

$$z = r \cos \theta \quad x = r \sin \theta \cos \phi \quad y = r \sin \theta \sin \phi$$

e viceversa:

$$\cos \theta = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad \tan \phi = \frac{y}{x}$$

Si può notare che questo sistema è lo stesso delle coordinate geografiche, sebbene con intervalli di angoli differenti:

- la longitudine corrisponde a  $\phi$  con  $\phi \in [-180^\circ, 180^\circ]$ , mentre la latitudine corrisponde a  $\theta$  con  $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$

## 9 Sommatorie ed integrali di vettori

Notiamo brevemente la differenza fra le forme:

$$(1) \quad \left| \sum_{i=1}^n \vec{l}_i \right| \quad \text{e} \quad (2) \quad \sum_{i=1}^n |\vec{l}_i|$$

con  $\vec{l}_i$  un'insieme di vettori in un determinato spazio. Se la forma (1) tiene conto solamente della somma finale dei vettori (prendi e.g. la posizione di un corpo traslato dai suddetti), la forma (2) restituisce invece la somma di ogni singolo vettore, qualsiasi la sua direzione. Allo stesso modo, su profili (prendo  $y_1$ ) non discreti:

$$(3) \quad \left| \int_{y_1} d\vec{l} \right| \quad \text{e} \quad (4) \quad \int_{y_1} |d\vec{l}|$$

la forma (3) restituisce la sola somma integrale dei differenziali  $d\vec{l}$ , mentre la forma (4) considera lo spostamento (in qualsiasi direzione) totale di  $\vec{l}$ .

## 10 Prodotto scalare e prodotto vettoriale

Si riportano adesso le formule per il prodotto scalare e il prodotto vettoriale ottenute sfruttando i versori  $\hat{i}$ ,  $\hat{j}$  e  $\hat{k}$ . prenderemo in esame due vettori,  $a = (a_x, a_y, a_z)$  e  $b = (b_x, b_y, b_z)$ .

### Prodotto scalare

$$\begin{aligned}(\hat{i}A_x + \hat{j}A_y + \hat{k}A_z) \cdot (\hat{i}B_x + \hat{j}B_y + \hat{k}B_z) = \\(\hat{i})^2 A_x B_x + \hat{i}\hat{j}A_x B_y + \hat{i}\hat{k}A_x B_z + \\ \hat{j}\hat{i}A_y B_x + (\hat{j})^2 A_y B_y + \hat{j}\hat{k}A_y B_z + \\ \hat{k}\hat{i}A_z B_x + \hat{k}\hat{j}A_z B_y + (\hat{k})^2 A_z B_z\end{aligned}$$

visto che il prodotto scalare di due vettori perpendicolari (quindi di due versori diversi fra di loro) vale 0, e che il prodotto scalare di un vettore per se stesso vale se stesso al quadrato (su vettori di modulo 1), possiamo riscrivere come:

$$A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z$$

che è la definizione di prodotto scalare.

### Prodotto vettoriale

$$\begin{aligned}(\hat{i}A_x + \hat{j}A_y + \hat{k}A_z) \times (\hat{i}B_x + \hat{j}B_y + \hat{k}B_z) = \\(\hat{i})^2 A_x B_x + \hat{i}\hat{j}A_x B_y + \hat{i}\hat{k}A_x B_z + \\ \hat{j}\hat{i}A_y B_x + (\hat{j})^2 A_y B_y + \hat{j}\hat{k}A_y B_z + \\ \hat{k}\hat{i}A_z B_x + \hat{k}\hat{j}A_z B_y + (\hat{k})^2 A_z B_z\end{aligned}$$

di nuovo, visto che il prodotto vettoriale fra due vettori paralleli vale 0, e il prodotto vettoriale fra due versori unitari vale quanto il loro perpendicolare secondo la regola della mano destra in un sistema di riferimento levogiro, possiamo riscrivere come:

$$\hat{i}(A_y B_z - A_z B_y) + \hat{j}(A_z B_x - A_x B_z) + \hat{k}(A_x B_y - A_y B_x)$$

che è la definizione di prodotto vettoriale sui versori  $\hat{i}$ ,  $\hat{j}$  e  $\hat{k}$ . Si noti il fattore  $\hat{j}$ , che ha un segno negativo (distribuito sui fattori). Questo fatto viene dal sistema dalle proprietà del prodotto vettoriale su un sistema levogiro. Si ricorda inoltre una mnemonica per il prodotto vettoriale come determinante della matrice:

$$\begin{pmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{pmatrix}$$

## 11 Concetto di campo

In fisica definiamo un campo come una funzione multivariabile dallo spazio o dal piano ad un campo scalare o ad uno spazio vettoriale, rispettivamente (nello spazio):

- Campo scalare:

$$T = T(x, y, z)$$

- Campo vettoriale:

$$V = V(x, y, z) = V_x(x, y, z)\hat{i} + V_y(x, y, z)\hat{j} + V_z(x, y, z)\hat{k}$$

## 12 Introduzione alla meccanica classica

La meccanica classica è la branca della fisica che si occupa dello studio di corpi statici e in movimento, con dimensioni superiori a quelle delle particelle subatomiche e velocità non comparabili a quella della luce, (compito rispettivamente della meccanica quantistica e relativistica). Possiamo ulteriormente dividere la meccanica classica in:

- Cinematica: descrizione della traiettoria dei corpi in funzione del tempo, senza tener conto delle cause dei loro moti
- Dinamica: studio delle cause dei moti dei corpi (quindi delle forze)
- Statica: studio dell'equilibrio dei corpi in quiete.

### Il punto materiale

Il punto materiale è un'approssimazione che adottiamo nel caso in cui l'estensione dei corpi di cui parliamo sia irrilevante alla situazione che vogliamo analizzare. Un punto materiale non ha quindi estensione, ma solamente una posizione ed una certa massa (da cui la dicitura "punto di massa, *mass point*").

**Moto rettilineo** Definisco la posizione  $x$  di un corpo su una retta in funzione del tempo come:

$$x(t)$$

che prende il nome di *legge oraria* del moto. Una variazione di spazio (quindi uno spostamento) da  $x(t_2)$  a  $x(t_1)$  punti distinti nel tempo sarà quindi:

$$\Delta x = x(t_1) - x(t_2)$$

A questo punto la variazione di tempo fra  $t_1$  e  $t_2$ , noto  $t_2 > t_1$ , sarà:

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

e potrò definire la velocità media:

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t_2) - x(t_1)}{t_2 - t_1}$$

si nota che questo corrisponde di fatto a  $\tan \alpha$  con  $\alpha$  uguale all'angolo formato dalla tangente del grafico della legge oraria in un dato punto  $x_0 \in [x(t_1), x(t_2)]$ .

Si definisce poi la traiettoria di un punto materiale come il "*Luogo geometrico dei punti occupati nel tempo da un punto materiale*", ergo tutti i punti che la mia legge oraria  $x(t)$  restituisce in un dato intervallo di  $t$ .

Prendiamo adesso in esempio la legge oraria di un moto rettilineo uniformemente accelerato:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a_0 t^2$$

considerando le unità di misura di  $x_0$ ,  $v_0$  e  $a_0$ , ovvero m,  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  e  $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ , posso studiare la coerenza dimensionale:

$$[L] + \frac{[L]}{[T]}[T] + \frac{[L]}{[T]^2}[T]^2 = [L] + [L] + [L]$$

che è dimensionalmente coerente.

Adottiamo adesso alcuni degli strumenti del calcolo per ottenere da una curva continua della legge oraria (magari ottenuta dal curve-fitting di dati sperimentali), il grafico della velocità del punto materiale. Si renderà necessario un passaggio da velocità media a velocità *istantanea*, definita come la derivata della legge oraria  $x(t)$  in un dato punto  $x_0$ . Formalmente, presa la precedente definizione di velocità media possiamo dire:

$$v_x = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \rightarrow \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}$$

ovvero il limite del rapporto incrementale in un punto  $x_0 = x(t)$  su variazioni infinitesimali di  $t$ . Questo si può inoltre esprimere come:

$$v(t_0) = \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=t_0}$$

e si nota inoltre che in fisica è comune la notazione  $\dot{x}$  per le derivate.



## 13 Accelerazione media e istantanea nel moto rettilineo

Poniamoci il problema di come definire l'accelerazione media e istantanea nel moto rettilineo. Ricaviamo in modo simile a ciò che avevamo fatto per la velocità media:

$$a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = a_m = \frac{v_x(t + \Delta t) - v_x(t)}{\Delta t}$$

e quindi istantanea:

$$a_x^i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v_x(t + \Delta t) - v_x(t)}{\Delta t} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

chiaramente, l'accelerazione istantanea di un corpo non è altro che la derivata seconda della posizione di quel corpo in funzione del tempo. Si ricorda infine la notazione  $\ddot{x}$  per le derivate seconde.

Vediamo un esempio. presa la legge oraria:

$$v_x(t) = \frac{dx}{dt} = v_0 + a_0 t$$

la velocità non è costante, ma varia linearmente col tempo. Possiamo calcolare quindi l'accelerazione media come:

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}, \quad [a_m] = \frac{m}{s^2}$$

### Ricavare l'accelerazione dalla legge oraria

Se conosciamo la posizione di un corpo in funzione del tempo secondo la legge oraria  $x(t)$ , possiamo allora determinare, come prima affermato, velocità e accelerazione:

$$v = \frac{dx(t)}{dt}, \quad a = \frac{dv(t)}{dt}$$

**Ricavare la legge oraria dall'accelerazione** Possiamo svolgere l'operazione inversa attraverso l'operazione di integrale. Noto che accelerazione e velocità sono:

$$v = \frac{dx(t)}{dt}, \quad a = \frac{dv(t)}{dt}, \quad v dt = dx$$

e ho quindi per la velocità:

$$\int_{t_0}^t a_x dt' = \int_{t_0}^t \frac{dv_x}{dt'} dt' = v_x - v_{0x}, \quad v_x = v_{0x} + \int_{t_0}^t a_x dt'$$

e per lo spostamento:

$$\int_{t_0}^t v_x dt' = \int_{t_0}^t \frac{dx}{dt'} dt' = \int_{x(t_0)}^{x(t)} dx = x(t) - x(t_0)$$
$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v_x dt' = x(t_0) + \int_{t_0}^t v_x dt'$$

## 14 Moto rettilineo uniforme

Il moto rettilineo uniforme è un tipo di moto dove la velocità è costante e l'accelerazione nulla. Dalle formule precedenti, abbiamo:

$$a_x(t) = \frac{dv_x}{dt} = 0, \quad \text{da} \quad v_x = \frac{dx}{dt} = v_{0x} \quad v_{0x} dt = dx$$

$$\int_{t_0}^t v_{0x} dt' = \int_{t_0}^t \frac{dx}{dt'} dt' = \int_{x(t_0)}^{x(t)} dx = x(t) - x(t_0)$$

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v_{0x} dt' = x(t_0) + v_0(t - t_0)$$

da cui ricaviamo l'ultima formula, legge oraria del moto rettilineo uniforme.

## 15 Moto uniformemente accelerato

Dalle stesse formule precedenti, possiamo ricavare:

$$\begin{aligned}\int_{t_0}^t a_x dt' &= \int_{t_0}^t a dt' = a(t - t_0) = \int_{t_0}^t \frac{dv_x}{dt'} dt' = v_x - v_{0x} \\ v_x &= v_{0x} + a(t - t_0) \\ \int_{t_0}^t v_x dt' &= \int_{t_0}^t [v_{0x} + a(t' - t_0)] dt' = \int_{t_0}^t \frac{dx}{dt'} dt' = \int_{x(t_0)}^{x(t)} dx = x(t) - x(t_0) \\ x(t) &= x(t_0) + v_{0x}(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2\end{aligned}$$

Ricordiamo inoltre la formula utile:

$$\begin{aligned}t &= \frac{v - v_0}{a} \\ x &= x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2 = x_0 + v_0 \frac{v - v_0}{a} + \frac{1}{2}a\left(\frac{v - v_0}{a}\right)^2 \\ x - x_0 &= [\dots] = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}\end{aligned}$$

## 16 Formule del moto circolare

Riportiamo brevemente la formula del vettore  $\vec{OP}$ , raggio di angolo  $\theta$  di una circonferenza di raggio  $r$ :

$$\vec{OP} = (r \cos \theta, r \sin \theta), \quad \hat{OP} = (\cos \theta, \sin \theta)$$

troviamo adesso il vettore con la coda corrispondente alla punta di  $\vec{OP}$  tangente alla circonferenza. Iniziando dalla definizione di prodotto scalare:

$$\begin{aligned}\vec{A} \cdot \vec{B} &= |\vec{A}| |\vec{B}| \cos \theta = 0 \Rightarrow \text{ortogonale} \\ \vec{A} &= (a, b), \quad \vec{B} = (-b, a) \quad \text{o} \quad \vec{B} = (b, -a)\end{aligned}$$

## 17 Moto dei gravi

Studiamo adesso il moto dei corpi in caduta libera. Prendiamo  $g$  (accelerazione di gravità) di  $9.81 \frac{m}{s^2}$  (misurata sul  $45^\circ$  parallelo). Potremo allora definire la velocità e la legge oraria di un corpo in caduta libera come:

$$v(t) = -gt, \quad y(t) = -\frac{1}{2}gt^2$$

Poniamo di voler trovare la posizione spaziotemporale della pallina nel suo momento di quota massima. Sapendo che a quota massima  $v = 0$ :

$$v = at + v_0, \quad 0 = t^* = -\frac{v_0}{a}$$

$$y = y_0 + v_0 t + -\frac{1}{2}gt^2, \quad y_{max} = y_0 + v_0 t^* + \frac{1}{2}g(t^*)^2$$

infine, cerchiamo il tempo impiegato per tornare nella posizione di partenza :

$$t^* = \frac{-2v_0}{a}$$

## 18 Moto di un punto materiale sul piano e nello spazio

Definiamo una traiettoria (o supporto di una curva)  $r(t)$  sulle diverse componenti  $x$ ,  $y$  e  $z$ :

$$\vec{r}(t) = (x(t), y(t), z(t)) = \vec{OP}(t), \quad O, P \in \vec{r}(t)$$

a questo punto posizione, velocità ed accelerazione di un punto materiale in moto su tale traiettoria saranno vettori tridimensionali nello spazio (o bidimensionali sul piano).

### Vettore spostamento

Individuiamo due momenti nel tempo  $t_1$  e  $t_2$ , e ricaviamo da  $\vec{r}(t)$  due posizioni lungo la curva ( $r_1$  e  $r_2$ ). A questo punto lo spostamento di un punto materiale in moto sulla curva che si sposta dal primo al secondo punto sarà:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}(t_2) - \vec{r}(t_1) = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

oppure, definito un certo intervallo di tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$ :

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)$$

## Velocità

Iniziamo col definire la velocità media, proprio come era stato fatto per il moto rettilineo uniforme:

$$\vec{V}_m = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)}{\Delta t}$$

e la velocità istantanea:

$$\vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{V}_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)}{\Delta t}$$

vediamo che sulle singole componenti, la velocità  $\vec{V}_m$  sarà:

$$\vec{V} = (V_x, V_y, V_z) = \left( \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right) = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$$

Si noti che geometricamente la velocità calcolata in un certo punto è la tangente a  $\vec{r}(t)$  in quel punto.

## Accelerazione

Definiamo, come prima, accelerazione media:

$$\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = \frac{\vec{V}(t_2) - \vec{V}(t_1)}{t_2 - t_1}$$

ed istantanea:

$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{v}(t + \Delta t) - \vec{v}(t)}{\Delta t} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

sulle singole componenti:

$$\vec{a}(t) = \frac{dv_x}{dt} \hat{i} + \frac{dv_y}{dt} \hat{j} + \frac{dv_z}{dt} \hat{k} = \frac{d^2 x}{dt^2} \hat{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \hat{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \hat{k} = \ddot{x} \hat{i} + \ddot{y} \hat{j} + \ddot{z} \hat{k}$$

È fondamentale notare che, fosse  $|v_1| = |v_2|$ , non è per forza detto che  $a = 0$ ! L'accelerazione infatti sarà influenzata sia dalla variazione longitudinale di velocità del mio punto materiale che dalla sua variazione in quanto a direzione. Poniamo i due versori  $\hat{u}_T$  e  $\hat{u}_N$ , rispettivamente nella direzione tangente e radiale del mio punto materiale. Avremo allora:

$$\vec{v} = v \hat{u}_T, \quad \vec{a} = \frac{dv}{dt} \hat{u}_T + v \frac{d\hat{u}_T}{dt}$$

$\hat{u}_T$  dipende dal tempo, ma

$$\frac{d(\hat{u}_T \cdot \hat{u}_T)}{dt} = 0 = 2\hat{u}_T \cdot \frac{d(\hat{u}_T)}{dt} \Rightarrow \frac{d\hat{u}_T}{dt} \perp \hat{u}_T$$

ovvero  $a_n$ , accelerazione lungo la direzione radiale (o normale, ma comunque stabilita secondo un sistema di riferimento levogiro) della curva è perpendicolare all'accelerazione longitudinale (o tangente)  $a_t$ . Vediamo poi:

$$\vec{a} = a_t \hat{u}_T + a_n \hat{u}_N$$

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \hat{u}_T + v \frac{d\hat{u}_T}{dt}$$

da cui si nota che:

- $a_t$  è legata alla variazione del modulo della velocità,
- $a_n$  alla variazione della sua direzione.

Si dice che  $a_n$  è l'accelerazione centripeta diretta verso l'interno della traiettoria. Inoltre, approssimando un qualsiasi intorno della curva con un segmento di circonferenza, vediamo che l'accelerazione centripeta è diretta proprio verso il centro di tale circonferenza. Dal punto di vista delle forze, l'accelerazione centripeta è proprio ciò che serve a mantenere il corpo lungo la traiettoria descritta da  $\vec{r}(t)$  (ed è l'unica forza / accelerazione in gioco! Non esiste alcuna forza centrifuga, è solamente apparente).

Riassumiamo le formule trovate finora:

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_t$$

$$a_t = |\vec{a}_t| = \frac{d|\vec{v}|}{dt}, \quad a_n = |\vec{a}_n| = \frac{v^2}{r}$$

e in totale:

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_n^2 + a_t^2}$$

Per concludere l'argomento, osserviamo come, invece di partire dalla definizione di spostamento derivando fino all'accelerazione, possiamo procedere per la strada inversa: partendo dall'accelerazione e integrando fino allo spostamento. Partiamo quindi da accelerazione a velocità:

$$\vec{a} = (a_x, a_y, a_z), \quad t > t_0$$

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = dv_x = a_x dt = v_x(t) - v_x(t_0) = \int_{v_{x0}}^{v_x} dv_x = \int_{t_0}^t a_x dt$$

E torniamo da velocità a spostamento:

$$v_x(t) = v_x(t_0) + \int_{t_0}^t a_x(t') dt'$$

potrò procedere analogamente sulle altre componenti, utilizzando opportunamente i versori  $\hat{i}, \hat{j}$  e  $\hat{k}$ .

## 19 Moti piani su coordinate polari

Avendo visto la definizione di sistema di coordinate polari, con  $(R, \theta)$  raggio e angolo rispetto all'asse delle ascisse, definiamo:

$$\vec{R} = (x, y, 0) = (R \cos \theta, R \sin \theta, 0)$$

$$\hat{\vec{R}} = (x/R, y/R, 0) = (\cos \theta, \sin \theta, 0)$$

$$\vec{\theta} = (-\sin \theta, \cos \theta, 0)$$

Generalmente,  $\vec{R}$  individuerà un certo punto su una circonferenza di raggio  $R$ , e  $\vec{\theta}$  sarà la direzione della sua velocità (tangenziale alla circonferenza).

### Moto piano vario

Nel caso di moto piano vario, quindi non ben definito su una circonferenza o qualsiasi altra funzione analitica, avremo banalmente:

$$\theta = \theta(t), \quad R = R(t)$$

### Moto piano circolare uniforme non uniforme

Nel caso almeno il luogo su cui avviene il moto sia una circonferenza, potremo stabilire:

$$\theta = \theta(t), \quad R = a$$

Vediamo ora più nel dettaglio un moto circolare a velocità costante.

## 20 Moto piano circolare uniforme

Nel caso il moto avvenga su una circonferenza e a velocità costante, potremo definire completamente velocità e posizione:

$$\theta = \omega_0 t + \theta_0, \quad R = a$$

si noti che qua e nel caso precedente  $a$  è il raggio della nostra circonferenza.

### Velocità angolare

Definiamo la "posizione angolare", cioè semplicemente l'angolo, come un vettore nella direzione  $\hat{z}$  di modulo proporzionale all'angolo stesso:

$$\vec{\theta} = (0, 0, \theta) = \theta \hat{z}$$

a questo punto la velocità angolare (misurata in  $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ , o visto che l'angolo è una grandezza adimensionale (rapporto di due lunghezze (parentesi innestate)), semplicemente  $\text{s}^{-1}$ ) non sarà altro che:

$$\vec{\omega} = \frac{d\theta}{dt} = (0, 0, \dot{\theta}) = \dot{\theta} \hat{z}$$

### Velocità tangenziale

Definiamo ora la velocità tangenziale, ovvero quella effettiva del punto materiale lungo la tangente alla circonferenza:

$$\begin{aligned}\vec{v} &= \frac{d\vec{R}}{dt} = \frac{d}{dt}(R \cos \theta, R \sin \theta, 0) = (-R\dot{\theta} \sin \theta, R\dot{\theta} \cos \theta, 0) \\ &= R\dot{\theta}(-\sin \theta, \cos \theta, 0) = \dot{\theta}R\hat{\theta} = \omega R\hat{\theta}\end{aligned}$$

dove  $\hat{\theta}$  è il versore tangente alla traiettoria del punto materiale. Vediamo inoltre rispetto al valore assoluto:

$$|\vec{v}| = \omega R$$

e rispetto alla componente radiale:

$$v_r = \dot{R} = 0$$

ovvero il raggio non cambia (ed era infatti costante da ipotesi).

Riportiamo quindi il vettore finale, in coordinate polari:

$$\vec{v} = (v_r, v_\theta, v_z) = (0, \omega R, 0), \quad \vec{v} \perp \vec{R}$$

dove è inoltre riportato il fatto che la velocità è perpendicolare al vettore posizione sulla circonferenza  $\vec{R}$  in qualsiasi punto.

Dimostriamo adesso un fatto importante riguardo alla velocità, conseguenza dell'asse scelto per  $\vec{\omega}$ , usando il prodotto vettoriale:

$$\begin{aligned}\vec{v} &= \vec{\omega} \times \vec{R} \\ &= \dot{\theta}\hat{z} \times \vec{R} = \dot{\theta}\hat{z} \times (\hat{x}R \cos \theta + \hat{y}R \sin \theta) \\ &= \dot{\theta}R(\hat{z} \times \hat{x} \cos \theta + \hat{z} \times \hat{y} \sin \theta) = \dot{\theta}R(\hat{y} \cos \theta - \hat{x} \sin \theta) \\ &= \omega R\hat{\theta}\end{aligned}$$

### Accelerazione centripeta

Basandoci proprio su quest'ultima equivalenza, studiamo il valore dell'accelerazione centripeta che mantiene il nostro punto materiale sulla circonferenza:

$$\begin{aligned}\vec{a} &= \frac{d(\vec{\omega} \times \vec{R})}{dt} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{R} + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{R}}{dt} \\ &= \vec{\omega} \times \frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{R})\end{aligned}$$



Notiamo come il primo termine della somma ottenuta nella terza equazione si annulli in quanto la derivata della velocità angolare  $\omega$ , costante, sarà nulla. Risolviamo quindi l'ultimo termine usufruendo della relazione:

$$\vec{A} \times (\vec{B} \times \vec{C}) = \vec{B}(\vec{A} \cdot \vec{C}) - \vec{C}(\vec{A} \cdot \vec{B})$$

ottenendo:

$$\begin{aligned} \vec{\omega}(\vec{\omega} \cdot \vec{R}) - \vec{R}(\vec{\omega} \cdot \vec{\omega}) &= -\omega^2 R \hat{R} \\ -\omega &= -\frac{v^2}{r^2}, \quad -\omega^2 R \hat{R} = \frac{-v^2 R}{R^2} \hat{R} = -\frac{V^2}{R} \hat{R} \end{aligned}$$

notiamo che l'ultima e la terzultima formula, egualmente valide, hanno segno negativo: questo perchè, scelto un riferimento levogiro sulla circonferenza, il versore  $\hat{R}$  viene ad orientarsi verso l'esterno della circonferenza, mentre per definizione la forza centripeta è diretta verso il centro della circonferenza.

### Periodo e pulsazione

Infine, riprendiamo brevemente le nozioni di periodo e pulsazione applicate al moto circolare uniforme. Diciamo che la velocità angolare  $\omega$  può essere chiamata anche pulsazione. A questo punto, trovato un periodo  $T$ , avremo:

$$VT = |\omega|RT = 2\pi R \Rightarrow T = \frac{2\pi}{|\omega|}$$

ricordando anche la frequenza  $v$ , definita come:

$$v = \frac{1}{|T|}$$

## 21 Moto circolare non uniforme

Data la velocità:

$$\vec{V} = \omega R \hat{\theta}$$

determiniamo l'accelerazione:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d(\vec{\omega} \times \vec{R})}{dt} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{R} + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{\alpha} \times \vec{R} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{R})$$

dove  $\alpha$  è l'accelerazione angolare:

$$\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \Rightarrow \alpha = \dot{\omega} = \ddot{\theta}$$

$$\vec{\alpha} = (\alpha_r, \alpha_\theta, \alpha_z) = (0, 0, \ddot{\theta}) = \ddot{\theta} \hat{z}$$

$$\vec{a} = \vec{\alpha} \times \vec{R} - \omega^2 R \hat{R} = \alpha \hat{z} \times \vec{R} - \omega^2 R \hat{R} = \alpha R \hat{\theta} - \omega^2 R \hat{R}$$

da cui:

$$\vec{a} = (-\omega^2 R, \alpha R)$$

In sostanza, l'accelerazione angolare ha 2 componenti:

- Componente radiale centripeta:

$$\omega^2 R$$

- Componente tangenziale dipendente dall'accelerazione angolare

$$\alpha R$$

A questo punto potremo ritrovare la velocità angolare come:

$$\omega(t) = \omega_{t_0} + \int_{t_0}^t \alpha(t') dt'$$

## 22 Moto piano vario

Vediamo adesso il caso generale dove sia la velocità angolare che la distanza dalla'origine sono funzioni di  $t$ :

### Velocità

Posto  $|\vec{R}| = R(t)$  e  $\vec{\omega} = \omega(t)$ :

$$\vec{V} = \hat{\theta} V_\theta + \hat{R} V_R = \vec{\omega} \times \vec{R} + \hat{R} \frac{d|\vec{R}|}{dt} = \dot{R} \hat{R} + \vec{\omega} \times \vec{R}$$

Ovvero la velocità ha componenti polari:

$$V_R = \dot{R}, \quad V_\theta = \omega R$$

Ciò si dimostra da:

$$\begin{aligned} \vec{V} &= \frac{d\vec{R}}{dt} = \frac{d}{dt}(R \cos \theta, R \sin \theta, 0) = (-R\dot{\theta} \sin \theta, R\dot{\theta} \cos \theta, 0) + (\dot{R} \cos \theta, \dot{R} \sin \theta, 0) \\ &= \dot{R} \hat{R} + \omega R \hat{\theta} = \dot{R} \hat{R} + R \omega \hat{z} \times \hat{R} = \dot{R} \hat{R} + R \vec{\omega} \times \hat{R} \end{aligned}$$

possiamo inoltre dimostrare che, riguardo al solo versore  $\hat{R}$ :

$$\frac{d\vec{R}}{dt} = \frac{d(R)}{dt} = \hat{R} \frac{dR}{dt} + R \frac{d\hat{R}}{dt} = \hat{R} \dot{R} + R \frac{d\hat{R}}{dt}$$

da cui;

$$\frac{d\hat{R}}{dt} = \hat{\theta}\dot{\theta} = \vec{\omega} \times \hat{R}$$

### Accelerazione

Poniamoci adesso il problema di descrivere l'accelerazione di un moto sul piano qualsiasi, descritto da coordinate polari:

$$\begin{aligned}\vec{a} &= \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d(\vec{\omega} \times \vec{R} + \dot{R}\hat{R})}{dt} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{R} + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{R}}{dt} + \ddot{R}\hat{R} + \dot{R}\frac{d\hat{R}}{dt} \\ &= \vec{\alpha} \times \vec{R} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{R} + \dot{R}\hat{R}) + \ddot{R}\hat{R} + \dot{R}\vec{\omega} \times \hat{R}\end{aligned}$$

usiamo la stessa formula per il prodotto vettoriale vista prima:

$$\vec{a} = \vec{\alpha} \times \vec{R} - \omega^2 \vec{R} + \ddot{R}\hat{R} + 2\dot{R}\vec{\omega} \times \hat{R}$$

notando le solite relazioni coi prodotti vettoriali, ovvero:

$$\vec{\alpha} \times \vec{R} = \alpha R \hat{z} \times \hat{R} = \alpha R \hat{\theta}, \quad \vec{\omega} \times \hat{R} = \omega \hat{z} \times \hat{R} = \omega \hat{\theta}$$

potremo riscrivere come:

$$\vec{a} = (-\omega^2 R + \ddot{R})\hat{R} + (\alpha R + 2\dot{R}\omega)\hat{\theta}$$

ricordando che  $\hat{R}$  è il versore in direzione radiale, e  $\hat{\theta}$  quello in direzione tangenziale alla traiettoria del nostro punto materiale.

## 23 Moto dei proiettili

Studiamo adesso il moto dei proiettili, ovvero corpi lanciati con una certa velocità iniziale  $\vec{v}_0$  e da lì in poi soggetti all'accelerazione di gravità  $g$ . Il moto avviene nel piano individuato da  $g$  e  $\vec{v}_0$ , e può essere diviso nelle componenti:

$$\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases} \quad \begin{cases} v_x = v_{0x} = \text{const.} \\ v_y = v_{0y} - gt \end{cases} \quad \begin{cases} x = x_0 + v_{0x}t \\ y = y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$

troviamo adesso dei risultati interessanti riguardo al moto dei proiettili. Possiamo innanzitutto determinare:

### Traiettoria

Eliminiamo  $t$  dalle equazioni della posizione ricavando  $t$  dalla prima e sostituendolo nella seconda:

$$x = x_0 + v_{0x}t, \quad t = \frac{x - x_0}{v_{0x}}$$

$$y = y_0 + v_{0y}\left(\frac{x - x_0}{v_{0x}}\right) - \frac{1}{2}g\left(\frac{x - x_0}{v_{0x}}\right)^2$$

impostiamo un sistema di riferimento cartesiano centrato sul punto da dove viene lanciato il proiettile, ponendo quindi  $x_0$  e  $y_0$  coordinate iniziali uguali a zero. Inoltre, definiamo  $\vec{v}_0$  in coordinate polari, ovvero in funzione dell'angolo di lancio  $\theta$  e del suo modulo  $v_0$ :

$$x_0, y_0 = 0, \quad \vec{v}_0 = (v_0 \cos \theta, v_0 \sin \theta)$$

ottenendo l'equazione finale della traiettoria:

$$y = \tan \theta x - \frac{gx^2}{2(v_0 \cos \theta)^2}$$

Determiniamo adesso la distanza percorsa dal proiettile, ovvero la:

### **Gittata**

Cerchiamo il punto dove il proiettile tocca terra, ponendo la seconda equazione dello spostamento a 0:

$$0 = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2, \quad \frac{1}{2}gt^2 = v_{0y}t$$

da cui, escludendo la soluzione triviale  $t = 0$  (sarebbe il punto da cui lo lanciamo, che ovviamente coincide con terra), abbiamo:

$$t = 2\frac{v_{0y}}{g}$$

sostituendo nella prima equazione:

$$x = v_{0x}t, \quad x = 2\frac{v_{0x}v_{0y}}{g}$$

Notiamo che per la proprietà trigonometrica:

$$\sin 2x = 2 \cos x \sin x$$

$v_{0x}v_{0y}$  vale:

$$\frac{v_0^2 \sin(2\theta)}{2}$$

da cui la formula finale per la gittata:

$$\frac{v_0^2 \sin(2\theta)}{g}$$

da cui è tra l'altro ovvio che la gittata massima si otterrà ad un angolo  $\theta = 45^\circ$  ( $\sin 2\frac{\pi}{4} = 1$ ).

## 24 Relatività galileiana

Consideriamo due sistemi di riferimento. Il primo,  $S$ , detto riferimento stazionario o di laboratorio, è "relativamente" in quiete. Il secondo,  $S'$ , è in moto rettilineo uniforme con una certa velocità  $v_0$ , detta velocità di trascinamento. Al tempo  $t = 0$  le origini di  $S$  e  $S'$  coincidono. Vale allora, che per un qualsiasi vettore  $\vec{r}'$  individuato da  $S'$ , lo stesso vettore nel riferimento  $S$  sarà:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}_0 t$$

Andiamo a derivare questa espressione (trasformazione di Galileo):

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0$$

Derivando nuovamente avremo:

$$\vec{a} = \vec{a}'$$

ovvero l'accelerazione non cambia al cambiare del sistema di riferimento (questo finché i sistemi di riferimento considerati sono inerziali, ovvero in quiete o in moto rettilineo uniforme). Si dice che l'accelerazione è un invariante della relatività galileiana.

Diciamo inoltre che nelle formule appena riportate,  $\vec{v}$  prende il nome di velocità assoluta,  $\vec{v}'$  di velocità relativa, e come già detto,  $\vec{v}_0$  di velocità di trascinamento.

### Riferimenti non inerziali

Esaminiamo il caso in cui il nostro sistema di riferimento  $SM$  (sistema mobile) si muove di velocità  $\vec{v}_t$  e accelerazione costante  $\vec{a}_t$  rispetto al sistema di laboratorio  $SL$ . La relazione fra le posizioni diventa:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_{OO'}(t)$$

che deriveremo per ottenere la velocità:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_t, \quad \vec{v}_t = \frac{d\vec{r}_{OO'}}{dt}$$

e l'accelerazione (notiamo che non è più invariante):

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_t, \quad \vec{a}_t = \frac{d^2\vec{r}_{OO'}}{dt^2}$$

con  $\vec{r}_{OO'}$  uguale al vettore spostamento dall'origine in  $SL$  all'origine in  $SM$ . Ricordiamo poi che i sistemi di riferimento non sono sistemi di coordinate: più propriamente sono sistemi di coordinate dotati di una certa misura dello spazio (un metro) e del tempo (un orologio).

## 25 Introduzione alla dinamica

Introduciamo ora le leggi fondamentali della dinamica. Innanzitutto possiamo dire che queste leggi si applicano nei casi in cui:

- Le velocità prese in considerazione sono molto più piccole di quelle della luce ( $\vec{V} < c$ );
- Le dimensioni dei corpi non sono in ordini di grandezza subatomici;
- I campi gravitazionali sono deboli.

nel primo e nel secondo caso, avremo bisogno rispettivamente della relatività ristretta e generale. Nel terzo caso invece ci servirà la meccanica quantistica.

### Definizione di Forza

La forza è un'interazione fra due corpi, che può essere:

- **A distanza**, ovvero attraverso le cosiddette forze fondamentali o di campo (gravitazionali, elettriche, magnetiche, ecc...);
- **Per contatto**, ovvero le forze che si studiano nella meccanica (attrito, forza elastica, ecc...). Derivano da manifestazioni macroscopiche delle interazioni elettromagnetiche.

Le forze sono grandezze fisiche vettoriali (hanno punto d'applicazione, direzione modulo e verso). Si misurano staticamente con il dinamometro.

**Prima legge di Newton** Il primo principio della dinamica, detto anche prima legge di Newton o legge d'inerzia, riguarda l'assenza di interazioni (forze):

Esiste almeno un sistema di riferimento in cui un corpo non soggetto a forze (oppure soggetto ad un sistema di forze a risultante nulla  $\sum \vec{F} = \vec{0}$ ) prosegue nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

in simboli:

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \Rightarrow \vec{a} = \vec{0}$$

### **Sistemi di riferimento inerziali**

Un sistema di riferimento inerziale è un sistema in cui vale il principio d'inerzia (e quindi  $\vec{F} = m\vec{a}$ ). I sistemi di riferimento inerziali formano una classe di sistemi (godono di riflessività, simmetria e transitività, ergo tutti i sistemi in movimento fra di loro con velocità costante sono inerziali).

### **Seconda legge di Newton**

Il secondo principio della dinamica, detto anche seconda legge di Newton o legge fondamentale della dinamica, mette in relazione massa, forza e accelerazione di un corpo:

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

dove  $m$  è la massa, una grandezza scalare, proprietà intrinseca della composizione di un corpo.

### **Terza legge di Newton**

Il terzo principio della dinamica, detto anche terza legge di Newton o principio di azione-reazione, stabilisce che ogni forza esercitata su di un corpo è seguita da una reazione, ovvero una forza con lo stesso modulo e direzione in verso opposto. Un esempio classico della terza legge di Newton è la forza vincolante espressa da ogni corpo in collisione con un'altro corpo, che ad esempio permette al terreno di impedirci di sprofondare verso il centro della terra sotto l'effetto della gravità.

### **Le quattro interazioni fondamentali**

Adesso può essere conveniente esaminare, almeno a livello superficiale, le quattro interazioni (forze) fondamentali individuate ad oggi dalla comunità scientifica:

- **Forza gravitazionale**

La gravità è la forza che attrae fra di loro corpi come la Terra e il sole, o ancora i corpi sulla superficie terrestre alla Terra stessa. Di gran lunga è la forza più debole fra le quattro fondamentali. La comprensione più completa che ne abbiamo è quella come espressione della geometria

spazio-tempo secondo la relatività generale.

La forza di gravità si applica fra due corpi nella direzione della retta che li congiunge, è direttamente proporzionale alle loro masse e inversamente proporzionale alla distanza fra i due:

$$\vec{F}_g = \frac{m_1 m_2}{R^2} G \hat{R}, \quad G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$$

dove  $\hat{R}$  è il versore nella direzione della distanza fra i due corpi. Chiamamente i corpi sono attratti fra di loro quanto più sono vicini e le loro masse sono grandi. Inoltre, la forza gravitazionale a raggio di azione infinito (seppur insignificante su distanze abbastanza grandi).

- **Forza elettromagnetica**

La forza elettromagnetica dà origine ai legami chimici, alle proprietà di atomi e molecole, alla luce nonché a gran parte delle forze di contatto studiate nella meccanica classica. La forza elettromagnetica si applica fra cariche: la carica elettrica, misurata in Coulomb (C), ne determina infatti il verso. Cariche concordi si respingono, cariche discordi si attraggono. In simboli:

$$\vec{F}_c = \frac{q_1 q_2}{R^2} k \hat{R}$$

dove k è la costante di Coulomb, ovvero:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

Come per la forza gravitazionale, la forza elettromagnetica ha raggio di azione infinito. La differenza però sta nel verso, che può essere sia attrattivo (come la gravità) che repulsivo.

- **Forza nucleare (forte)**

La forza nucleare entra in gioco su distanze estremamente piccole, inferiori ai  $10^{-15}\text{m}$ . La si può osservare nei nuclei di atomi, formati da protoni carichi positivamente, che però non si disperdono a causa della forza elettromagnetica proprio grazie all'azione della forza nucleare che li mantiene uniti. La forza nucleare determina le interazioni fra particelle elementari come quark e gluoni.

- **Forza nucleare debole**

La forza nucleare debole è responsabile delle forze che entrano in gioco nei meccanismi di decadimento nucleare. Ha un range estremamente limitato, di  $10^{-18}\text{m}$ .



### Forze di contatto

Vediamo quali sono i tipi principali di forze di contatto fra corpi, o fra corpi e fluidi:

- Fra corpi rigidi
  - Forze vincolari
    - \* normali fra superfici
    - \* ganci o fili inestensibili
    - \* cerniere
    - \* ...
  - Attriti (paralleli alla superficie di contatto):
    - \* statico
    - \* dinamico
- Fra corpi deformabili:
  - Forze elastiche
  - Forze anelastiche
- Fra un corpo solido e un fluido
  - Attrito viscoso
  - Forze di pressione

### Forza gravitazionale

Riprendendo la legge di gravitazione universale:

$$\vec{F}_m = \frac{mM_t}{r^2}G$$

con  $M_t$  massa della Terra ( $6 \times 10^{24}$ ) e  $m$  massa dell'oggetto in questione, possiamo dire:

$$\vec{a} = \frac{M_t}{R^2}G$$

in accordo con:

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

Chiaramente, nei pressi della Terra  $\vec{a}$  sarà uguale a  $g$ , ovvero l'accelerazione gravitazionale terrestre. La forza  $F_m$  prende il nome di forza peso (da non confondersi con la massa!). La forza peso è diretta approssimativamente verso

il centro della terra e vale circa  $9.81 \cdot m$  per un corpo di massa  $m$ , sulla superficie terrestre attorno al  $45^\circ$  parallelo.

### **Forze normali**

Vediamo adesso tutte quelle forze vincolari che i corpi esercitano l'uno sull'altro perpendicolarmente alle loro superfici. Le forze normali si verificano solamente in caso di compressione. Notiamo che la forza normale esercitata da un corpo che sorregge un'altro corpo non è sempre uguale al peso: ad esempio, il corpo sorretto potrebbe da parte sua subire altre forze, con una componente parallela alla forza peso ma diretta verso l'alto o verso il basso, che andrebbero rispettivamente a diminuire o decrementare la reazione vincolare.

### **Piano inclinato**

Notiamo adesso come la forza normale non è necessariamente diretta verso l'asse verticale. Prendiamo in esempio un piano inclinato di angolo  $\theta$ . Potremo allora dividere la forza di gravità che agisce sul corpo in due componenti: quella parallela e quella perpendicolare alla superficie del piano. Chiamandole rispettivamente  $F_{\parallel}$  e  $F_{\perp}$  potremo dire:

$$F_{\parallel} = F_g \sin \theta, \quad F_{\perp} = -F_g \cos \theta$$

In questo caso, il piano inclinato compenserà con una reazione vincolare soltanto la componente  $F_{\perp}$ , mentre la componente  $F_{\parallel}$  resterà invariata nella direzione parallela al piano.

### **Contatto diretto**

Due oggetti di massa  $m_1$  e  $m_2$ , in contatto diretto e su cui viene applicata una forza (e che quindi si spingono fra di loro), possono essere considerati dal punto di vista della forza come un unico oggetto di massa  $m_1 + m_2$ , da cui l'accelerazione complessiva:

$$a = \frac{F}{m_1 + m_2}$$

Possiamo a questo punto trovare le due forze di reazione  $R_1$  e  $R_2$  che i corpi applicano l'uno sull'altro:

$$R_1 = \frac{F m_1}{m_1 + m_2}, \quad R_2 = \frac{F m_2}{m_1 + m_2}$$

Notiamo inoltre che  $R_1 = F - R_2$  e  $R_2 = F - R_1$ , ovvero:

$$F = R_1 + R_2$$

### **Funi e corde**

Consideriamo funi e corde come vincoli monodimensionali privi di massa inerziale e inestensibili. Trasferiscono la forza, detta tensione ( $T$ ) fra i loro estremi.

## 26 Forze di contatto

La forza di attrito si esprime parallelamente alle superfici di contatto fra i corpi. Si tratta di un'interazione di contatto, mediata dalle interazioni elettromagnetiche fra le superfici dei corpi. Si oppone al moto dei corpi, e ha valore variabile rispetto al loro stato di quiete o moto:

- **Attrito statico:** è la forza che mantiene fermo un oggetto in quiete. In questo caso la forza di attrito ha valore massimo.
- **Attrito dinamico:** si esprime quando un corpo si muove ("scivola") su una superficie scabra, e agisce nella direzione opposta a quella del movimento.

In generale, con  $F_s$  forza di attrito statico,  $F_d$  forza di attrito dinamico, e  $N$  una forza applicata ad un corpo, avremo che l'equilibrio si raggiunge con:

$$F_s \leq N\mu_s \quad F_d = N\mu_d$$

$\mu_s$  e  $\mu_d$  sono rispettivamente i coefficienti di attrito statico e dinamico, compresi fra circa 0.05 e 1.5. In genere,  $\mu_d < \mu_s$ , e le due grandezze non dipendono dall'area di contatto. La forza di attrito si esprime in direzione parallela a quella del moto, proporzionalmente alla forza normale che il corpo applica sulla superficie.

### Attrito sul piano inclinato in discesa

Su un piano scabro, con un corpo in quiete, abbiamo che:

$$f_s = \mu_s N, \quad N = mg \cos \theta$$

Perché il corpo sia in quiete, avremo bisogno che:

$$mg \sin \theta = f_s = \mu_s N = \mu_s mg \cos \theta$$

da cui si ricava che:

$$\mu_s = \tan \theta$$

ovvero il coefficiente di attrito statico corrisponde alla tangente dell'angolo di pendenza massimo in cui il corpo è in grado di restare fermo senza scivolare. Nel caso il corpo sia in movimento, avremo allora che:

$$mg \sin \theta > f_d, \quad \tan \theta > \mu_s$$

da cui potremo ricavare l'accelerazione sull'asse parallelo al piano:

$$a_x = g(\sin \theta - \mu_d \cos \theta)$$

## 27 Resistenza fluidodinamica

Un fluido (quindi un liquido o gas) esercita una forza di resistenza  $\vec{R}$  su di un oggetto che si muove immerso in esso. La direzione di  $\vec{R}$  è opposta alla direzione  $\vec{v}$  del moto dell'oggetto relativo al fluido. Il suo modulo dipende invece dalle caratteristiche del fluido, dalla forma dell'oggetto immerso e dalla sua velocità.

### Proporzionalità diretta

Generalmente, in un fluido possiamo applicare una qualche proporzionalità diretta del tipo:

$$\vec{R} = -\beta \vec{v}$$

Ad esempio, volessimo modellizzare il moto di una particella in un fluido, con resistenza proporzionale alla velocità, avremo l'equazione differenziale:

$$m \frac{dv}{dt} = -\beta v + mg \Rightarrow \frac{dv}{dt} = -\frac{\beta}{m}v + g$$

la cui omogenea associata è:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\beta}{m}v$$

L'omogenea è a variabili separabili, e abbiamo quindi:

$$\frac{dv}{v} = -\frac{\beta}{m}dt \Rightarrow \int \frac{dv}{v} = \int -\frac{\beta}{m}dt \Rightarrow \log v = -\frac{\beta}{m}t + A, \quad v(t) = Ae^{-\frac{\beta}{m}t}$$

La soluzione generale si ottiene imponendo la condizione di regime (velocità costante):

$$\frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow 0 = -\frac{\beta}{m}v_l + g, \quad v_l = \frac{mg}{\beta}$$

da cui ricaviamo la soluzione globale:

$$v(t) = Ae^{-\frac{\beta}{m}t} + v_l = Ae^{-\frac{\beta}{m}t} + \frac{mg}{\beta}$$

A questo punto possiamo imporre le nostre condizioni iniziali. Assumiamo che la velocità del corpo all'istante  $t = 0$  sia nulla:

$$0 = A + \frac{mg}{\beta}, \quad A = -\frac{mg}{\beta}$$

da cui otteniamo:

$$v(t) = -\frac{mg}{\beta}e^{-\frac{\beta}{m}t} + \frac{mg}{\beta} = \frac{mg}{\beta}(1 - e^{-\frac{\beta}{m}t})$$

### Proporzionalità quadratica

Nel caso di corpi non piccoli che si muovono a velocità elevate, la resistenza  $\vec{R}$  è circa proporzionale a  $v^2$  invece che a  $v$ , secondo la formula:

$$\vec{R} = \frac{1}{2}C\rho Av^2$$

dove  $C$  è il coefficiente di attrito (resistenza aerodinamica),  $\rho$  la densità del fluido, e  $A$  l'area efficace (la sezione trasversale nella direzione del moto). Possiamo già da questa forza ricavare la velocità limite:

$$ma = mg - \frac{1}{2}C\rho Av^2$$
$$mg - \frac{1}{2}C\rho Av_l^2 = 0 \Rightarrow v_l = \sqrt{\frac{2mg}{CA\rho}}$$

## 28 Moto circolare uniforme sul piano orizzontale

Vediamo ora le forze in gioco in un moto circolare uniforme. Abbiamo che l'accelerazione centripeta è:

$$|a_r| = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

Di conseguenza, perchè si verifichi un moto circolare, significherà che esiste una forza:

$$F = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot \omega^2 r$$

detta forza centripeta. N.B.: La forza centripeta non è un particolare tipo di forza, ma solamente una forza qualsiasi che si comporta come tale.

### Pendolo conico

Prendiamo adesso in esempio un pendolo, formato da una corda di lunghezza  $L$  fissata ad un punto fisso, posta ad angolo  $\theta$  rispetto all'asse verticale, con una massa  $m$  fissata ad un'estremità. La massa si muove di moto circolare uniforme su una certa orbita di raggio  $r$  con velocità costante  $\omega$ . Conviene allora stabilire un sistema di riferimento cilindrico centrato sul centro dell'orbita, con  $\hat{k}$  ( $z$ ) orientato nella direzione opposta alla forza peso. Avremo allora che la tensione  $T$  della corda lungo l'interno della circonferenza e lungo l'asse verticale è:

$$\begin{cases} T \sin \theta = m\omega^2 r \\ T \cos \theta = mg \end{cases}.$$

Sostituiamo  $r$  nella prima equazione, notando che:

$$r = L \sin \theta$$

ottenendo:

$$T \sin \theta = m\omega^2 L \sin \theta \Rightarrow T = m\omega^2 L$$

Dalla seconda equazione otteniamo invece:

$$T = \frac{mg}{\cos \theta}$$

eguagliando  $T$  nelle due equazioni otteniamo:

$$m\omega^2 L = \frac{mg}{\cos \theta} \Rightarrow \omega^2 = \frac{mg}{mL \cos \theta}, \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{L \cos \theta}}$$

da cui notiamo tra l'altro che la velocità del pendolo non dipende dalla massa del corpo.

### **Conca sferica**

Impostiamo un problema sostanzialmente analogo: quello di un corpo che ruota su una conca sferica di raggio  $r$ . Notiamo che la reazione vincolare della conca è esattamente identica a quella della tensione della corda nel caso precedente, solo nella direzione opposta. Possiamo allora dire che come prima:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L \cos \theta}}$$

### **Veicoli in curva**

Esaminiamo adesso un'automobile che percorre una curva di raggio  $r$  a velocità tangenziale  $v$  costante, sfruttando la componente radiale (scelto un sistema di riferimento cilindrico) della forza d'attrito statico degli pneumatici (sia il coefficiente di attrito statico  $\mu_s$ ). La forza centripeta necessaria per percorrere la curva sarà:

$$f_s = ma_r = m \frac{v^2}{r}$$

e la forza di attrito statico sarà invece:

$$f_a = \mu_s N = \mu_s mg$$

Ponendo la disuguaglianza:

$$m \frac{v^2}{r} \leq \mu_s mg \Rightarrow v \leq \sqrt{\mu_s gr} = v_{crit}$$

otteniamo la velocità critica  $v_{crit}$ , al di sopra della quale l'attrito degli pneumatici non è più in grado di mantenere l'automobile sulla sua traiettoria circolare, e di conseguenza si verifica uno sbandamento.

### **Veicoli in curva sopraelevata**

Un caso migliore sarà quello della percorrenza di una curva sopraelevata, ovvero a sezione longitudinale approssimativamente parabolica. Curve del genere si possono trovare negli autodromi, per permettere alle automobili di raggiungere, a parità di aderenza, velocità più elevate. Impostiamo l'accelerazione dell'automobile, con  $N$  reazione vincolare della superficie della curva:

$$\begin{cases} ma_z = 0 = N \cos \theta - mg \\ ma_r = -m \frac{v^2}{r} = -N \sin \theta \end{cases}.$$

da cui:

$$\frac{N \sin \theta}{N \cos \theta} = \frac{mv^2}{rmg} = \frac{v^2}{rg} \Rightarrow \tan \theta = \frac{v^2}{rg}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{v^2}{rg}$$

Trovo  $\theta$ , l'angolo necessario a percorrere una curva di raggio  $r$  a velocità  $v$ . A  $\theta$  troppo grandi, la componente orizzontale  $ma_r$  è troppo grande, con conseguente scivolamento verso l'interno della curva a causa della gravità. In caso contrario,  $ma_r$  è troppo piccola, e si verifica uno sbandamento.

### Veicoli in curva sopraelevata con attrito

Vediamo adesso il caso in cui una vettura percorre una curva sopraelevata di angolo  $\theta$  e raggio  $r$ , a velocità  $v$ , con coefficiente di attrito statico degli pneumatici sulla strada di  $\mu_s$ . Chiamando  $f_s$  la forza di attrito:

$$f_s = -\mu_s mg \sin \theta$$

$$\begin{cases} ma_z = 0 = N \cos \theta - mg - f_s \sin \theta \\ ma_r = -m \frac{v^2}{r} = -f_s \cos \theta - N \sin \theta \end{cases}.$$

visto che  $N = -mg \sin \theta$ , avremo:

$$m \frac{v^2}{r} = N(\sin \theta + \mu_s \cos \theta), \quad mg = N(\cos \theta - \mu_s \sin \theta)$$

da cui:

$$m \frac{v^2}{r} = mg \frac{\sin \theta + \mu_s \cos \theta}{\cos \theta - \mu_s \sin \theta}, \Rightarrow v = \sqrt{gr \frac{\sin \theta + \mu_s \cos \theta}{\cos \theta - \mu_s \sin \theta}}$$

dove  $v$  rappresenta la velocità massima di percorrenza del tratto di curva.

## 29 Moto circolare uniforme sul piano verticale

Vediamo adesso il moto circolare uniforme, dal punto di vista delle forze, svolto su un piano verticale, ovvero sotto l'effetto della forza di gravità. Supponiamo di avere un corpo che ruota su un giro della morte. Poniamo  $T$  come la reazione vincolare della superficie, che mantiene il corpo sulla traiettoria circolare. L'accelerazione del corpo sarà allora:

$$\vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a}$$

o sulle componenti di un sistema di riferimento polare:

$$-T + mg \cos \theta = ma_r = -m \frac{v^2}{r}$$

$$-mg \sin \theta = ma_\theta = m \frac{dv}{dt}$$

Queste sono le equazioni di un moto vario, ovvero dove l'accelerazione sulla direzione tangenziale del corpo varia. Vediamo qual'è la velocità minima



perchè il corpo raggiunga la posizione  $\theta = \pi$ , ovvero riesca a svolgere un giro completo. Abbiamo da prima:

$$g \cos \theta \leq \frac{v^2}{r}, \quad v_{min} = \sqrt{gr}$$

visto che  $T$  sarà maggiore di zero nel caso di un contatto con la superficie della rampa.

## 30 Forze fra corpi deformabili

Vediamo ora le forze dovute all'interazione fra due corpi deformabili in contatto fra di loro. Questo tipo di forze si dividono in:

- Forze fra due corpi deformabili anelasticamente, spesso in modo permanente. In questo caso non esistono leggi, e si può solo applicare il terzo principio della dinamica.
- Forze fra due corpi deformabili elasticamente, che si possono modellizzare come molle.

### Forza elastica

Vediamo nel dettaglio l'ultima categoria. Una molla con un certo coefficiente elastico  $k$ , sottoposta ad una sollecitazione che riesce a spostarla di una certa  $\Delta R$ , esprime in direzione opposta una forza pari a:

$$\vec{F}_{el} = -k\Delta R$$

La costante  $k$  è detta costante della molla e si misura in  $\frac{N}{m}$ . Notiamo che le molle che prenderemo in considerazione sono molle ideali, ovvero prive di massa e indeformabili (a  $k$  costante).

## 31 Moto armonico

Vediamo una configurazione dove una massa collegata da una molla ad una parete oscilla attorno alla posizione di riposo. Abbiamo che in ogni istante:

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

ovvero

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} = -\frac{k}{m}x(t) = -\omega^2x(t)$$

introducendo  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , detta pulsazione della molla.  
L'equazione differenziale ha soluzione:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi)$$

dove  $A$  è l'ampiezza,  $\omega$  la pulsazione e  $\phi$  la fase. Posso ricavare poi la velocità:

$$v(t) = -A\omega \sin \omega t + \phi$$

e l'accelerazione:

$$a(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t + \phi)$$

## Dimostrazione

- **Equazione differenziale del moto armonico**

prendiamo la legge elastica  $\vec{F} = -kx$ . Applicando la seconda legge della dinamica, abbiamo che:

$$m\vec{a} = -kx, \quad \vec{a} = -\frac{kx}{m}, \quad \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -\frac{kx}{m}$$

da cui si ricava l'equazione differenziale ordinaria di secondo grado:

$$\ddot{x}(t) + \frac{k}{m}x(t) = 0$$

il polinomio caratteristico dell'equazione è:

$$\lambda^2 + \frac{k}{m} = 0$$

da cui si ottengono 2 soluzioni immaginarie coniugate,  $\pm i\sqrt{\frac{k}{m}}$ . L'integrale generale è quindi:

$$x(t) = c_1 e^{+i\frac{k}{m}t} + c_2 e^{-i\frac{k}{m}t}$$

Convien a questo punto chiamare  $\sqrt{\frac{k}{m}} = \omega$ , detta pulsazione dell'oscillatore armonico (impropriamente velocità angolare). A questo punto potremo, tra l'altro, riscrivere la differenziale come:

$$\ddot{x}(t) + \omega^2 x(t) = 0$$

Applicando la legge di Eulero all'integrale generale, avremo:

$$x(t) = c_1 \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + c_2 \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t = c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t$$

- **Forma cosinusoidale**

A questo punto riportiamo la formula nella forma  $A \cos \omega t + \phi$ , in funzione di ampiezza, pulsazione e fase. Diciamo innanzitutto:

$$A = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} \Rightarrow \frac{A^2}{A^2} = \frac{c_1^2 + c_2^2}{A^2}, \quad \left(\frac{c_1}{A}\right)^2 + \left(\frac{c_2}{A}\right)^2 = 1$$

Notiamo la somiglianza con l'identità trigonometrica fondamentale  $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ . Possiamo infatti avere che:

$$\frac{c_1}{A} = \cos \psi, \quad \frac{c_2}{A} = \sin \psi \Rightarrow c_1 = A \cos \psi, \quad c_2 = A \sin \psi$$

per un qualsiasi angolo  $\psi$ . Sostituiamo quindi nell'integrale generale:

$$x(t) = A \cos \psi \cos \omega t + A \sin \psi \sin \omega t = A(\cos \psi \cos \omega t + \sin \psi \sin \omega t)$$

su cui possiamo applicare la formula della sottrazione del coseno  $\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta$ :

$$A(\cos \psi \cos \omega t + \sin \psi \sin \omega t) = A \cos(\omega t - \psi)$$

dove  $\cos(\omega t - \psi) = \cos(\psi - \omega t)$  (per la parità del coseno o per la commutatività della moltiplicazione nella formula di sottrazione, fai un po' te). Troviamo allora  $\psi$  in funzione di  $c_1$  e  $c_2$ , accorgendoci di poter ricavare dalle formule sopra riportate  $\tan \psi$ :

$$\tan \psi = \frac{\sin \psi}{\cos \psi} = \frac{c_1}{A} \cdot \frac{A}{c_2} = \frac{c_2}{c_1}$$

definiamo, per convenienza, l'opposto di  $\psi$  come  $\phi = -\psi$ . Questo ci permette di scrivere:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi)$$

Dalla disparità della tangente, avremo che:

$$\tan \phi = -\tan(-\phi) = -\tan \psi = \tan -\psi$$

$$\phi = \arctan\left(-\frac{c_2}{c_1}\right), \quad \psi = \arctan \frac{c_2}{c_1}$$

### • Condizioni iniziali

Diamo infine un significato fisico alle costanti  $c_1$ , e  $c_2$ , imponendo le condizioni iniziali dell'equazione differenziale. Iniziamo dalla posizione al tempo 0, ovvero  $x(t=0)$ :

$$x(0) = c_1 \cos 0 + c_2 \sin 0 = c_1, \quad c_1 = x(0)$$

Deriviamo poi  $x(t)$  per ricavare la velocità  $\frac{d}{dt}x(t) = v(t)$ :

$$\frac{d}{dt}x(t) = -c_1\omega \sin \omega t + c_2\omega \cos \omega t$$

e quindi la velocità al tempo 0, ovvero  $v(t=0)$ :

$$v(0) = -c_1\omega \sin 0 + c_2\omega \cos 0 = c_2\omega, \quad c_2 = \frac{v(0)}{\omega}$$

chiamiamo  $v(0) = v_0$  e  $x(0) = x_0$  e sostituiamo nella formula cosinusoidale:

$$A \cos(\omega t + \phi) = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} \cos(\omega t + \arctan(-\frac{c_2}{c_1}))$$

$$A = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} = \sqrt{x_0^2 + (\frac{v_0}{\omega})^2}, \quad \phi = \arctan(-\frac{c_2}{c_1}) = \arctan(-\frac{v_0}{\omega x_0})$$

$$A \cos(\omega t + \phi) = \sqrt{x_0^2 + (\frac{v_0}{\omega})^2} \cos(\omega t + \arctan(-\frac{v_0}{\omega x_0}))$$

## 32 Energia e Lavoro

Possiamo trattare i problemi della dinamica, invece che dal punto di vista delle forze e delle accelerazioni, attraverso i concetti di energia e lavoro. L'energia compare in diverse branche della fisica, ad esempio:

- Energia cinetica  $\leftrightarrow$  velocità;
- Energia potenziale  $\leftrightarrow$  posizione;
- Energia termica  $\leftrightarrow$  temperatura.

Possiamo definire l'energia come la capacità di compiere un lavoro.

### Energia cinetica

Definiamo l'energia cinetica come:

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

Si misura in Joule:  $1\text{J} = 1\text{kg} \times \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$ . In un sistema formato da più particelle, l'energia cinetica complessiva è la somma delle energie cinetiche di tutte le particelle:

$$K = \sum_i K_i = \sum_i \frac{1}{2}m_i v_i^2$$

L'energia cinetica è dovuta al moto delle particelle ed è presente anche a livello microscopico: equivale all'energia termica della termodinamica. Notare inoltre che:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(\vec{v} \times \vec{v})$$

### Lavoro

Sia  $P$  un certo punto che si sposta su una curva  $\gamma$ , spinto da una forza  $\vec{F}$ .

Quando il punto si sposta dalla posizione  $\vec{R}_i$  alla posizione  $\vec{R}_f$ , il suo lavoro sarà:

$$L_{\vec{R}_i \rightarrow \vec{R}_f} = \int_{\vec{R}_i}^{\vec{R}_f(\gamma)} \vec{F} \cdot d\vec{R}$$

per ogni punto conosceremo quindi:

- Il differenziale dello spostamento  $d\vec{R}$ ;
- La forza  $\vec{F}$  lungo la curva;

e fare il loro prodotto scalare  $dL = \vec{F} \cdot d\vec{R}$ . Notare che l'integrale è un integrale di linea su  $\gamma$ .

### Teorema delle forze vive

Un'importante teorema detto teorema delle forze vive o **dell'energia cinetica** afferma che il lavoro effettuato dalla risultante delle forze  $\vec{F}$  agenti su un punto materiale di massa inerziale  $m$  tra  $R_i$  e  $R_f$  è uguale alla variazione di energia cinetica del punto materiale tra  $R_i$  e  $R_f$ :

$$\Delta K = K_f - K_i = L_{if} = \int_{i(\gamma)}^f \vec{F} \cdot d\vec{R}$$

Se il lavoro è:

- **Positivo**, l'energia cinetica aumenta;
- **Negativo**, l'energia cinetica diminuisce.

### Lavoro svolto da una forza costante

Se  $\vec{F}$  è una forza costante che spinge un punto materiale su un segmento dal punto  $A$  al punto  $B$ , con distanza,  $\Delta\vec{r}$ , il lavoro (grandezza scalare) eseguito dalla forza  $F$  su  $P$  si definisce come:

$$L_{AB} = F \Delta r \cos \theta$$

dove  $\theta$  è l'angolo che la forza  $F$  forma con il segmento. Questo deriva da:

$$L_{AB} = \int_{\vec{r}_A}^{\vec{r}_B} \vec{F} \cdot d\vec{r} = \vec{F} \cdot (\vec{r}_b - \vec{r}_a)$$

### Lavoro elementare su ascissa curvilinea

Definiamo il lavoro elementare di una forza:

$$dL = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F dr \cos \theta$$

$$dL \vec{F} \cdot d\vec{r} = (\vec{F}_t + \vec{F}_n) \cdot d\vec{r} = (\vec{F}_t + \vec{F}_n) \cdot (\hat{t}ds), \quad dL = F_t(s)ds$$

il lavoro della forza si può definire si può scrivere in termini di tale componente:

$$L_{if} = \int_{S_i}^{S_f} F_t(s)ds$$

Il prodotto scalare può essere calcolato anche in funzione delle coordinate cartesiane:

$$dL = (F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k}) \cdot (dx \hat{i}, dy \hat{j}, dz \hat{k}) = F_x dx + F_y dy + F_z dz$$

dove:

$$dL = (dx \hat{i}, dy \hat{j}, dz \hat{k}) = (v_x(t) \hat{i}, v_y(t) \hat{j}, v_z(t) \hat{k})$$

conoscendo le leggi orarie.

### 33 Lavoro svolto da forze costanti

#### Lavoro di forze orizzontali

Prendiamo in esempio un blocco trainato su un piano orizzontale scabro a velocità costante per un tratto  $\vec{d} = d\hat{i}$ . Il lavoro della forza  $F$  sarà:

$$L_f = \vec{F} \cdot \vec{d} = Fd \cos \theta > 0$$

Mentre il lavoro della reazione del piano  $N$  sarà:

$$L_n = \vec{N} \cdot \vec{d} = 0$$

e il lavoro della forza di gravità  $mg$  sarà:

$$L_{mg} = m\vec{g} \cdot \vec{d} = 0$$

Come vediamo, il lavoro delle forze sul piano verticale è effettivamente nullo in quanto il blocco non si muove verticalmente. Si può in generale dire che le forze vincolari compiono lavoro 0:

$$L_{\vec{N}} = 0(\vec{F} \perp d\vec{r})$$

Resta il lavoro della forza d'attrito:

$$L_d = \vec{F}_d \cdot \vec{d} = -F_d d = -\mu_d N d < 0$$

possiamo a questo punto imporre accelerazione nulla:

$$-Fd + F \cos \theta = -N\mu_d + F \cos \theta = ma_x = 0 \Rightarrow L_f + L_d = (-N\mu_d + F \cos \theta)d = 0$$

### Lavoro della gravità nelle vicinanze della superficie terrestre

La gravità terrestre esercita su tutti i corpi nelle sue vicinanze una forza  $mg$ , che svolge un lavoro pari a :

$$L = L_{if} = m\vec{g} \cdot \vec{s} = -mg(y_f - y_i)$$

dove  $\vec{s}$  rappresenta la variazione dell'altitudine tra le ordinate  $y_f$  e  $y_i$ . Osserviamo quindi che il lavoro dipende quindi solamente dalla quota finale e della quota iniziale. Possiamo in generale dire che il lavoro della gravità alla superficie terrestre di un corpo ad altitudine  $h$  è:

$$L_{M\vec{g}} = -Mg\Delta h$$

### Lavoro delle forze di contatto

Le forze di attrito dinamico compie lavoro:

$$L_{\vec{F}_{AD}} = \int -\mu_d |\vec{N}| |d\vec{R}| < 0$$

mentre la forza di attrito statico, visto che agisce su distanze nulla, sarà:

$$L_{\vec{F}_{AD}} = 0$$

### Teorema dell'energia cinetica

Il lavoro svolto dalla risultante delle forze  $\vec{F}$  agenti su un punto materiale di massa inerziale  $M$  che si sposta da un punto  $\vec{R}_0$  a un punto  $\vec{R}_1$  è uguale alla variazione di energia cinetica del punto materiale tra  $\vec{R}_0$  e  $\vec{R}_1$ . La stessa cosa vale anche per sistemi di punti materiali.

$$K(\vec{R}_1) - K(\vec{R}_0) = \sum \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}_1} \vec{F}_i \cdot d\vec{R}$$

Dimostriamo il caso dei punti materiali:

$$\sum \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}_1} \vec{F}_i \cdot d\vec{R} = \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}_1} (\sum \vec{F}_i) \cdot d\vec{R} = \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}_1} M\vec{a} \cdot d\vec{R} = \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}_1} M \frac{d\vec{V}}{dt} \cdot d\vec{R} = \int_{t_0}^{t_1} M \frac{d\vec{V}}{dt} \cdot \vec{V} dt$$

Prendiamo il termine  $\frac{d\vec{V}}{dt} \cdot \vec{V}$ . Possiamo riscriverlo come:

$$\frac{1}{2} \frac{dV^2}{dt} = \frac{1}{2} \cdot 2\vec{V} \cdot \left( \frac{d\vec{V}}{dt} \right) = \vec{V} \cdot \frac{d\vec{V}}{dt}$$

Sostituiamo per ottenere:

$$\int_{t_0}^{t_1} M \frac{d}{dt} \frac{V^2}{2} dt = \left| M \frac{V^2}{2} \right|_{t_0}^{t_1} = \frac{M}{2} (V^2(t_1) - V^2(t_0))$$



### Lavoro della forza elastica

Studiamo una molla di lunghezza  $L_0$ . La molla potrà essere spostata dalla sua posizione di riposo nelle due direzioni lungo il suo asse: diciamo di avere in momenti distinti spostamenti  $L_i$  e  $L_f$ , con variazione della posizione rispetto alla posizione di riposo  $L_0$  pari a  $x_i = L_i - L_0$ ,  $x_f = L_f - L_0$ . A questo punto possiamo ricordare la legge elastica che determina la forza applicata dalla molla in funzione degli spostamenti  $x_i$  e  $x_f$ :

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

e calcolare l'integrale:

$$L_{x_i x_f} = \int_{x_i}^{x_f} \vec{F} \cdot d\vec{r} = - \int_{x_i}^{x_f} kx d\vec{r} = -\frac{k}{2}(x_f^2 - x_i^2)$$

Notiamo che se  $x_f = -x_i$ , il lavoro svolto è nullo. **Lavoro svolto nel moto parabolico**

Prendiamo l'esempio del moto parabolico. La forza peso compirà un lavoro in qualsiasi punto della parabola pari a:

$$L_p = -mg(y_f - y_i) = -mgy$$

$$\Delta K = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}m(v_y^2 - v_0^2 \sin^2 \theta)$$

Eguagliando:

$$\Delta K = -mgy = \frac{1}{2}m(v_y^2 - v_0^2 \sin^2 \theta)$$

Possiamo applicare il teorema delle forze vive:

$$-2gy = v_y^2 - (v_0 \sin \theta)^2 \Rightarrow v_y^2 = (v_0 \sin \theta)^2 - 2gy$$

che con quanto trovato attraverso la cinematica:

$$2a_y(y(t) - y_0) = v_y(t)^2 - v_{0y}^2$$

### Lavoro della forza elettrostatica o gravitazionale

Possiamo dire, per le forze che dipendono dall'inverso del quadrato della distanza:

$$\vec{F} = -\frac{K}{r^2} \hat{r}$$

attrattiva con  $k > 0$ , repulsiva con  $k < 0$ , che il lavoro svolto è:

$$L = \int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{s} = -k \int_i^f \frac{\hat{r} \cdot d\vec{s}}{r^2} = -k \int_{r_i}^{r_f} \frac{dr}{r^2} = k \left( \frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_i} \right)$$

## 34 Potenza

La potenza è la velocità con cui viene sviluppata una forza:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = \frac{L}{t}$$

La potenza è una quantità scalare e si misura in  $\frac{J}{s} = W$  (watt). Possiamo dimostrare la formula sopra riportata con:

$$P = \frac{dL}{dt} = \frac{d}{dt} \int \vec{F} \cdot d\vec{r} = \frac{d}{dt} (\vec{F} \cdot \vec{v}) dt = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

## 35 Forze conservative

Una forza  $\vec{F}$  è detta conservativa se il lavoro che svolge non dipende dal percorso scelto  $\gamma$ , ma solamente dagli estremi. In simboli:

$$L = \int_{\vec{r}_0(\gamma)}^{\vec{r}_1} \vec{F} \cdot d\vec{L} = \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}_1} \vec{F} \cdot d\vec{L}$$

non dipende dal  $\gamma$ , ma solamente da  $r_0$  e  $r_1$ . Esempi di forze conservative sono la gravità, la forza elettrostatica e la forza elastica. Esempi di forze non conservative sono invece l'attrito dinamico e l'attrito viscoso.

Si consideri una forza  $\vec{F}$ . Per ogni linea chiusa  $\gamma$  si ha:

$$\oint_{\gamma} \vec{F} \cdot d\vec{l} = 0 \Rightarrow L = \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}_1} \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

Ciò si dimostra prendendo sul percorso chiuso due linee arbitrarie  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ , con gli estremi coincidenti:

$$\oint_{\gamma} \vec{F} \cdot d\vec{l} = 0 = \int_{\vec{R}_0(\gamma_1)}^{\vec{R}_1} \vec{F} \cdot d\vec{L} + \int_{\vec{R}_1(\gamma_2)}^{\vec{R}_0} \vec{F} \cdot d\vec{L} = \int_{\vec{R}_0(\gamma_1)}^{\vec{R}_1} \vec{F} \cdot d\vec{L} - \int_{\vec{R}_0(\gamma_2)}^{\vec{R}_1} \vec{F} \cdot d\vec{L}$$

ovvero:

$$\int_{\vec{R}_0(\gamma_1)}^{\vec{R}_1} \vec{F} \cdot d\vec{L} = \int_{\vec{R}_0(\gamma_2)}^{\vec{R}_1} \vec{F} \cdot d\vec{L}$$

Quindi, se per una forza  $\vec{F}$  su un percorso chiuso  $\gamma$  si ha:

$$\oint_{\gamma} \vec{F} \cdot d\vec{L} = 0 \Rightarrow \int_{\vec{R}_0(\gamma_1)}^{\vec{R}_1} \vec{F} \cdot d\vec{L} = \int_{\vec{R}_0(\gamma_2)}^{\vec{R}_1} \vec{F} \cdot d\vec{L}$$

Ovvero la forza dipende solamente dalla posizione iniziale e finale per qualsiasi  $\gamma$ . In altre parole:

$$L = \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}_1} \vec{F} \cdot d\vec{L} = f(\vec{R}_0, \vec{R}_1)$$

il lavoro è funzione di  $\vec{R}_0$  e  $\vec{R}_1$ .

## 36 Campo di forza e linee di forza

Un campo di forze è un campo vettoriale, ovvero una funzione  $\vec{F}(x, y, z)$  delle componenti  $x, y, z$ . Rappresenta l'insieme di valori che una grandezza fisica (in questo caso una forza) assume in un certo punto dello spazio. Una **linea di forza** è una linea formata dall'involuppo delle direzioni della forza nella regione del campo. La direzione della forza è in ogni punto tangente alla linea di forza. Notiamo che le linee di forza non possono intersecarsi. Inoltre, un campo di forza conservativo non può contenere linee chiuse. Una **superficie equipotenziale** è una superficie perpendicolare in ogni punto alla direzione delle linee di forza.

## 37 Energia potenziale

Se una forza è conservativa allora esiste una funzione della posizione del punto materiale tramite la quale si può esprimere il lavoro:

$$L_{A \rightarrow B_1} = L_{A \rightarrow B_2} = L_{A \rightarrow B} = f(A, B)$$

Chiamiamo allora variazione di energia potenziale l'integrale:

$$\Delta U = U(\vec{R}) - U(\vec{R}_0) = -L_{\vec{R}_0 \rightarrow \vec{R}} = - \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}} \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

al pari di qualche costante. L'energia potenziale è l'opposto del lavoro, ed entrambe si misurano in Joule. Sulle superfici equipotenziali l'energia potenziale è costante.

### Energia potenziale gravitazionale nelle vicinanze della superficie terrestre

Abbiamo che, vicino alla crosta terrestre, l'energia potenziale è maggiore tanto quanto aumenta la nostra altitudine, ovvero:

$$U(Z) - U(Z_0) = L_{Z_0 \rightarrow Z} = - \int_{Z_0}^Z M\vec{g} \cdot d\vec{l} = MgZ - MgZ_0 = Mgh$$

$$U(Z) = MgZ + \text{const.}$$

Prendiamo  $U(Z_0) = MGZ_0$ :

$$U(Z) = MgZ$$

### Energia potenziale di una molla

Ricordiamo che per una molla:

$$L_{x_i, x_f} = \int_{x_i}^{x_f} \vec{F} \cdot d\vec{r} = - \int_{x_i}^{x_f} kx dx = -\frac{k}{2}(x_f^2 - x_i^2) = \frac{k}{2}(l_i - l_0)^2 - \frac{k}{2}(l_f - l_0)^2$$

Dove si nota che il lavoro dipende unicamente dalla lunghezza iniziale  $l_i$  e finale  $l_f$  della molla. Possiamo cambiare variabile indicando con  $x$  la lunghezza della molla:

$$U(x) - U(x_i) = -L = \frac{k}{2}(x - l_0)^2 - \frac{k}{2}(l_f - l_0)^2$$

Ponendo l'origine delle coordinate in  $l_0$ :

$$U(x) - U(x_i) = -L = \frac{k}{2}(x - l_0)^2$$

### Conseguenze delle forze conservative

Dalla definizione di differenza di energia potenziale deriva:

$$U(\vec{R}) - U(\vec{R}_0) = - \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}} \vec{F} \cdot d\vec{l} \Rightarrow U(\vec{R}) = U(\vec{R}_0) - \int_{R_0}^R \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

Che sulle componenti diventa:

$$U(x, y, z) = U(x_0, y_0, z_0) - \int_{(x_0, y_0, z_0)}^{(x, y, z)} (F_x dx + F_y dy + F_z dz)$$

da cui:

$$F_x = -\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial x} \quad F_y = -\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial y} \quad F_z = -\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial z}$$

Che si riassume in:

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}U$$

Ovvero, in qualsiasi punto del campo dell'energia potenziale possiamo ricavare su un intorno il vettore forza come gradiente.

### Modelli d'analisi basati sull'energia

L'energia e il lavoro forniscono un modello d'analisi fisico spesso più conveniente di quello della cinematica. Prendiamo in esempio il moto di un punto materiale sul piano inclinato: il corpo inizia il suo moto alla base del piano (inclinato di angolo  $\theta$ ) con una certa velocità  $v_0$ . Risale il piano per una certa distanza  $l$ , ostacolato dalla forza d'attrito (con coefficiente di attrito dinamico  $\mu_d$ ) e dalla forza gravitazionale  $g$ . Ci chiediamo quale sia la posizione massima raggiunta dal punto materiale, e quale sia, una volta iniziata la sua discesa da dato punto, la velocità con cui ripassa dalla posizione di partenza. Vediamo le forze agenti sul punto materiale: la forza peso  $mg$ , diretta verso  $-\hat{j}$ , che possiamo dividere nelle due componenti parallele e perpendicolari alla superficie del piano. Abbiamo poi la reazione vincolare del piano  $N$ , parallela alla componente perpendicolare della forza peso che andrà ad annullare (e quindi perpendicolare alla superficie del piano). Abbiamo infine la forza di attrito, proporzionale ad  $|N|$ , e diretta nella direzione opposta alla velocità  $\vec{v}_0$  del corpo.

### Spostamento massimo, approccio cinematico

Possiamo impostare:

$$F_p = -mg, \quad F_{p\perp} = -mg \cos \theta, \quad F_{o\parallel} = -mg \sin \theta$$

con  $N = -F_{p\perp} = mg \cos \theta$ . A questo punto l'attrito sarà:

$$F_{att} = -\mu_d |N| = -\mu_d mg \cos \theta$$

Abbiamo già detto che la forza gravitazionale nella direzione perpendicolare al piano viene annullata dalla reazione  $N$ , e quindi l'unica componente che rimane a determinare l'accelerazione è:

$$F = ma = \mu_d N + mg \sin \theta \Rightarrow a = g(\sin \theta + \mu_d \cos \theta)$$

Siamo nel caso del moto rettilineo uniformemente accelerato (nella direzione parallela al piano), e possiamo quindi impostare le leggi orarie:

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

Imponendo  $v = 0$ , come accadrà nel punto di altezza massima (e quindi di cambio direzione), avremo che:

$$v_0 = g(\sin \theta + \mu_d \cos \theta) t \Rightarrow t = \frac{v_0}{g(\sin \theta + \mu_d \cos \theta)}$$

Da cui ricaviamo lo spostamento (chiamiamolo  $l = s$ ):

$$l = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 = \frac{v_0^2}{2g(\sin \theta + \mu_d \cos \theta)}$$

### **Spostamento massimo, approccio energetico**

Impostiamo la differenza dell'energia cinetica, applicando il teorema delle forze vive:

$$K_f - K_i = L_{att} + L_{mg}$$

Ricaviamo il lavoro svolto dalla forza di attrito:

$$L_{att} = \int_0^l \mu_d mg dx = -\mu_d mgl \cos \theta$$

e dalla forza peso:

$$L_{mg} = \int_0^l mg \sin \theta = mgl \sin \theta$$

Diciamo che la variazione di energia cinetica  $\Delta K$  è uguale a a:

$$\Delta K = -\frac{1}{2} m v^2 = -\mu_d mgl \cos \theta - mgl \sin \theta$$

da cui si ottiene:

$$l = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 = \frac{v_0^2}{2g(\sin \theta + \mu_d \cos \theta)}$$

Notiamo che attraverso entrambi gli approcci otteniamo risposte identiche, ma l'approccio energetico richiede meno calcoli (soprattutto vettoriali!). Concludiamo ricavando attraverso entrambi gli approcci la velocità di ritorno attraverso il punto di partenza.

### **Velocità di ritorno, approccio cinematico**

In questo il corpo parte da distanza  $l$  dall'inizio del piano, con velocità iniziale nulla. Forza gravitazionale e forza di attrito saranno discordi:

$$F = ma = mg \sin \theta - \mu_d mg \cos \theta, \quad a = g(\sin \theta - \mu_d \cos \theta)$$

che sostituito nelle legge orarie:

$$\begin{cases} s = \frac{1}{2} a t^2 \\ v = a t \end{cases}$$

fornisce:

$$t = \sqrt{\frac{2l}{a}}, \quad v^2 = 2la = 2lg(\sin \theta - \mu_d \cos \theta)$$

### **Velocità di ritorno, approccio cinematico**

Impostiamo in modo analogo a prima il lavoro svolto dalla forza di gravità e di attrito sul punto materiale, ponendoli adesso discordi:

$$L_{att} = -\mu_d mgl \cos \theta, \quad L_{mg} = mgl \sin \theta$$

che possiamo eguagliare alla variazione di energia cinetica:

$$\Delta K = \frac{1}{2} Mv^2 = -\mu_d mgl \cos \theta + mgl \sin \theta$$

Da cui si ricava subito  $v$ :

$$v^2 = 2lg(\sin \theta - \mu_d \cos \theta)$$

Ancora una volta, i risultati coincidono (che è come dovrebbe essere!), e l'approccio energetico risulta più agile nei calcoli.

## **38 Equilibrio**

Il grafico dell'energia potenziale ci permette di ottenere informazioni riguardanti l'equilibrio del sistema studiato. In particolare, distinguiamo i casi:

- Punto stazionario, massimo locale: si parla di equilibrio instabile. Una minima variazione delle condizioni del sistema porterebbe all'alterazione di esso, probabilmente verso un punto di equilibrio stabile
- Punto stazionario, minimo locale: si parla di equilibrio stabile. Una variazione delle condizioni del sistema sufficientemente piccola non ha grandi conseguenze sul sistema, che torna naturalmente al suo stato di equilibrio
- Punto stazionario, funzione costante in un suo intorno: si parla di equilibrio indifferente. Il sistema non reagisce a minime variazioni delle sue condizioni.

## 39 Energia meccanica e principio di conservazione dell'energia meccanica

Riprendiamo il teorema delle forze vive:

$$K_f - K_i = L_{totale} = L_{cons} + L_{non\ cons} = -(U_f - U_i) + L_{non\ cons}$$

Definiamo allora l'**energia meccanica**:

$$E = K + U$$

per cui la formula precedente diventa:

$$K_f + U_f - (K_i + U_i) = E_f - E_i = L_{non\ cons}$$

noto anche come **principio di conservazione dell'energia meccanica**. In particolare, se on ci sono forze non conservative, o se ci sono ma compiono lavoro nullo:

$$E(P) = K(P) + U(P) = \text{const.} = K(P_1) + U(P_1)$$

su due punti  $P$  e  $P_1$  arbitrari.

## 40 Applicazioni della conservazione dell'energia

Vediamo alcuni esempi di problemi che richiedono l'applicazione del principio di conservazione dell'energia.

### **Pendolo sul piano verticale senza attrito**

Poniamo un pendolo, ovvero una massa legata da un filo di lunghezza  $r$  a un perno centrale. Vogliamo spingere la massa, modellizzata come un punto materiale, dal punto più basso  $P_1$  a quello più alto  $P_2$  della circonferenza, e vogliamo quindi calcolare la velocità minima con cui il punto deve partire da  $P_1$ . Notiamo che non basterà raggiungere  $P_1$ , ma dovremo raggiungerlo con una velocità tale da proseguire il moto circolare senza cadere per via della gravità. Notiamo inoltre che l'unico punto critico sarà  $P_2$ , in quanto il suo raggiungimento (e superamento) significa anche il raggiungimento di tutti gli altri punti ad esso sottostanti.

Cerchiamo innanzitutto la velocità minima necessaria all'arrivo sulla verticale. La reazione del filo sarà:

$$T = mg \cos \theta + m \frac{v^2}{r} \geq 0$$



Una  $T$  maggiore di zero ci assicura che il filo sta esercitando una forza per mantenere la massa in rotazione, e quindi che è in tensione. Poniamo quindi:

$$\frac{v^2}{r} \geq -g \cos \theta, \quad v_{P_2} = \sqrt{gr \cos \theta}$$

Infine, prendiamo  $v_{P_2}$ , con  $\theta = \pi$ :  $v_{P_2} = \sqrt{gr}$  in valore assoluto.

Utilizziamo allora il principio della conservazione dell'energia: sappiamo che:

$$\Delta K = -\Delta U$$

ovvero la variazione di energia cinetica è uguale all'opposto della variazione di energia potenziale. La variazione di energia cinetica equivale alla differenza fra l'energia cinetica alla velocità minima appena trovata (nel caso peggiore, più lento possibile) e quella alla velocità  $v_i$  che volevamo cercare:

$$\Delta K = \frac{1}{2}mv_{P_2}^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}mgr - \frac{1}{2}mv_i^2$$

Posto poi l'origine del sistema di riferimento alla base della circonferenza, avremo che l'energia potenziale è 0 in  $P_1$ , ergo la sua variazione una volta toccato  $P_2$  sarà:

$$\Delta U = 2mgr$$

Possiamo allora impostare:

$$\frac{1}{2}mgr - \frac{1}{2}mv_i^2 = -2mgr$$

da cui si ricava la velocità iniziale necessaria,  $v_i = \sqrt{5gr}$ .

### **Pendolo sul piano verticale senza attrito, $\theta$ arbitrario**

Cerchiamo di trovare la velocità necessaria al raggiungimento di angoli  $\theta_0$  arbitrari. Definiamo l'energia potenziale, invece che in funzione dell'altezza massima  $2r$ , in funzione dell'angolo, con:

$$U(\theta) = mgL(1 - \cos \theta)$$

Avremo dalla conservazione dell'energia che:

$$U(0) + \frac{1}{2}mv^2 = U(\theta_0) + \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = mgL(1 - \cos \theta_0)$$

visto che la potenziale all'istante 0 è nulla, come è nulla l'energia cinetica nel punto che vogliamo raggiungere (che sarà di cambio direzione). Da questo otteniamo  $v_0 = \sqrt{2gL(1 - \cos \theta)}$ .

### Pendolo oscillante

Descriviamo adesso il fenomeno oscillatorio presentato dal pendolo. Possiamo individuare le forze agenti sulla sua massa in direzione radiale:

$$-T + mg \cos \theta = ma_r = -m \frac{v^2}{r}$$

e tangenziale:

$$-mg \sin \theta = ma_\theta = m \frac{dv}{dt}$$

Il moto analizzato è effettivamente un moto circolare vario, con accelerazione centripeta in direzione radiale, e inoltre accelerazione variabile in direzione longitudinale. Conviene definire quest'ultima in funzione della velocità tangenziale, sfruttando l'equivalenza dell'arco  $s = L\theta$ :

$$v(t) = \frac{ds}{dt} = \frac{dL\theta}{dt} = L \frac{d\theta}{dt} = L\omega(t)$$

$$a_\theta(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d\omega}{dt} = L \frac{d\omega}{dt} = L \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

da cui ricaviamo nuovamente la componente tangenziale:

$$-mg \sin \theta = mL \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

ma stavolta in funzione di una derivata di  $\theta$ . Questo ci permette di impostare l'equazione differenziale:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{L} \sin \theta = 0$$

Notiamo che compare la funzione seno. Per piccoli angoli  $\theta$  conviene usare l'approssimazione  $x$  per il seno, ovvero la sua formula di Taylor di primo grado centrata in 0 (quindi formula di MacLaurin...):

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{L} \theta = 0 \Rightarrow \frac{d^2\theta}{dt^2} + \Omega^2 \theta = 0, \quad \Omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

Che è l'equazione differenziale del moto armonico, e ha come soluzione:

$$\omega t = A \cos \Omega t + \phi$$

con pulsazione  $\Omega$  e periodo  $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ . Come sempre, le costanti si determinano dalle condizioni iniziali di velocità e posizione.

## 41 Sistemi di riferimento inerziali

Si riportano alcuni esempi di applicazione della relatività galileiana.

### 41.1 Treno in moto

Facciamo l'esempio di un treno in moto con velocità  $v_0$  costante. Sul treno, un passeggero lascia cadere un gesso che si muove spinto dall'accelerazione gravitazionale  $g$ . Sia  $S'$  il sistema di riferimento del treno, e  $S$  il sistema di riferimento di laboratorio (poniamo della banchina), e siano i due sistemi di riferimento coincidenti nell'istante in cui si lascia cadere il gesso. Possiamo applicare le trasformazioni di Galileo:

$$\begin{cases} \vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}_0 t \\ \vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0 \\ \vec{a} = \vec{a}' \end{cases}$$

in  $t = 0$  le coordinate del gesso sono identiche nei due sistemi, e il gesso ha velocità iniziale nulla e accelerazione  $-g\hat{y}$  sull'asse verticale identica nei due sistemi. Sia  $(x_0, y_0)$  la posizione iniziale del gesso, la sua posizione rispetto al treno sarà allora:

$$\vec{r}' = (x_0, y_0 - \frac{1}{2}gt^2)$$

Applicando le trasformazioni galileiane avremo che, rispetto al laboratorio:

$$\vec{a} = -g\hat{y}, \quad \vec{v} = v_0\hat{x} - g\hat{y}, \quad \vec{r} = (x_0 + v_0t, y_0 - \frac{1}{2}gt^2)$$

Avremo allora che il tempo impiegato a toccare terra sarà uguale nei due sistemi di riferimento sarà identico:

$$t^* = \sqrt{\frac{2y_0}{g}}$$

mentre le velocità saranno diverse:

$$\vec{v}'(t^*) = -\sqrt{2gy_0}\hat{y}, \quad \vec{v}(t^*) = v_0\hat{x} - \sqrt{2gy_0}\hat{y}$$

### 41.2 Angolo della pioggia

Calcoliamo l'angolo ottimale a cui va tenuto un ombrello se ci sposta con velocità  $v_u$  di 3m/s e la pioggia cade a  $v_p$  di 8m/s. Applicando le trasformazioni avremo che:

$$\vec{v}'_p = \vec{v}_p - v_u\hat{x}$$

L'angolo di  $\vec{v}_p'$ , ovvero la velocità della pioggia nel sistema di riferimento dell'uomo, sarà allora:

$$\tan^{-1} \frac{v_u}{v_p} = 20.55^\circ$$

### 41.3 Barca con velocità relativa

Una barca parte dall'origine e si dirige verso la riva opposta di un fiume di larghezza  $L$  dove la corrente scorre con velocità  $V_A$  costante. La barca, di per sé, si muove con velocità  $V_B$  costante verso la riva, mantenendosi sempre perpendicolare al fiume. Calcoliamo allora il punto  $K$  dove la barca arriva a riva. Avremo un sistema di riferimento  $S'$  solidale all'acqua, dove:

$$\vec{v}_0 = -V_A \hat{x}, \quad \vec{v}' = V_B \hat{y}$$

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0 = (V_A, V_B)$$

Il tempo impiegato a toccare riva sarà:

$$t = \frac{L}{V_B}$$

E avremo quindi che il punto  $K$  sarà dato da:

$$\vec{K} = (V_A t, V_B t) = (V_A t, L)$$

Mettiamo che il punto  $K$  si trovi oltre una pericolosa cascata: avremo quindi bisogno di opporci alla corrente per raggiungere un secondo punto, detto  $H$ , più vicino. La velocità  $V_B$  della barca non sarà quindi perpendicolare alla riva, ma formerà con essa un certo angolo  $\theta$ :

$$\vec{v}' = \vec{V}_B = -V_B \cos \theta \hat{x} + V_B \sin \theta \hat{y}$$

da cui:

$$\vec{v} = (V_A - V_B \sin \theta, V_B \cos \theta) = (0, V_B \cos \theta)$$

Il tempo di raggiungimento della riva sarà allora:

$$t = \frac{L}{V_B \cos \theta}$$

Abbiamo chiaramente che:

$$\frac{L}{V_B} \leq \frac{L}{V_B \cos \theta}$$

ovvero, opporsi alla corrente significa evitare la cascata, ma anche impiegare un tempo maggiore a raggiungere la riva!

## 42 Sistemi di riferimento uniformemente accelerati

Prendiamo adesso in considerazione un sistema di riferimento mobile  $SM$  in moto con velocità  $\vec{v}_t$  e accelerazione costante  $\vec{a}_t$ . Il moto di  $SM$  va considerato come puramente traslatorio, i suoi assi non ruotano. La relazione fra le posizioni diventa quindi:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_{OO'}(t)$$

che deriveremo in:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_t, \quad \vec{v}_t = \frac{d\vec{r}_{OO'}}{dt}$$

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_t, \quad \vec{a}_t = \frac{d\vec{v}_t}{dt}$$

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_r$$

Ovvero:

$$\begin{cases} \vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_{OO'}(t) \\ \vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_t \\ \vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_T \end{cases}$$

Si noti che nel sistema di riferimento accelerato non vale l'inerzia. Se in un sistema di riferimento inerziale si ha:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = m(\vec{a} + \vec{a}_r)$$

nel sistema accelerato questa legge non vale:

$$m\vec{a}' = \sum \vec{F} - m\vec{a}_T$$

E si osserva una forza, detta forza apparente, pari a  $\vec{F}_a = -m\vec{a}_T$ :

$$\sum \vec{F} - m\vec{a}_T = \sum (\vec{F} + \vec{F}_{app})$$

Una forza apparente non è data da l'interazione fra due corpi, ma dall'inerzia. Per essa non vale il terzo principio della dinamica (azione e reazione). La stessa cosa non si osserva in un sistema inerziale (e qui dovrebbe diventare chiaro) in quanto:

$$m\vec{a}_T = 0 \Rightarrow \vec{F}_{app}, \quad m\vec{a} = \sum \vec{F} + 0$$

## 42.1 Treno in frenata

Consideriamo lo stesso treno di prima, che dopo un tratto a velocità costante  $v_0$ , inizia a frenare e si arresta in tempo  $t$ . Un passeggero di massa  $m$ , che resta seduto durante la frenata, percepisce una certa forza apparente, pari a  $ma_T$ , dove  $a_T$  è l'accelerazione del treno in frenata, data da:

$$a_T = \frac{v_0}{t}$$

Quando il treno si ferma, rispetto al treno il viaggiatore è fermo, ergo  $|\vec{a}| = 0$ , e:

$$m\vec{a} = \sum (\vec{F} + \vec{F}_{app}) = 0 \Rightarrow \sum \vec{F} = -\vec{F}_{app} = m\vec{a}_T$$

## 42.2 Cartellina sul tettuccio

Un signore sbadato dimentica sul tettuccio della sua automobile una cartellina, prima di partire di moto rettilineo uniformemente accelerato. Vogliamo calcolare il coefficiente di attrito statico minimo fra la cartellina e il tettuccio dell'automobile necessario a non farla scivolare via. Nel sistema di riferimento della cartellina, avremo una forza apparente data dall'accelerazione dell'automobile:

$$F_{app} = -m\vec{a}_T$$

E una forza d'attrito:

$$F_s = mg\mu_s$$

diretta nella direzione dello spostamento dell'automobile. La condizione di equilibrio sarà raggiunta quando queste due forze (di cui una apparente!) si eguaglieranno in modulo (in modo da annullarsi):

$$m\vec{a}_T = mg\mu_s, \quad \mu_s = \frac{\vec{a}_T}{g}$$

Mettiamo che il coefficiente di attrito effettivo  $\mu_s$  sia minore del coefficiente ottimale appena calcolato. In questo caso la cartellina scivola via opposta da una forza di attrito dinamico con coefficiente  $\mu_d$ . Possiamo calcolare l'accelerazione subita dalla cartellina nel sistema di riferimento dell'automobile e di laboratorio (fermo rispetto alla cartellina e all'automobile). Da terra vedremo che l'unica accelerazione a cui è sottoposta la cartellina è quella dell'attrito dinamico:

$$m\vec{a} = F_d = mg\mu_d$$

mentre dal punto di vista dell'automobile l'accelerazione è pari alla differenza fra l'accelerazione impressa dall'attrito dinamico e quella propria dell'automobile stessa:

$$m\vec{a}' = F_d - ma_T = mg\mu_d - ma_T$$

### 42.3 Treno accelerato

Un treno si muove sui binari di moto rettilineo uniformemente accelerato. In un certo istante, diciamo  $t = 0$  (con treno in partenza da fermo), viene lanciata una monetina con una certa velocità iniziale verso l'alto  $v_0$ . Ci poniamo il problema di calcolare la distanza sul pavimento del treno a cui atterra la monetina, ovvero lo spazio percorso dalla monetina lungo l'asse  $x$ , nel sistema di riferimento del treno, una volta caduta nuovamente a terra. Impostando le relazioni:

$$\begin{cases} \vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_{OO'}(t) \\ \vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_t \\ \vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_T \end{cases}$$

osserviamo che, sul sistema di riferimento del treno non è accelerato rispetto all'asse  $y$ , ergo sull'asse verticale il moto uniformemente accelerato della monetina in caduta libera si svolge in modo identico a quanto si sarebbe svolto in un sistema di riferimento inerziale. A questo punto la velocità percorsa dalla monetina sarà uguale alla distanza percorsa dal treno nel tempo che la monetina impiega a cadere nuovamente a terra (questo rispetto al treno, avessimo voluto calcolare la distanza rispetto a terra avremmo dovuto tenere conto della velocità iniziale della monetina lungo la direzione di spostamento del treno, che potrebbe essere stata maggiore di zero per  $t > 0$ ). Possiamo quindi calcolare il tempo di caduta della monetina sull'asse verticale:

$$h = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2, \quad t_1 = 0, \quad t_2 = \frac{2v_0}{g}$$

dove le due soluzioni della quadratica rappresentano il punto di partenza a  $t = 0$ , quando la monetina è chiaramente al livello del pavimento, e il punto di atterraggio che a noi interessa. A questo punto calcoliamo la distanza percorsa dal treno nel tempo calcolato (che potremmo chiamare  $t^*$ ):

$$d = \frac{1}{2}at^{*2} = \frac{2av_0^2}{g^2}$$

dove si è chiaramente assunto spostamento e velocità iniziale del treno come nulle.

Potremo allora porci il problema, leggermente più complesso, di ricavare la traiettoria percorsa dalla monetina nel sistema di riferimento del treno, come in quello di laboratorio (che non sono uguali!):

- **Traiettoria nel S.R. di laboratorio:** possiamo applicare le relazioni impostate prima, con le leggi orarie dei moti verticali ed orizzontali della monetina:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_{OO'}(t), \quad \vec{r}_{OO'}(t) = \vec{r}_{OO'}(0) + \vec{v}_{OO'}(0)t + \frac{at^2}{2}\hat{x}$$

$$\vec{r}' = -\frac{at^2}{2}\hat{x} + \left(-\frac{gt^2}{2} + v_0t\right)\hat{y}$$

da cui:

$$\vec{r} = \left(-\frac{gt^2}{2} + v_0t\right)\hat{y} + \vec{r}_{OO'}(0) + \vec{v}_{OO'}(0)t$$

che è l'equazione (simmetrica) di una parabola.

- **Traiettoria nel S.R. del treno:** nel sistema di riferimento del treno, potremo assumere  $g'$  come la nostra forza di gravità, composta non solo dalla componente verticale  $g\hat{y}$ , ma anche dalla componente orizzontale data dall'accelerazione del treno  $-a_T\hat{x}$ . Modulo e angolo di questa forza saranno rispettivamente:

$$|g'| = \sqrt{a^2 + g^2}, \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{a}{g}\right)$$

Il risultato, come nel caso precedente, sarà una parabola, ma questa volta asimmetrica: l'asse sarà infatti parallelo alla direzione della "nuova" accelerazione di gravità percepita all'interno del treno, e avrà quindi angolo:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{a}{g}\right)$$

Può essere interessante considerare la traiettoria della monetina nel caso il treno si muova di moto rettilineo uniforme anziché uniformemente accelerato.

- **Traiettoria nel S.R. di laboratorio:** visto che la monetina viene lanciata con una velocità iniziale pari a quella del treno, si ha dalle relazioni galileiane che la velocità sull'asse x è:

$$v_x = v'_x + v_0, \quad v'_x = v_0 \Rightarrow v_0 = 0$$

ergo la monetina resta ferma sull'asse x, parte da un punto sul pavimento del treno e atterra esattamente al solito posto.



- **Traiettoria nel S.R. del treno:** il caso sarà qui analogo agli esempi visti prima, la legge oraria sarà infatti:

$$\vec{r} = (v_0 t, v_i t - \frac{1}{2} g t^2)$$

che è la traiettoria di una parabola simmetrica (come conseguenza, qui anche più chiara, del teorema della funzione implicita).

## 43 Sistemi di riferimento rotanti

Consideriamo il caso in cui il nostro sistema mobile non inerziale ruota con una certa velocità angolare  $\vec{\omega}$ . Si può ricavare l'accelerazione di trascinamento:

$$\vec{a}_T = 2\vec{\omega} \times \vec{v}' - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) = 2\vec{\omega} \times \vec{v}' - \omega^2 \vec{R}$$

Da cui si ha la relazione fra accelerazioni:

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_T = \vec{a}' + 2\vec{\omega} \times \vec{v}' - \omega^2 \vec{R}$$

Dove:

- $2\vec{\omega} \times \vec{v}'$  è l'accelerazione di Coriolis, dipendente dalla velocità del SM sul sistema in rotazione.
- $-\omega^2 \vec{R}$  è un'accelerazione centrifuga dovuta alla forza centripeta che mantiene l'oggetto in rotazione.

Possiamo quindi esprimere le forze apparenti con:

$$m\vec{a}' = \sum \vec{F} + \vec{F}_{app} \Rightarrow \vec{F}_{app} = m(-2\vec{\omega} \times \vec{v}' + \omega^2 \vec{R})$$

dove le due componenti di  $\vec{F}_{app}$  rappresentano rispettivamente la forza di Coriolis e la forza centrifuga.

Possiamo dimostrare che queste due componenti sono necessarie facendo l'esempio di un moto circolare uniforme, e osservando la relazione fra l'accelerazione osservata dal punto in rotazione e quella osservata da un sistema di riferimento inerziale fermo rispetto al moto. Sia  $\vec{a}'$  l'accelerazione rispetto al sistema in quiete, abbiamo:

$$\vec{a}' = -\omega^2 \vec{R}, \quad \vec{v} = -\vec{\omega} \times \vec{R}$$

che sono le formule dell'accelerazione centripeta e della velocità tangenziale di un punto in rotazione di moto circolare uniforme. Possiamo allora applicare la relazione:  $\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_T$ , con  $\vec{a}_T$  accelerazione apparente:

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_T \Rightarrow \vec{a}' = \vec{a} - \vec{a}_T$$

$$\vec{a}' = \vec{a} - 2\vec{\omega} \times \vec{v}' + \omega^2 \vec{R}$$

A questo punto, sappiamo  $\vec{a}$  essere nulla in quanto il punto in rotazione è effettivamente in quiete rispetto al suo sistema di riferimento (non inerziale), ergo:

$$\Rightarrow \vec{a}' = -2\omega^2 \vec{R} + \omega^2 \vec{R} = -\omega^2 \vec{R}$$

che è coerente con quanto detto prima.

Dal punto di vista opposto, ovvero con  $\vec{a}'$  uguale all'accelerazione del punto in rotazione dal suo stesso punto di riferimento, avremo:

$$\vec{a}' = 0, \quad \vec{a} = -\omega^2 \vec{R}, \quad \vec{v} = -\vec{\omega} \times \vec{R}$$

di cui le ultime due analoghe al caso precedente. Possiamo allora applicare nuovamente la relazione:

$$\vec{a}' = \vec{a} - 2\vec{\omega} \times \vec{v}' + \omega^2 \vec{R} = -\omega^2 \vec{R} + \omega^2 \vec{R} = 0$$

che è nuovamente coerente con quanto detto prima, come dovrebbe essere.

### **Dimostrazione dell'accelerazione di trascinamento**

Diamo adesso una dimostrazione formale della formula riportata sopra. Impostiamo, come prima,  $S$  come sistema di riferimento stazionario, e  $S'$  come sistema in rotazione. Avremo allora le relazioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_{OO'}(t) \\ \vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_t \\ \vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_T \end{array} \right.$$

Notiamo a questo punto che per una qualsiasi posizione  $\vec{r}'$  rispetto al sistema mobile  $S'$ , la relativa posizione in  $S$  sarà, in termini di derivate:

$$\frac{d}{dt}\vec{r} = \frac{d}{dt}\vec{r}' + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (1)$$

e visto che la derivata della posizione non è altro che la velocità, avremo anche:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (2)$$

Useremo queste due ultime equazioni nel corso della dimostrazione. Impostiamo allora l'accelerazione, come definita dalla relazione precedente:

$$\vec{a} = \frac{d}{dt}\vec{v} = \frac{d}{dt}(\vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{r}) = \frac{d}{dt}\vec{v}' + \frac{d}{dt}(\vec{\omega} \times \vec{r})$$

si applica la (2) e la regola di derivazione del prodotto (vettoriale):

$$= \frac{d}{dt}\vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{v}' + \frac{d}{dt}\vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \frac{d}{dt}\vec{r}$$

si applica la (1), e si riconosce che  $\frac{d}{dt}\vec{v}' = \vec{a}'$  e  $\frac{d}{dt}\vec{r}' = \vec{v}'$ :

$$= \frac{d}{dt}\vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{v}' + \frac{d}{dt}\vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \left(\frac{d}{dt}\vec{r}' + \vec{\omega} \times \vec{r}\right) = \frac{d}{dt}\vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{v}' + \frac{d}{dt}\vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \vec{v}' + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$$

Da cui l'equazione finale:

$$\vec{a} = \vec{a}' + \frac{d}{dt}\vec{\omega} \times \vec{r} + 2\vec{\omega} \times \vec{v}' + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$$

di cui notiamo l'ultimo fattore può essere riportato anche come  $(-\omega^2\vec{r})$ . Classifichiamo tutti i termini dell'equazione:

- $\vec{a}'$  è semplicemente l'accelerazione rispetto al sistema di riferimento mobile;
- $\frac{d}{dt}\vec{\omega} \times \vec{r}$  è una forza (qua accelerazione) conseguente della variazione di velocità angolare del moto, nota come forza di Eulero;
- $2\vec{\omega} \times \vec{v}'$  è l'accelerazione di Coriolis, che agisce su corpi in movimento rispetto al sistema di riferimento mobile, e influenza ad esempio le correnti dei venti terrestri, provocando fenomeni quali gli uragani (che sulla terra girano in senso antiorario sopra l'equatore e orario sotto).
- $\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$  oppure  $(-\omega^2\vec{r})$  è l'accelerazione centrifuga.

Tutte queste forze sono apparenti! Esistono soltanto come conseguenza del sistema di riferimento scelto, e non dall'interazione fra corpi. In questo non rispettano le leggi di Newton.

## 44 Quantità di moto

La quantità di moto è una grandezza vettoriale definita come:

$$\vec{P} = m\vec{v}$$

dove  $m$  è la massa di un corpo e  $v$  la sua velocità in un dato istante. Si misura in  $\text{kg}\cdot\text{m/s}$ .

### Quantità di moto e leggi di Newton

La quantità di moto ci permette di riformulare il primo principio della dinamica, riguardante l'inerzia, specificando che la quantità di un punto materiale isolato resta costante: la sua massa non varia, e per inerzia nemmeno la sua velocità.

$$\Delta\vec{p} = \vec{p}(f) - \vec{p}(i) = \int_i^f \vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{p} = \text{const.}$$

Se invece una forza (e quindi un'accelerazione) agisce sul corpo cambiandone la velocità, la quantità di moto varierà come:

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

## 45 Impulso di una forza

L'impulso di una forza è definito, fra due istanti  $t_0$  e  $t$ , come:

$$\vec{I}_{t_0 \rightarrow t} = \int_{t_0}^t \vec{F} dt'$$

L'impulso è una grandezza vettoriale espressa in  $\text{kg}\cdot\text{m/s}$ , la stessa unità di misura della quantità di moto. Si può quindi dimostrare:

### Teorema dell'impulso

La variazione della quantità di moto  $\Delta\vec{p}$  di un punto materiale è pari all'impulso totale delle forze esterne:

$$\Delta\vec{p} = \Delta\vec{p}(t) - \Delta\vec{p}(t_0) = \int_{t_0}^t \vec{F} dt'$$

Questo si può dimostrare da:

$$\int_{t_0}^t \vec{F} dt' = \int_{t_0}^t m\vec{a} dt' = [m\vec{v}]_{t_0}^t = m\vec{v}(t) - m\vec{v}(t_0) = \vec{p}(t) - \vec{p}(t_0) = \Delta\vec{p}$$

## 46 Moto di un corpo composto

Un corpo composto non'è altro che un corpo formato da un insieme di punti materiali. Quando si considerano sistemi formati da più punti materiali connessi fra loro, occorre fare una distinzione fra:

- **Forze interne:** forze che sono interne al sistema, esercitate fra i corpi appartenenti al sistema fra di loro;
- **Forze esterne** forze che sono esterne al sistema. esercitate dall'ambiente sui punti materiali.

### Dinamica di un sistema di punti materiali

Per ciascuno dei punti materiali di un sistema possiamo scrivere:

$$m\vec{a}_i = \vec{R}_i$$

Dove  $\vec{R}_i$  è la risultante di tutte le forze sul punto materiale, interne ed esterne.

$$\sum m_i \vec{a}_i = \sum R_i^{est} + \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij} = \sum R_i^{est} + \sum_{j \neq i} \sum \vec{F}_{ij}$$

dove tutte le sommatorie da senza pedice sono da 1 a  $n$  numero di punti materiali nel sistema.

### Centro di massa di un sistema

Definiamo come centro di massa di un sistema il "punto medio" della massa:

$$\vec{r}_{CM} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i}$$

Definendo la massa del sistema  $M$  come:  $\sum m_i$  possiamo riscrivere come:

$$\vec{r}_{CM} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{M}$$

Le coordinate del punto di massa su  $x, y$  e  $z$  saranno a questo punto:

$$x_{CM} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, \quad y_{CM} = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}, \quad z_{CM} = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i}$$

Si può definire l'impulso del centro di massa  $\vec{P}_{CM}$  come l'impulso sulla massa  $M$ :

$$\vec{P}_{CM} = M \vec{v}_{CM} = \sum m_i \vec{v}_i$$

Dove dovremo definire la velocità del centro di massa  $\vec{V}_{CM}$ :

$$\vec{V}_{CM} = \frac{d\vec{r}_{CM}}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{M} = \frac{1}{M} \frac{d}{dt} \sum m_i \vec{r}_i = \frac{1}{M} \sum m_i \vec{v}_i$$

Questo ci permette di dire, riguardo all'impulso del centro di massa:

$$\vec{P}_{CM} = \sum \vec{p}_i = \sum m_i \vec{v}_i = M \vec{V}_{CM}$$

### Primo teorema del centro di massa

La quantità di moto totale di un sistema (ergo la somma delle quantità di moto di ogni punto del sistema) è uguale alla quantità di un punto materiale avente massa uguale alla massa del sistema e velocità uguale alla velocità del centro di massa del sistema:

$$P_{CM}^{\vec{}} = MV_{CM}^{\vec{}} = \sum m_i \vec{a}_i$$

### Forze interne di sistemi di punti materiali

Se prendiamo un sistema formato da più punti materiali soggetti sia a forze interne (fra di loro), sia a forze esterne (esercitate da altri corpi sul sistema), abbiamo dalle equazioni precedenti:

$$P_{CM}^{\vec{}} = MV_{CM}^{\vec{}} \Rightarrow \sum m_i \vec{a}_i = M a_{CM}^{\vec{}}$$
$$\sum m_i \vec{a}_i = \sum R_i^{est} + \sum \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij}$$

Se prendiamo il termine  $\sum R_i^{est} + \sum \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij}$ , abbiamo che la sommatoria  $\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} + \dots$  non è altro che la somma di tutte le forze interne del sistema, e quindi di ogni forza con la sua reazione, e non potrà che essere 0. Questo ci permette di enunciare la:

### Prima equazione cardinale dei sistemi

La variazione della quantità di moto di un sistema di punti materiali è uguale alla risultante delle forze esterne agenti sul sistema:

$$\frac{d}{dt} P_{CM}^{\vec{}} = \sum m_i \vec{a}_i = \sum R_i^{est}$$

### Secondo teorema del centro di massa

Il centro di massa di un sistema si muove come un punto materiale di massa uguale alla massa del sistema e sottoposto alla risultante delle forze esterne agenti sul sistema:

$$M a_{CM}^{\vec{}} = \sum R_i^{est}$$

## 47 Applicazioni di quantità di moto e centro di massa

Vediamo alcuni esempi che possono essere modellizzati attraverso centro di massa e quantità di moto.

### Esplosione di un proiettile a mezz'aria

Poniamo di avere un proiettile, come quelli già studiati, il cui moto comincia dall'origine, con una certa velocità  $v_0$  formante un certo angolo  $\theta$  con l'asse  $x$ . Nel punto di altezza massima del proiettile, esso esplode dividendosi in due pezzi. Il primo pezzo cade direttamente verso il basso, accelerato dalla gravità, mentre l'alto prosegue di moto parabolico. Si vuole calcolare le posizioni dove atterrano i due frammenti del proiettile. Inizialmente possiamo dire che le forze coinvolte nell'esplosione sono tutte interne, ergo non influenzano la posizione del centro di massa. Questo significa che il centro di massa proseguirà di moto parabolico. Calcoliamo quindi la "gittata" del centro di massa, applicando le formule già note del moto dei proiettili:

$$x_{CM} = R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

Possiamo allora impostarne la posizione  $x$ :

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

Dove  $x_1$  e  $x_2$  saranno rispettivamente la posizione del frammento caduto verso il basso e del frammento che prosegue il moto.  $x_1$  sarà quindi nota, essendo essa coincidente con il punto di altezza massima della parabola descritta dal proiettile prima della caduta, ovvero la metà della gittata del C.M.:

$$x_1 = \frac{R}{2} = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{2g}$$

Questo ci porta a scrivere la gittata completa:

$$R = \frac{m \frac{R}{2} + m x_2}{m_1 + m_2} \Rightarrow x_2 = \frac{3}{2} R = \frac{3}{2} \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

$x_1$  e  $x_2$  sono i valori cercati (si noti che il frammento con posizione orizzontale  $x_1$  resta sulla stessa ascissa finché non tocca terra).

### Disco rotante con massa sul perimetro

Si abbia un disco in rotazione, quindi in moto circolare uniforme, di raggio  $r$  e di massa  $M$ . Sull'estremità del disco, ovvero sul suo perimetro, è disposta una massetta  $m$ , che chiaramente ruoterà solidalmente al disco. Il centro di massa di questo sistema sarà in costante rotazione, in quanto verrà sfasato dalla presenza della massetta  $m$ . In particolare, possiamo impostare:

$$x_{CM} = \frac{m x_1 + M x_2}{m + M}, \quad y_{CM} = \frac{m y_1 + M y_2}{m + M}$$

Scelto un sistema di coordinate cartesiane centrato sul disco in rotazione, si avrà che  $x_2$ , ovvero il raggio che collega il centro del disco a se stesso, sarà 0, mentre  $x_1$ , ovvero il raggio che collega il centro del disco alla massetta, è il raggio stesso del disco. Questo ci permette di ottenere un raggio  $r_{CM}$ , che collega il centro del disco al centro di massa:

$$r_{CM} = \frac{mr}{m+M}$$

Applicando le solite formule del moto circolare uniforme avremo velocità e accelerazione:

$$v = \omega \frac{mR}{m+M}, \quad a = \omega^2 \frac{mr}{m+M}$$

## 48 Corpo rigido

Vediamo alcune nozioni preliminari per il calcolo del centro di massa del corpo rigido. Si inizia con le definizioni di densità:

- **Densità (di volume) di massa**

La densità di massa  $\rho_m$  è definita come la derivata della massa rispetto al volume:

$$\rho_m = \frac{dM}{dV}$$

si misura in  $\frac{kg}{m^3}$ .

- **Densità superficiale di massa**

La densità superficiale di massa  $\sigma_m$  è definita come la derivata della massa rispetto alla superficie:

$$\sigma_m = \frac{dM}{dA}$$

si misura in  $\frac{kg}{m^2}$ . La densità superficiale di massa viene usata nei casi in cui lo spessore dell'oggetto considerato sia trascurabile.

- **Densità lineare di massa**

La densità lineare di massa  $\lambda_m$  è definita come la derivata della massa rispetto alla lunghezza:

$$\lambda_m = \frac{dM}{dl}$$

si misura in  $\frac{kg}{m}$ . La densità lineare di massa viene utilizzata nei casi in cui l'unica grandezza rilevante del corpo è la lunghezza.



Notiamo che in generale,  $\rho_m, \sigma_m$  e  $\lambda_m$  sono funzioni delle dimensioni (grandezze estensive) dei corpi considerati.

### Calcolo del centro di massa di un corpo rigido

Se per un sistema contenente un numero finito di punti materiali avevamo:

$$r_{CM}^{\vec{}} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{M} = \frac{1}{M} \sum m_i \vec{r}_i$$

Per un corpo rigido di forma qualsiasi, sarà necessario passare al corrispettivo continuo della sommatoria, cioè l'integrale:

$$r_{CM}^{\vec{}} = \frac{1}{M} \int \vec{r}_i dm$$

che diventerà, sulla base delle definizioni precedenti potremo esprimere:

$$r_{CM}^{\vec{}} = \frac{1}{M} \int \vec{r} \rho(\vec{r}) dV$$

in funzione del volume  $V$  (o di altre grandezze estensive nel caso si decida di utilizzarle). Vediamo quindi come si svolge il calcolo dei centri di massa di alcuni corpi:

- **Sbarra con densità lineare di massa costante**

Supponiamo di avere una sbarra di larghezza e profondità trascurabile, e di cui ci interessa quindi solamente la lunghezza  $L$ . Calcoleremo allora la densità lineare di massa  $\lambda_m \frac{dM}{dL} = \frac{M}{L}$  (densità lineare costante). Appliciamo allora l'equazione precedente per la posizione del centro di massa  $R_{CM}^{\vec{}}$ :

$$x_{CM} = \frac{1}{M} \int_0^L x \lambda_m dx = \frac{\lambda_m}{M} \cdot \frac{x^2}{2} \Big|_0^L = \frac{\lambda_m}{M} \frac{L^2}{2} = \frac{L}{2}$$

che corrisponde al punto medio della sbarra, come l'intuito potrebbe suggerire.

- **Lamina a profilo semicircolare**

Prendiamo una lamina di forma semicircolare, abbastanza sottile da trascurarne la profondità, e calcoliamone il baricentro. Prima di tutto sarà necessario trovare la densità superficiale di massa  $\sigma_m = \frac{dM}{dA}$ :

$$A = \frac{\pi r^2}{2} \Rightarrow \sigma_m = \frac{2M}{\pi r^2}$$

Il centro di massa avrà posizione  $x = 0$  per la simmetria della semicirconferenza. Resta da calcolare la posizione  $y$ . Possiamo impostare l'integrale prendendo "strisce" di altezza  $\Delta y$  dalla posizione  $y = 0$  alla posizione  $y = R$  sull'asse verticale della circonferenza. La larghezza di queste strisce sarà sempre uguale a  $2x$ , con  $x$  la larghezza di uno dei due segmenti in cui l'asse centrale divide la striscia presa sulla circonferenza. L'area della striscia sarà quindi  $2xy$ . Ciò si esprime come:

$$y_{CM} = \frac{1}{M} \int_0^r \sigma_m 2xy dy$$

per eliminare la  $x$  possiamo prendere dall'equazione della circonferenza:

$$x^2 + y^2 = r^2 \Rightarrow x = \sqrt{r^2 - y^2}$$

da cui:

$$y_{CM} = \frac{1}{M} \int_0^r \sigma_m 2y \sqrt{r^2 - y^2} dy$$

L'integrale di  $y\sqrt{r^2 - y^2}$  è:

$$\int y\sqrt{r^2 - y^2} dy = -\frac{1}{3}(r^2 - y^2)^{\frac{3}{2}}, \quad \int_0^r y\sqrt{r^2 - y^2} dy = -\frac{1}{3}(r^2 - y^2)^{\frac{3}{2}} \Big|_0^r = \frac{1}{3}r^3$$

da cui:

$$y_{CM} = \frac{1}{M} \sigma_m \frac{2}{3} r^3 = \frac{1}{M} \frac{2M}{\pi r^2} \frac{2}{3} r^3 = \frac{4r}{3\pi}$$

#### • Lamina a profilo triangolare

Facciamo un'esempio simile al precedente, ma con un profilo triangolare retto anziché semicircolare. Chiameremo  $a$  e  $b$  i lati del triangolo. Adottiamo la metodologia usuale: calcoliamo innanzitutto la densità di massa superficiale  $\sigma_m$ :

$$A = \frac{ab}{2} \Rightarrow \sigma_m = \frac{2M}{ab}$$

E adottiamo un approccio di calcolo integrale. Possiamo pensare di dividere il triangolo in strisce orizzontali e verticali per calcolare le posizioni  $x$  e  $y$  del centro di massa. Avremo che per la  $x$ , la striscia ha area:

$$x \cdot by$$

su altezza  $y$  con larghezza  $x$ . Volendo eliminare la  $y$ , riscriviamola in funzione di  $x$ :

$$x \cdot \frac{b}{a}x$$

dove notiamo fra l'altro il termine  $\frac{b}{a} = \tan \theta$  angolo al centro. Impostiamo quindi l'integrale.

$$x_{CM} = \frac{1}{M} \int_0^a \sigma_x \cdot \frac{b}{a} x dx = \frac{1}{M} \frac{2M}{ab} \frac{b}{a} \int_0^a x^2 dx = \frac{2}{a^2} \frac{a^3}{3} = \frac{2}{3}a$$

Per il calcolo di  $y$ , il procedimento è analogo, con l'unica differenza il fatto che la larghezza in  $y$  più piccoli è più grande, e viceversa, ovvero l'area è:

$$y \cdot \frac{a}{b}(b-y)$$

da cui l'integrale:

$$y_{CM} = \frac{1}{M} \int_0^b \sigma_y y \cdot \frac{a}{b}(b-y) dy = \frac{2}{b^2} \int_0^b (yb-y^2) dy = \frac{2}{b^2} (b \frac{y^2}{2} \Big|_0^b - \frac{y^3}{3} \Big|_0^b) = \frac{1}{3}a$$

abbiamo quindi che il baricentro del triangolo è in  $(\frac{2}{3}a, \frac{1}{3}b)$ . Questo risultato si può avere anche, più direttamente, dalle formule per il baricentro di un triangolo qualsiasi:

$$x_{CM} = \frac{x_A + x_B + x_C}{3}, \quad y_{CM} = \frac{y_A + y_B + y_C}{3}$$

sui punti  $A = (0, 0)$ ,  $B = (a, 0)$ ,  $C = (a, b)$ .

- **Semianello rigido**

Prendiamo un'esempio apparentemente simile a quello della semicirconferenza: quello di un semianello rigido di raggio  $r$  e massa  $M$ . Considereremo la densità lineare di massa, che sarà uguale a  $\lambda_m = \frac{M}{\pi r}$ . Per la simmetria, come nell'esempio semicircolare, la posizione orizzontale del centro di massa sarà  $x = 0$ . Resta da calcolare la componente verticale: può rendersi utile in questo caso un passaggio alle coordinate polari, con:

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta$$

da cui l'integrale:

$$y_{CM} = \frac{1}{M} \int_0^\pi \lambda_m R \cdot R \sin \theta d\theta = \frac{1}{M} \frac{M}{2\pi} r^2 (-\cos \theta \Big|_0^\pi) = \frac{2r}{\pi}$$

## 49 Conservazione della quantità di moto

Consideriamo un sistema a 2 masse,  $m_1$  e  $m_2$ , connesse da una molla su un piano privo di attrito. Estendendo la molla, i due punti materiali si allontaneranno fra di loro e la molla esprimerà sui due capi (e quindi sui punti

materiali stessi) due forze identiche in modulo ma in verso opposto. In simboli, visto che la derivata rispetto al tempo della quantità di moto equivale alla forza, avremo che:

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{F}_1, \quad \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_2 \Rightarrow \vec{F}_2 = -\vec{F}_1$$

Definendo il vettore quantità di moto totale del sistema  $\vec{P}$ :

$$\vec{P} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2, \quad \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$$

Ciò significa che la variazione di quantità di moto è nulla, ergo la quantità di moto non cambia nel tempo. Più propriamente, se su un sistema di punti materiali agiscono solamente forze interne, o se la risultante delle forze esterne è nulla (\*), allora la quantità di moto  $\vec{P}$  del sistema è un vettore costante nel tempo. Ricordando il teorema dell'impulso (riportato negli appunti come principio cardinale dei sistemi):

$$\frac{d}{dt}P_{CM} = \sum \vec{R}^{(est)}$$

la condizione (\*) diventa  $\sum \vec{R}^{(est)} = 0$ , che come vediamo già risultava in variazione nulla della quantità di moto.

Questa legge di conservazione può essere applicata, più generalmente, in due casistiche:

- La risultante delle forze esterne è nulla;
- Le forze esterne non sono nulle, ma esse sono limitate, e la durata dell'interazione è trascurabile ( $t \rightarrow 0$ ).

Possiamo inoltre applicare la conservazione su un solo asse, nel caso le condizioni precedenti non siano rispettate su assi diversi.

### Applicazioni della conservazione della quantità di moto

La conservazione della quantità di moto, assieme alla conservazione dell'energia, può essere utilizzata per modellizzare semplicemente numerosi fenomeni fisici riguardanti l'interazione fra più corpi (si ricordano ad esempio gli urti). Vediamo un esempio interessante: una pallina di massa  $m_1$  parte dalla cima di una superficie a profilo semicircolare di massa  $m_2$ , situata su un piano senza attrito. Cadendo, la pallina spinge la superficie, così che al termine della caduta entrambe saranno in moto rettilineo uniforme verso direzioni

opposte. Si vuole calcolare le velocità finali di entrambi i corpi. Iniziamo dalla conservazione dell'energia. L'energia potenziale della pallina sospesa sulla superficie nell'istante iniziale verrà interamente convertita in energia cinetica sia della pallina che della superficie, ergo:

$$m_1gh = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2$$

Per eliminare le due incognite  $v_1$  e  $v_2$ , potremo sfruttare il fatto che la conservazione della quantità di moto vale sull'asse x del sistema, in quanto non intervengono forze esterne. Si ha quindi:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = p_i$$

dove  $p_i$  è la quantità di moto nell'istante  $t = 0$ , che possiamo subito impostare come nulla in quanto prima della caduta entrambi i corpi sono in quiete. Si avrà quindi che:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = 0, \quad m_1v_1 = -m_2v_2 \Rightarrow v_1 = -\frac{m_2v_2}{m_1}$$

Sostituendo nella conservazione dell'energia, avremo:

$$gh = \frac{1}{2}\left(\frac{m_2v_2}{m_1}\right)^2 + \frac{1}{2}\frac{m_2}{m_1}v_2^2 \Rightarrow v_2 = -\sqrt{\frac{m_1^2gh}{m_2(m_1 + m_2)}}$$

Con ragionamenti simili avrà poi:

$$v_2 = -\frac{m_1v_1}{m_2}, \quad gh = \frac{1}{2}v_1^2 + \frac{1}{2}\frac{m_2}{m_1}\left(\frac{m_2v_2}{m_1}\right)^2 \Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2m_2gh}{m_1 + m_2}}$$

N.B.: i segni sono stati scelti in modo da rispettare la conservazione della quantità di moto. Si assume che la pallina venga spinta verso destra, e la superficie verso sinistra.

## 50 Urti

Ricordiamo la definizione di impulso per una forza:

$$\vec{I}_{t_0 \rightarrow t} = \int_{t_0}^t \vec{F} dt'$$

e il fatto che la sua variazione sulle forze esterne equivale alla variazione della quantità di moto di un sistema:

$$\vec{p}(t) - \vec{p}(t_0) = \int_{t_0}^t \vec{F} dt'$$

### Forze impulsive

Una forza impulsiva è una forza che viene esercitata per un tempo estremamente limitato. Spesso l'intensità di una forza impulsiva  $F_{imp}$  è talmente grande che il suo effetto viene comunque apprezzato, e anzi è talmente predominante da permettere di trascurare gli effetti di altre forze, ovvero:

$$\sum_{i=0}^n \vec{F}_i^{(est)} \approx \vec{F}_{imp}$$

A volte si conosce la variazione della quantità di moto di un corpo su cui ha agito una forza impulsiva per un certo periodo di tempo, ma di cui è sconosciuta l'intensità. Si può allora determinare la forza media impulsiva  $\langle F_{imp} \rangle$  che avrebbe sortito il medesimo effetto fosse stata applicata sull'intervallo  $\Delta t$ :

$$\langle \vec{F}_{imp} \rangle = \frac{\int_{t_i}^{t_f} \vec{F}_{imp} dt}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

Facciamo un'esempio non intuitivo sulla forza media. Un corpo in movimento con velocità costante  $v_1$  subisce ad un certo punto un'impulso che lo spinge verso l'alto, dandogli nell'istante immediatamente successivo velocità uguale in modulo a  $v_1$  ma orientata di un'angolo  $\theta$  rispetto all'orizzontale. Possiamo impostare:

$$v_1 = (v_1, 0), \quad v_2 = (v_1 \cos \theta, v_1 \sin \theta)$$

Possiamo impostare la conservazione per trovare la forza media:

$$\langle \vec{F}_{imp} \rangle + mg = \frac{\int_0^t \vec{F} dt'}{t} = \frac{m(v_1 - v_2)}{t}$$

possiamo impostare quindi le equazioni sui diversi assi, ricordando che  $mg$  agisce solamente sull'asse  $y$ !

$$\langle F_{imp_x} \rangle = \frac{m(v_{2x} - v_{1x})}{t} = m\left(\frac{v_1(\cos \theta - 1)}{t}\right)$$

$$\langle F_{imp_y} \rangle = \frac{m(v_{2y} - v_{1y})}{t} = m\left(\frac{v_1 \sin \theta}{t}\right)$$

### Collisioni

Quando due punti materiali si avvicinano fra di loro, la loro mutuale interazione produce un cambiamento del loro stato di moto, comportando:

- Scambio di quantità di moto;
- Scambio di energia cinetica.

Quando la variazione di quantità di moto è notevole, mentre la durata dell'interazione molto piccola, si parla di un urto (o collisione). Le forze che producono un urto sono forze impulsive e interne al sistema dei due corpi che collidono, quindi come sempre possiamo trascurare l'effetto delle altre forze non impulsive. Cosa ancorà più importante, visto che le forze impulsive sviluppate sono forze interne al sistema, la quantità di moto totale del sistema si conserva sempre durante un urto. Come vedremo non sempre vale lo stesso per l'energia cinetica.

Analizziamo adesso il moto di due sfere che si incontrano l'un l'altra. Possiamo dividere il moto in 3 fasi:

- Nella prima fase, entrambi i corpi si muovono l'uno verso l'altro, imperturbati da qualsiasi interazione reciproca;
- la seconda fase avviene durante l'urto, in cui avviene l'interazione vera e propria fra i due corpi. In questa fase entrambi i corpi tendono ad occupare lo spazio altrui provocando deformazioni reciproche. Queste deformazioni portano allo sviluppo di una forza elastica che si oppone alla deformazione stessa e cerca di ristabilire l'equilibrio precedente, allontanando quindi le sfere. La variazione è brusca, ergo esiste una forza impulsiva.
- Nella fase immediatamente successiva all'urto, i due corpi si trovano nuovamente in moto imperturbati, ma con moti diversi a quelli di partenza.

### Classificazione delle collisioni

Possiamo classificare gli urti in due categorie principali:

- **Urti anelastici**, dove l'energia cinetica  $K$  non si conserva, perchè le forze di deformazione trasformano l'energia meccanica in altre forme.  $\vec{P}$  come sempre si conserva. Un caso particolare è l'urto completamente anelastico, dove dopo l'urto i corpi restano attaccati fra di loro.
- **Urti elastici**, dove sia  $K$  che  $\vec{P}$  si conservano.

### Urti elastici monodimensionali

Calcoliamo i valori delle velocità di due corpi a seguito di un urto monodimensionale. Impostiamo la conservazione della quantità di moto:

$$\vec{P}_i = \vec{P}_f = m_1 v_{1i} + m_2 v_{2f} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2i}$$

$$-\Delta \vec{P}_1 = \Delta \vec{P}_2 = m_1 (v_{1i} - v_{1f}) = m_2 (v_{2f} - v_{2i})$$

e la conservazione dell'energia:

$$\frac{1}{2}m_1v_{1i}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{2i}^2 = \frac{1}{2}m_1v_{1f}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{2f}^2$$

con alcuni raccoglimenti, si ha che:

$$\frac{1}{2}m_1(v_{1i}^2 - v_{1f}^2) = \frac{1}{2}m_2(v_{2f}^2 - v_{2i}^2)$$

che è molto simile alla conservazione della quantità di moto. Riscriviamo infatti come:

$$\frac{1}{2}m_1(v_{1i} - v_{1f})(v_{1i} + v_{1f}) = \frac{1}{2}m_2(v_{2f} - v_{2i})(v_{2f} + v_{2i})$$

L'uguaglianza dei termini di questa equazione che presentano differenze di velocità è assicurata dalla conservazione dell'energia. Resta quindi soltanto:

$$v_{1i} + v_{1f} = v_{2i} + v_{2f} \Rightarrow v_{1i} - v_{2i} = v_{2f} - v_{1f}$$

ovvero le velocità relative dei due oggetti si conservano dopo l'urto. Abbiamo quindi che:

$$\begin{cases} v_{1i} - v_{2i} = v_{2f} - v_{1f} \\ m_1(v_{1i} - v_{1f}) = m_2(v_{2f} - v_{2i}) \end{cases}$$

Da questo sistema possiamo ricavare algebricamente le velocità  $v_{1f}$  e  $v_{2f}$ :

$$v_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}v_{1i} + \frac{2m_2}{m_1 + m_2}v_{2i}$$

$$v_{2f} = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}v_{2i} + \frac{2m_1}{m_1 + m_2}v_{1i}$$

### Urti perfettamente anelastici monodimensionali

Gli urti elastici sono più complessi da modellizzare, in quanto disponiamo solamente di un'equazione per risolvere il problema, la conservazione della quantità di moto ( $P$ ). Nell'urto perfettamente anelastico si ha però che dopo l'urto i due corpi procedono assieme attaccati l'uno all'altro, con la stessa velocità  $v_f$ . Avremo quindi che:

$$\vec{P} = m_1v_{1i} + m_2v_{2i} = (m_1 + m_2)v_f, \quad v_f = \frac{m_1v_{1i} + m_2v_{2i}}{m_1 + m_2}$$

dove  $v_f$  era l'unica incognita del sistema. Possiamo allora considerare l'energia cinetica:

$$K_f - K_i = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_f^2 - \frac{1}{2}m_1v_{1i}^2 - \frac{1}{2}m_2v_{2i}^2 = -\frac{1}{2}\frac{m_1m_2}{m_1 + m_2}(v_{1i} - v_{2i})^2 < 0$$



ovvero notiamo che a seguito del processo di urto l'energia cinetica del sistema è diminuita (è stata "usata" nella deformazione degli oggetti in collisione, oppure trasformata in suono, energia termica, ecc...).

### **Pendolo balistico**

Vediamo un esempio: un pendolo balistico usato per rilevare la velocità dei proiettili. Il pendolo è costituito da un blocco sospeso da due funi. Il blocco, inizialmente fermo, una volta colpito dal proiettile (di urto completamente anelastico, il proiettile rimane infatti conficcato nel blocco), sale di una certa distanza verso l'alto, sottoposto alla spinta infertagli. Le condizioni iniziali sono quindi  $v_{1i} > 0$ ,  $v_{2i} = 0$ . Il sistema è soggetto sia a forze impulsive che si esplicano durante l'urto, sia alla forza peso, che però non consideriamo durante l'urto. Abbiamo innanzitutto che la velocità finale del pendolo sarà:

$$v_f = \frac{m_1 v_{1i}}{m_1 + m_2}$$

Notiamo adesso che dopo l'urto, l'energia si conserva: tutte le forze non conservative agiscono solamente nell'istante dell'urto. Posso quindi applicare la conservazione dell'energia:

$$\frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_f^2 = (m_1 + m_2)gh, \quad v_f = \sqrt{2gh}$$

Se diversamente alle nostre ipotesi l'urto fosse stato elastico, oltre ad una situazione particolarmente pericolosa, avremo che l'energia cinetica si conserverebbe. Possiamo quindi impostare:

$$\begin{cases} v_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_{1i} \\ v_{2f} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_{1i} \end{cases}$$

## **51 Moto di un corpo rigido**

Per corpo rigido si intende un sistema di punti materiali le cui distanze l'uno dall'altro non variano nel tempo. In altre parole, un corpo rigido non subisce deformazioni. Ricordiamo che il centro di massa di un corpo rigido è dato da:

$$r_{CM} = \frac{1}{M} \int \vec{r} dm = \frac{1}{m} \int \vec{r} \rho dV = \frac{1}{V} \int \vec{r} dV$$

Si rimanda per le altre formule agli appunti relativi al centro di massa.

### **Moto di pura traslazione**

In un moto di pura traslazione, tutte le particelle del corporigido subiscono

lo stesso spostamento nello stesso intervallo di tempo, ergo hanno la stessa velocità (che corrisponderà obbligatoriamente con la velocità del CM). La velocità dei vari punti rispetto al centro di massa sarà allora nulla.

$$v_{\vec{CM}} = \frac{d\vec{r}_{CM}}{dt}, \quad v_{\vec{CM}} = \frac{\int \vec{v} dm}{M} = \vec{v} \int dm/M = \vec{v}, \quad P_{\vec{CM}} = M v_{\vec{CM}} = M \vec{v}$$

Se il corpo non è di pura traslazione vale:

$$v_{\vec{CM}} = \frac{\int \vec{v}(x, y, z) dm}{M}, \quad P_{\vec{CM}} = M v_{\vec{CM}} = M \frac{\int \vec{v}(x, y, z) dm}{M}$$

Vediamo quindi l'accelerazione:

$$a_{\vec{CM}} = \frac{\int \vec{a} dm}{M} = \vec{a} \frac{\int dm}{M} = \vec{a}, \quad M a_{\vec{CM}} = M \vec{a}$$

ovvero in ogni punto del corpo l'accelerazione è la stessa. Come prima, non fosse stato il moto di pura traslazione, vale:

$$a_{\vec{CM}} = \frac{\int \vec{a}(x, y, z) dm}{M}, \quad M a_{\vec{CM}} = \int \vec{a}(x, y, z) dm$$

### Prima equazione cardinale per un corpo rigido

In modo analogo a quanto detto sui sistemi, su un corpo rigido si può dire che la derivata della quantità di moto totale è uguale alla risultante delle sole forze esterne:

$$\frac{dP_{\vec{CM}}}{dt} = M a_{\vec{CM}} = \sum \vec{R}^{est}$$

### Secondo teorema del CM per un corpo rigido

Il centro di massa si muove come un punto di massa totale  $M$  soggetto alla sola risultante delle forze esterne al sistema. Questo ci permette di enunciare la conservazione della quantità di moto: quando la risultante delle forze esterne è nulla, la quantità di moto del corpo rigido resta costante in modulo, direzione e verso.

### Lavoro delle forze interne

Essendo il lavoro dipendente dalla variazione di distanza (spostamento), avremo che il lavoro totale svolto dalle forze interne, o, in simboli:

$$dL_{ij} = \vec{F}_{ij} \cdot d\vec{r}_i + \vec{F}_{ji} \cdot d\vec{r}_j = \vec{F}_{ij} \cdot d\vec{r}_i - \vec{F}_{ij} \cdot d\vec{r}_j = \vec{F}_{ij} \cdot (d\vec{r}_i - d\vec{r}_j) = 0$$

Ciò deriva dal fatto che, per definizione di corpo rigido, le variazioni di posizione fra i punti materiali che compongono il sistema e il centro di massa è

nulla, e lo è quindi anche fra i punti materiali stessi. Questo ci permette di affermare che in un corpo rigido solo le forze esterne determinano la variazione della quantità di moto, ovvero la prima equazione cardinale. Ad esempio, prendiamo la forza di gravità:

$$Ma\vec{C}_M = \int \vec{a}dm = \int \vec{g}dm = Mg$$

## 52 Dinamica rotazionale del corpo rigido

Le forze agenti su un corpo rigido producono, oltre che una traslazione, anche una rotazione. Questa messa in rotazione dipende dal punto di applicazione delle forze rispetto all'asse di rotazione. Ad esempio, immaginiamo il banale gesto di aprire una porta: chiaramente risulterà più facile mettere la porta in rotazione spingendo sulla maniglia, che non sui cardini. Possiamo quindi dire che la nostra azione sulla maniglia produce sulla porta un'accelerazione angolare, accelerazione che è direttamente proporzionale al modulo della forza applicata, al seno che essa forma con l'asse orizzontale della porta, e soprattutto alla distanza fra l'asse di rotazione e il punto di applicazione della forza:

$$\alpha \propto |\vec{F}|R \sin \theta$$

notiamo che  $R \sin \theta$ , che chiameremo  $d$  braccio della forza, rappresenta la lunghezza del segmento perpendicolare alla proiezione dell'asse di applicazione delle forze che si congiunge al centro dell'asse di rotazione. Questa grandezza sarà uguale a  $\vec{R}$  nel caso la forza venga applicata al corpo nella direzione perfettamente perpendicolare all'asse. Negli esempi successivi verrà assunto questo caso: in caso contrario servirà considerare  $\vec{R}$  per quello che dovrebbe veramente essere, ovvero il braccio  $d = R \sin \theta$ . A questo punto  $\alpha$  sarà perpendicolare ad  $\vec{F}$  e  $\vec{R}$ , e quindi diretta lungo l'asse di rotazione.

### Momento di una forza

Definiamo il momento di una forza rispetto a un certo polo  $O$ :

$$\vec{\tau}_0 = \vec{R} \times \vec{F}$$

$\vec{\tau}$  è una grandezza fisica vettoriale, misurata in  $N \cdot m$ , e non in Joule, in quanto non ha nulla a che fare con il lavoro. Sarà nulla nel caso la forza sia parallela a  $\vec{R}$ . Nel caso si parli di rotazione assiale, definiamo poi il momento assiale specifico a quel singolo asse:

$$\tau_z = (\vec{R} \times \vec{F})_z$$

Il momento della forza è positivo nel caso se causa una rotazione in senso orario, negativo se in senso antiorario. La componente lungo l'asse di rotazione del momento di una forza nota anche come momento assiale o momento torcente.

### **Momento angolare**

Definiamo adesso il momento angolare rispetto ad un polo per un punto materiale. Questa grandezza è nota anche come momento della quantità di moto:

$$\vec{L}_0 = \vec{R} \times m\vec{V} = \vec{R} \times \vec{P}$$

$\vec{L}_0$  ci dà informazioni riguardo all'effettiva rotazione di un punto attorno al polo ( $\omega$  diretta lungo  $\vec{R} \times \vec{V}$ ), è una grandezza fisica vettoriale misurata in  $J \cdot s$ . Per un moto piano attorno al polo  $O$  avremo:

$$\vec{L}_z = mV_\theta R = mR^2\omega$$

sul solo asse  $z$ . Anche in questo caso otteniamo un vettore perpendicolare al piano della rotazione.

### **Teorema del momento angolare**

La derivata rispetto al tempo del momento angolare di un punto materiale è uguale alla somma vettoriale dei momenti agenti sul piano materiale:

$$\vec{\tau}_{tot} = \frac{d\vec{L}_0}{dt} = \sum \vec{\tau}_i$$

N.B.: questo quando momento angolare e momento delle forze sono definiti rispetto allo stesso polo  $O$ !

Possiamo dimostrare questo risultato con dei semplici passaggi algebrici:

$$\frac{d\vec{L}_0}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{R} \times m\vec{V}) = \left(\frac{d\vec{R}}{dt}\right) \times m\vec{V} + \vec{R} \times \frac{d}{dt}(m\vec{V}) = \vec{V} \times m\vec{V} + \vec{R} \times \sum \vec{F}$$

Notiamo che  $\vec{V} \times m\vec{V} = 0$ , ergo:

$$\frac{d\vec{L}_0}{dt} = \sum \vec{R} \times \vec{F} = \tau_{tot}$$

### **Legge di conservazione del momento angolare**

Una conseguenza importante del teorema appena dimostrato è che:

$$\vec{\tau}_{tot} = \frac{d\vec{L}_0}{dt} \Rightarrow \vec{\tau}_{tot} = 0 \Leftrightarrow \vec{L} = \text{const.}$$

ovvero, il momento della quantità di moto (momento angolare) è costante nel caso non agiscano altre forze esterne con momento  $\tau > 0$ .

### Forze centrali

Le forze centrali sono forze che possono essere scritte nella formula generica:

$$\vec{F}(R) = \hat{R}f(R)$$

dove  $f(R)$  è una funzione scalare della distanza dal centro di forza e il punto di applicazione della forza stessa. Esempi di queste forze sono:

- La forza gravitazionale;
- La forza coulombiana
- La forza elastica;
- ecc...

Se cerchiamo di calcolare il momento di una forza centrale, troviamo subito che tale momento è nullo, in quanto  $\vec{R}$  e  $\hat{R}$  sono paralleli per definizione. In altre parole, sotto l'effetto di forze centrali il momento angolare si conserva, ovvero è una costante del moto.

### Momento angolare di un sistema di punti materiali

Possiamo estendere il concetto di momento angolare a sistemi di punti materiali:

$$\vec{L} = \sum_i^n \vec{L}_i = \sum_i^n \vec{R}_i \times \vec{P}_i$$

Sempre rispetto al solito polo  $O$  per tutti i punti. Questo ci permette di enunciare:

### Seconda equazione cardinale della meccanica

$$\vec{\tau}_{est} = \sum_i^n \vec{R}_i \times \vec{F}_{est_i} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

Possiamo dimostrare questo risultato:

$$\vec{L} = \sum_i^n \vec{L}_i = \sum_i^n \vec{R}_i \times \vec{P}_i, \quad \frac{d\vec{L}}{dt} = \sum_i^n \frac{d\vec{L}_i}{dt} = \sum_i^n \tau_i = \sum_i^n (\tau_{int_i} + \tau_{est_i}) = \tau_{est}$$

Questo vale e si dimostra esattamente nello stesso modo per sistemi di punti materiali.

### Applicazione del momento angolare al pendolo

Il momento delle forze e il momento angolare ci permettono di descrivere il moto del pendolo senza dover ricorrere all'accelerazione centripeta. Posto

un pendolo formato da una massa  $M$  legata da un filo di lunghezza  $l$  ad un perno centrale, potremo calcolare il momento della risultante delle forze sulla massa, ovvero la gravità  $-Mg$  e la tensione del filo  $\vec{T}$ :

$$\tau_{tot} = \vec{R} \times \vec{F}_T + \vec{R} \times \vec{F}_{Mg} = \vec{R} \times Mg \sin \theta = -Mgl \sin \theta$$

Calcoliamo poi il momento angolare della massa:

$$\vec{L} = \vec{R} \times M\vec{V} = \vec{R} \times M(\omega \times \vec{R}) = M\omega l^2$$

possiamo calcolarne la derivata:

$$\frac{d}{dt}\vec{L} = \sum \tau = -Mgl \sin \theta$$

Ricordiamo a questo punto che  $\omega = \dot{\theta}$ ,  $\alpha = \ddot{\theta}$ , ovvero possiamo riscrivere  $\frac{d}{dt}\vec{L}$  anche come:

$$\frac{d}{dt}\vec{L} = Ml^2\alpha = -Mgl \sin \theta$$

da cui si ottiene l'equazione differenziale:

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{l} \sin \theta$$

Possiamo applicare l'usuale approssimazione attraverso Taylor di  $\sin \theta = \theta$  per valori piccoli di  $\theta$ , porre  $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$ ,  $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ , ed ottenere il risultato:

$$\ddot{\theta} = -\omega^2\theta \Rightarrow \theta = A \cos(\omega t + \phi)$$

Che è coerente con quanto già dimostrato riguardo al pendolo semplice in moto piano. Ovviamente  $A$  e  $\phi$  dipenderanno dalle condizioni iniziali dell'eq. differenziale.

### Applicazione dell'energia al pendolo

Tanto per restare in tema, vediamo come il moto del pendolo può essere agilmente spiegato anche attraverso la conservazione dell'energia. Consideriamo il lavoro delle forze: sono tutte conservative, in quanto non c'è attrito, e in particolare  $\vec{T}$  e la gravità  $mg$  nella direzione opposta al filo non compiono alcun lavoro. Possiamo impostare la l'energia, notando che l'altezza da terra  $h$  della pallina è data da  $h = l(1 - \cos \theta)$  e la velocità tangenziale  $v$  è  $v = \dot{\theta}l$ :

$$E = U + K = Mgh + \frac{1}{2}Mv^2 = Mg(1 - \cos \theta) + \frac{1}{2}M\dot{\theta}^2l^2$$

Dalla conservazione dell'energia, avremo che:

$$\frac{d}{dt}E = 0 = 0 - Mgl \sin \theta \cdot \dot{\theta} + \frac{2M\dot{\theta}\ddot{\theta}l^2}{2} = -g \sin \theta + \ddot{\theta}l$$

da cui si ricava sempre la solita equazione differenziale:

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{l} \sin \theta$$

### Coppia di forze

Osserviamo come due forze con direzione uguale e verso opposto non generano necessariamente momento nullo. Potremo infatti avere:

$$F_{1_{est}} + F_{2_{est}} = 0, \quad \sum \tau_{est} = \vec{R}_1 \times \vec{F}_{1_{est}} + \vec{R}_2 \times \vec{F}_{2_{est}} = -\frac{d}{2} \vec{F}_z - \frac{d}{2} \vec{F}_z = -d \vec{F}_z \neq 0$$

Questo è il caso di una coppia di forze, applicate su assi sfasati, oppure ad un certo angolo fra di loro, su una certa distanza  $d$  lungo l'oggetto (equivalente a due volte il braccio). Una coppia di forze genera sul corpo una rotazione, ma non una traslazione. Per quanto riguarda le forze interne, vediamo che condividono la retta di applicazione (un braccio passante per il polo), ergo:

$$\sum \tau_{int} = 0$$

## 53 Dinamica del corpo rigido

Possiamo a questo punto riportare le formule trovate finora sul corpo rigido. Ricordiamo che un corpo rigido non è altro che un sistema di punti materiali le cui distanze l'uno dall'altro non cambiano. Una conseguenza di questa limitazione è che gli unici due moti possibili di un corpo rigido sono la pura traslazione (del centro di massa) e la pura rotazione attorno ad un asse. Abbiamo le leggi:

- **Prima equazione cardinale**

$$\frac{d\vec{P}_{CM}}{dt} = M \vec{A}_{CM} = \vec{R}_{est}$$

- **Seconda equazione cardinale**

$$\tau_{est} = \sum \vec{R} \times \vec{F}_{est} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

## 54 Energia potenziale gravitazionale per sistemi di punti materiali

Possiamo dare una definizione di energia potenziale gravitazionale per sistemi di punti materiali, e quindi corpi rigidi, tale per cui l'altezza  $h$  in  $mgh$  (come

avevamo trovato per i punti materiali) vale quanto l'altezza del corpo rigido, ovvero:

$$U_{grav} = \sum_i^n m_i g z_i = Mg \frac{\sum_i^f m_i z_i}{M} = Mg z_{CM}$$

notando che:

$$\frac{\sum_i^f m_i z_i}{M} = \frac{1}{M} \int z dm = z_{CM}$$

## 55 Teorema di König per i sistemi di punti materiali

Dimostriamo adesso un'importante risultato riguardante l'energia cinetica. Stiamo considerando un sistema di punti materiali: definiamo due sistemi di riferimento inerziali. Il primo è il sistema di laboratorio  $S_0(x, y, z)$ , e il secondo è il sistema del centro di massa  $S_{CM}(x', y', z')$  con assi paralleli a  $S_0$  la cui origine è solidale al centro di massa. Vale la relazione:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{r}_i = \vec{r}_i + \vec{v}_i' t \\ \vec{v}_i = v_{CM} \vec{e} + \vec{v}_i' \\ \vec{a}_i = \vec{a}_i' \end{array} \right.$$

possiamo ricavare sulla base di questa relazione una formula per l'energia cinetica:

$$K = \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \sum \frac{1}{2} m_i (v_{CM} \vec{e} + \vec{v}_i')^2 = \sum \frac{1}{2} m_i v_{CM}^2 + \sum \frac{1}{2} m_i \vec{v}_i'^2 + v_{CM} \vec{e} \cdot \sum m_i \vec{v}_i'$$

Notiamo a questo punto che il termine  $\sum m_i \vec{v}_i'$  equivale alla quantità di moto complessiva nel sistema di riferimento del centro di massa, che è nulla. Possiamo quindi riscrivere il tutto come:

$$K = \frac{1}{2} M v_{CM}^2 + \sum \frac{1}{2} m_i \vec{v}_i'^2$$

Questa formula rappresenta ciò che viene enunciato dal teorema di König: L'energia cinetica totale di un sistema di punti materiali coincide con la somma dell'energia cinetica di traslazione del centro di massa (ovvero l'energia cinetica che avrebbe un corpo di massa uguale alla massa totale dei punti materiali e velocità pari a quella del centro di massa) e dell'energia cinetica



di tutti i punti materiali misurata in un sistema di riferimento con origine solidale al centro di massa e assi paralleli a quelli di laboratorio. L'energia cinetica del centro di massa è data da  $\frac{1}{2}Mv_{CM}^2$ , e quella dei punti materiali nel sistema di riferimento proprio da  $\sum \frac{1}{2}m_i\vec{v}_i'^2$ , da cui la formula sopra riportata.

## 56 Teorema di König per il corpo rigido

Vediamo il significato del teorema di König per i corpi rigidi. Ripartiamo dalla definizione data per i sistemi di punti materiali:

$$K = \frac{1}{2}Mv_{CM}^2 + \sum \frac{1}{2}m_i\vec{v}_i'^2$$

Si avrà che il primo termine, riguardante il centro di massa, avrà esattamente la stessa forma per il corpo rigido. A cambiare sarà il secondo termine, riguardante i moti dei punti materiali rispetto al sistema di riferimento centrato sul centro di massa del sistema: nel caso del corpo rigido, dove le distanze relative fra punti materiali sono costanti, avremo che tale fattore dipende dal moto rotazionale del corpo stesso. Per la precisione, avremo che per qualsiasi punto a distanza  $d_i$  dal centro di massa, la velocità relativa  $\vec{v}_i'$  sarà:

$$\vec{v}_i' = \omega d_i \Rightarrow K = \frac{1}{2}Mv_{CM}^2 + \frac{1}{2}\sum m_id_i^2\omega^2$$

Definiamo la quantità  $I_{CM}$ , detta momento d'inerzia.

$$I_{CM} = \sum_i^n m_id_i^2$$

Il momento di inerzia andrà inteso come il "corrispettivo rotazionale della massa", anche se è importante notare che, a differenza della massa, dipende dall'asse di rotazione scelto. In ogni caso, possiamo ricavare la formula definitiva:

$$K = \frac{1}{2}Mv_{CM}^2 + \frac{1}{2}I_{CM}\omega^2$$

dove il primo termine dipende, come già detto, dal moto traslatorio del centro di massa, e il secondo termine dal moto rotazionale del corpo rigido e dal suo momento di inerzia.

## 57 Momento di inerzia rispetto ad un asse

Consideriamo una massa  $M$  in rotazione a distanza  $R$  dal suo asse. Potremo calcolare il suo momento di inerzia come:

$$I_0 = \sum m_i r_i^2 = MR^2$$

### Momento di inerzia di una sbarretta sottile

Calcoliamo il momento di inerzia di una sbarretta sottile di massa  $M$  e lunghezza  $L$  in rotazione rispetto al suo punto medio. Dovremo conoscere la densità lineare di massa  $\lambda$  della sbarretta:

$$\lambda = \frac{M}{L} = \frac{dm}{dx}, \quad dm = \lambda dx$$

Potremo allora calcolare il momento di inerzia applicando la definizione:

$$I = \int dm x^2, \quad I = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \lambda dx x^2 = \frac{2\lambda}{3} \left(\frac{L}{2}\right)^3 = \frac{ML^2}{12}$$

### Momento di inerzia di un anello omogeneo

Calcoliamo il momento di inerzia di un'anello di massa  $M$  e raggio  $R$ , vuoto, in rotazione rispetto al suo centro. Ragioniamo in modo analogo a prima. La densità lineare di massa sarà:

$$\lambda = \frac{M}{2\pi R}$$

mentre la variazione di lunghezza sull'anello  $dl$  sarà:

$$dm = \lambda dl, \quad dl = R d\phi$$

da cui possiamo quindi calcolare la massa su  $dl$ :

$$dm = \lambda dl = \frac{M}{2\pi R} R d\phi = \frac{M}{2\pi} d\phi$$

Impostiamo allora il momento di inerzia dalla definizione:

$$I = \int_{\text{anello}} R^2 dm = R^2 \int_0^{2\pi} \frac{M}{2\pi} d\phi$$

Notiamo che l'integrale rappresenta semplicemente tutta la massa dell'anello. Avremo quindi che, come prima:

$$I = MR^2$$

### Momento di inerzia di un disco omogeneo

Studiamo il caso analogo al precedente, ma dove l'anello è pieno. Avremo bisogno della densità superficiale di massa:

$$\rho = \frac{dm}{ds} = \frac{M}{\pi R^2}, \quad dm = \rho ds, \quad ds = 2\pi r dr$$

Calcoliamo allora il momento d'inerzia:

$$I = \int dm d^2 = \int \rho ds r^2 = \rho \int 2\pi r dr r^2 = \rho 2\pi \frac{R^4}{4} = M \frac{R^2}{2}$$

### Cubo di masse puntiformi

Calcoliamo il centro di massa di un cubo formato da un punto materiale per ogni suo vertice. Possiamo iniziare sull'asse x: 4 delle masse avranno coordinata  $x = 0$ , e le altre 4 avranno coordinata  $x = l$  con  $l$  lato del cubo. Questo mi porta a dire:

$$x_{CM} = \frac{(4x_l + 4x_0)m}{8m} = \frac{l}{2}$$

Possiamo ripetere quest'operazione su tutti e tre gli assi, ottenendo:

$$r_{\vec{CM}} = \left( \frac{l}{2}, \frac{l}{2}, \frac{l}{2} \right)$$

Com'è abbastanza intuitivo.

Vediamo ora di calcolare il momento di inerzia dello stesso corpo. Sull'asse x si avrà che:

$$I_x = \sum m_i (y_i^2 + z_i^2)$$

Se abbiamo centrato la figura facendo corrispondere il centro di massa all'origine degli assi cartesiani, è vero che:

$$x = \pm \frac{l}{2}, \quad y = \pm \frac{l}{2}, \quad z = \pm \frac{l}{2}$$

Potrò sostituire queste coordinate nella formula precedente ottenendo:

$$I_x = 8m \left( \frac{l^2}{2} \right) = 4ml^2, \quad I_{\vec{CM}} = 4ml^2$$

### Cubo omogeneo

Rifacciamo quanto appena fatto per un cubo omogeneo di massa  $M$ . Per quanto riguarda il centro di massa, avremo che il baricentro è dato da:

$$r_{\vec{CM}} = \frac{1}{M} \int dm \vec{r}$$

Con la densità volumetrica di massa:

$$dm = \rho dv, \quad \rho = \frac{dm}{dv} = \frac{M}{l^3}$$

Possiamo quindi impostare l'integrale:

$$x_{\vec{C}M} = \frac{\rho}{M} \int_0^l x dx \int_0^l dy \int_0^l dz = \frac{\rho}{M} \frac{l^4}{2} = \frac{l}{2}$$

Che è identico al caso discreto.

Calcoliamo allora il momento di inerzia:

$$I_x = \int dm(y^2 + z^2)$$

è perfettamente analogo al caso precedente, solo considerando variazioni continue di massa. Si riprende la densità volumetrica di massa:

$$dm = \rho dv, \quad \rho = \frac{dm}{dv} = \frac{M}{l^3}$$

e si imposta l'integrale:

$$I_x = \rho \int dx dy dz (y^2 + z^2) = \rho \int_{\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} dx \int_{\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} dy \int_{\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} (y^2 + z^2) dz = \rho l \int_{\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} (lx^2 + \frac{y^3}{3} \Big|_{\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}}) dx = [...]$$

che dà il risultato finale di:

$$I = \frac{Ml^2}{6}$$

### Teorema degli assi paralleli

Il teorema degli assi paralleli, anche noto come teorema di Steiner, ci permette di calcolare in modo più agevole il momento d'inerzia di un corpo. Supponiamo di aver calcolato il momento di inerzia di un corpo rispetto al suo centro di massa. Poniamo però che il corpo stia adesso ruotando, ma non attorno al suo centro di massa, bensì attorno ad un asse che è parallelo a quello da cui eravamo partiti e sta da esso ad una certa distanza  $D$ . Possiamo allora dire che:

$$I' = I_{CM} + MD^2$$

Dimostriamo questo risultato. Se il momento d'inerzia era stato calcolato ad una distanza  $d'$  da  $dm$ , allora:

$$\vec{a}' = \vec{D} + \vec{d}$$

Da cui si imposta l'integrale:

$$\begin{aligned} I' &= \int dm d'^2 = \int dm (\vec{D} + \vec{d}) \cdot (\vec{D} + \vec{d}) = \int dm (D^2 + 2\vec{d} \cdot \vec{D} + d^2) \\ &= D^2 \int dm + 2\vec{D} \cdot \int dm \vec{d} + \int dm d^2 \end{aligned}$$

Notiamo che:

$$2\vec{D} \cdot \int dm \vec{d} = 2D_x \int dm x + 2D_y \int dm y = 0$$

L'integrale allora potrà ridursi a:

$$I' = D^2 \int dm + \int dm (x^2 + y^2) = MD^2 + I_{CM}$$

Vediamo un'applicazione.

### **Applicazione del teorema di Steiner**

Supponiamo di avere un manubrio formato da due sfere di massa  $M$  e raggio  $R$  unite fra di loro da un'asta lunga  $L$  e di massa  $m$ . Cerchiamo di calcolare il momento di inerzia del corpo rispetto a un asse passante per il centro dell'asta. Innanzitutto potremo calcolare il momento di inerzia dell'asta, rispetto all'asse che passa attraverso il suo centro:

$$I_{asta} = I_{asta}^{CM} = \frac{mL^2}{12}$$

Si calcolerà poi il momento di inerzia di una sfera, applicando il teorema di Steiner:

$$I_{sfera} = I_{sfera}^{CM} + M(R + \frac{L}{2})^2 = \frac{2}{5}MR^2 + M(R + \frac{L}{2})^2$$

Il momento di inerzia totale a questo punto sarà dato da:

$$I_{tot} = I_{asta} + 2I_{sfera} = \frac{mL^2}{12} + 2(\frac{2}{5}MR^2 + M(R + \frac{L}{2})^2)$$

## **58 Momento angolare di un corpo rigido attorno ad un asse**

Vediamo come descrivere il momento angolare di un corpo rigido formato da una distribuzione di massa continua di punti materiali. Avremo che, se il corpo ruota attorno ad un asse con  $\omega$  velocità angolare costante, allora ogni suo

punto ruoterà attorno a tale asse con velocità angolare costante, descrivendo una circonferenza ortogonale all'asse e di raggio tale alla distanza del punto dall'asse. Possiamo allora applicare la definizione di momento angolare:

$$\vec{L} = \sum m_i \vec{R}_i \times \vec{v}_i$$

Ricordiamo allora che  $\vec{v}_i = \vec{\omega} \times \vec{R}_i$  per quanto riguarda il moto circolare uniforme. Allora:

$$\vec{L} = \sum m_i \vec{R}_i \times (\vec{\omega} \times \vec{R}_i)$$

Questo può essere risolto applicando il prodotto vettoriale triplo (niente baci sui taxi!):

$$\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) = \vec{b} \times (\vec{a} \cdot \vec{c}) - \vec{c} \times (\vec{a} \cdot \vec{b})$$

da cui:

$$\vec{L} = \sum m_i (R_i^2 \vec{\omega} - (\vec{R}_i \cdot \vec{\omega}) \vec{R}_i) = \sum m_i (R_i^2 \vec{\omega} - \omega R_i \vec{R}_i \cos \theta_i)$$

A questo punto conviene scomporre  $\vec{R}_i$  in due componenti (e da qui la grande intuizione): una parallela alla velocità angolare  $\vec{\omega}$  ( $\hat{\omega}$ ), e una ortogonale ad essa ( $\hat{u}$ ):

$$\vec{R}_i = \hat{\omega} R_i \cos \theta_i + \hat{u} R_i \sin \theta_i$$

Questo ci porta a riscrivere  $\vec{L}$  in due componenti, quella lungo  $\hat{\omega}$  e quella lungo  $\hat{u}$ . Dai calcoli, si avrà che la componente lungo  $\hat{\omega}$  (detta componente assiale) varrà:

$$\vec{L}_z = \sum m_i d_i^2 \omega = I_z \omega$$

Ovvero momento di inerzia per velocità angolare, come si era già trovato. Notiamo che siamo passati da  $R_i$  a  $d_i$ , ovvero  $R_i \sin \theta_i$ , la distanza del punto dall'asse di rotazione del corpo.

Particolare sarà invece la componente ortogonale  $\hat{u}$ , che però si osserverà solo nel caso l'asse di rotazione non sia coincidente con uno degli assi di simmetria della distribuzione di massa del corpo rigido:

$$L_u = \sum m_i \omega R_i^2 \sin \theta_i \cos \theta_i$$

Lo svolgimento completo dei calcoli si può trovare a pagina 68 di: [https://github.com/Guray00/IngegneriaInformatica/blob/master/PRIMO%20ANNO/II%20SEMESTRE/Fisica%20Generale%20I/Dispense%20\(A.A.%20corrente\)/Lezione11-Moto\\_di\\_un\\_Corpo\\_RIgido.pdf](https://github.com/Guray00/IngegneriaInformatica/blob/master/PRIMO%20ANNO/II%20SEMESTRE/Fisica%20Generale%20I/Dispense%20(A.A.%20corrente)/Lezione11-Moto_di_un_Corpo_RIgido.pdf)

### **Rotazione in distribuzione di massa asimmetrica**

Vediamo nel dettaglio la situazione dove la distribuzione di massa è asimmetrica rispetto all'asse di rotazione (può comunque essere simmetrica, solo su

un asse sghembo rispetto a quello di rotazione). Immaginiamo un manubrio formato da un'asta di massa trascurabile e lunghezza  $l$  e due punti materiali di massa  $M$  alle sue estremità. Il manubrio è piegato di un angolo  $\theta$  rispetto alla verticale, e ruota invece proprio attorno alla verticale. Avremo che il suo momento angolare sarà la somma dei momenti delle due masse:

$$\vec{L} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2$$

L'angolo formato tra la velocità angolare e il momento angolare sarà allora  $(\frac{\pi}{2} - \theta)$ , da cui:

$$\vec{L} = \sum m_i \vec{R}_i \times \vec{v}_i, \quad v_i = \omega \frac{l}{2} \sin \theta \Rightarrow L_1 = L_2 = M \frac{l}{2} \omega \frac{l}{2} \sin \theta$$

Dividiamo allora questo momento sui due assi:

$$L_{1z} = L_{2z} = L_1 \cos \frac{\pi}{2} - \theta = L_1 \sin \theta = 2L_1 \sin \theta = \frac{M}{2} l^2 \omega \sin \theta^2 = I_z \omega$$

Che corrisponde al momento di inerzia rispetto all'asse di rotazione  $\hat{\omega}$ . Notiamo che qui il momento angolare vale  $I_z = \frac{M}{2} l^2 \sin^2 \theta$ , e  $l \sin \theta$  non è altro che la distanza  $d_i$  del punto materiale dall'asse di rotazione. Ergo vale la solita formula per il momento d'inerzia di una massa sospesa:

$$I_z = m d_i^2, \quad d_i = l \sin \theta \Rightarrow I_z = \frac{M}{2} l^2 \sin^2 \theta$$

Il momento angolare è inoltre costante lungo l'asse  $z$ : il momento delle forze sarà tutto sull'asse  $x$ , visto che l'unica forza in gioco è la forza peso. Si avrà allora che:

$$\tau_z = 0, \quad \frac{dL}{dt} = \vec{\tau} \Rightarrow \frac{dL_z}{dt} = 0, \quad L_z = \text{const.}$$

La componente  $L_{\perp}$  sarà invece in continua variazione, come avevamo già visto.

### **Seconda equazione cardinale per momento angolare parallelo all'asse**

Abbiamo quindi che per distribuzioni di massa simmetrica ( $\vec{L} \parallel \vec{\omega}$ ):

$$\vec{L} = I_z \vec{\omega}$$

Possiamo derivare  $\vec{L}$ :

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{dI_z \vec{\omega}}{dt} = I_z \vec{\alpha}$$

Questo significa che il momento delle forze esterne agenti rispetto all'asse di rotazione permette di calcolare l'accelerazione angolare  $\vec{\alpha}$ .

## 59 Lavoro nel moto rotazionale

Prendiamo il caso di una carrucola spinta da una forza  $T$  posta ad una distanza  $R$  dal centro. Avremo che il lavoro su uno spostamento infinitesimo  $d\mathcal{L}$  è:

$$d\mathcal{L} = \vec{T} \cdot \vec{dr} = T dr \cos 0, \quad dr = R d\theta$$

$$d\mathcal{L} = T R d\theta = \tau_z d\theta$$

Quindi il momento torcente compie un lavoro pari al momento della forza per la variazione dell'angolo. In generale il lavoro per una rotazione finita dall'angolo  $\theta_i$  all'angolo  $\theta_f$  sarà:

$$\mathcal{L}_{\theta_i \rightarrow \theta_f} = \int_{\theta_i}^{\theta_f} \tau_z d\theta = \int_{\theta_i}^{\theta_f} I_z \dot{\omega} d\theta = \int_{\theta_i}^{\theta_f} I_z \dot{\omega} \omega dt = \int_{\theta_i}^{\theta_f} I_z \frac{d\omega}{dt} \omega dt = \int_{\theta_i}^{\theta_f} I_z \omega d\omega$$

Che da il risultato:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} I_z \omega_f^2 - \frac{1}{2} I_z \omega_i^2$$

### Conservazione dell'energia rotazionale

Riprendiamo la nostra carrucola. Sia una massa  $m$  attaccata alla carrucola attraverso una fune. Calcoliamo allora la variazione di energia meccanica quando la massa scende di un tratto  $h$ , notando che  $h = R\theta$ :

$$\Delta E = L_{NC} = L_{\vec{T}} - L_{\vec{T}} + L_{R_v} = 0$$

Ergo se non ci sono forze non conservative l'energia meccanica si conserva:

$$E_i = E_f, \quad E_i = mgh_i, \quad E_f = \frac{1}{2} m v_m^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 + mgh_f$$

$$\Rightarrow mg(h_i - h_f) = \frac{1}{2} m v_m^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$$

### Esempio di applicazione della dinamica rotazionale

Vediamo un problema che sapevamo già risolvere attraverso la dinamica, e applichiamo quello che adesso conosciamo sulla dinamica rotazionale per trovare risultati più precisi.

Il problema presuppone una carrucola di raggio  $R$  con due masse,  $m_1$  e  $m_2$ . Le masse collegate dalla carrucola agiranno su di essa con due tensioni,  $T_1$  e  $T_2$ , dipendenti dalla forza peso. Possiamo immaginare queste due tensioni identiche (ovvero sia il filo che la carrucola trascurabili in massa) e impostare le equazioni dinamiche:

$$\begin{cases} m_1 \vec{a}_1 = \vec{T}_1 - m_1 g \\ m_2 \vec{a}_2 = \vec{T}_2 - m_2 g \end{cases}, \quad \vec{T}_1 = \vec{T}_2, \quad \vec{a}_1 = -\vec{a}_2 \Rightarrow m_1 \vec{a} + m_1 g = m_2 g - m_2 \vec{a}$$



Questo si ottiene dal fatto che l'accelerazione in alto di una massa comporta l'accelerazione in basso dell'altra, e viceversa, e dà il risultato:

$$\vec{a} = g \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}$$

Questo risultato è corretto nel caso la carrucola, ricordiamo, abbia massa nulla: le equazioni della dinamica rotazionale ci forniscono un sistema più completo che può invece tenere conto della sua massa. Partiamo dall'equazione trovata prima:

$$I_z \vec{\alpha} = \tau_{tot}$$

Dove  $\vec{\alpha}$  è l'accelerazione angolare della carrucola,  $I_z$  il suo momento d'inerzia, e  $\tau_{tot}$  il momento risultante delle forze che agiscono su di essa. Possiamo calcolare separatamente questi termini. Iniziamo dal momento d'inerzia, assumendo la carrucola come un disco di massa uniforme  $M$ :

$$I_z = \frac{MR^2}{2}$$

Vediamo poi il momento risultante delle forze  $\tau_{tot}$ . Sarà necessario, per tener conto della massa della carrucola, adoperare due diverse tensioni, una per ogni capo della corda,  $T_1$  e  $T_2$ , da non assumere come uguali fra loro:

$$\tau_{tot} = \vec{R} \times (T_2 - T_1)$$

Infine  $\vec{\alpha}$  accelerazione angolare è proporzionale di  $R$  all'accelerazione  $a$ , che definiamo come prima come l'accelerazione in direzione di una sola massa (la prima):

$$\vec{\alpha} = \frac{a}{R}$$

Possiamo sostituire quanto trovato nella formula iniziale per ottenere che:

$$I_z \vec{\alpha} = \tau_{tot} = \frac{MR^2}{2} \frac{a}{R} = (T_2 - T_1)R \Rightarrow \frac{Ma}{2} = (T_2 - T_1)$$

Ricaviamo quindi la  $(T_2 - T_1)$  dalle equazioni dinamiche ricavate precedentemente:

$$T_2 - T_1 = m_2 g - m_2 a - m_1 a - m_1 g$$

Da cui l'equazione finale:

$$\frac{Ma}{2} = m_2 g - m_2 a - m_1 a - m_1 g \Rightarrow a = g \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2 + \frac{M}{2}}$$

Notiamo che l'unica differenza dall'approccio precedente è il termine  $\frac{M}{2}$  al denominatore. Se assumiamo  $M = 0$ , le formule corrispondono (che è come dovrebbe essere!).

### Applicazione della conservazione dell'energia rotazionale

Lo stesso risultato si può ottenere attraverso la conservazione dell'energia rotazionale. Nel sistema non agiscono forze non conservative, o almeno le tensioni della fune non svolgono lavoro e non lo fa nemmeno la reazione vincolare della carrucola. Avremo quindi che in qualsiasi momento, l'energia meccanica si conserva:

$$\frac{d}{dt}E = 0$$

Possiamo quindi impostare l'energia meccanica come:

$$E = m_1gh_1 + m_2gh_2 + \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \frac{1}{2}I_z\omega^2$$

Dove abbiamo le energie potenziali e cinetiche delle masse e l'energia rotazionale della carrucola. Problematici potrebbero essere i fattori  $h_1$  e  $h_2$ . Imponiamo allora l'inestensibilità della fune: diciamo che la sua lunghezza complessiva  $l$  è sempre costante, ergo le altezze  $h_1$  e  $h_2$  delle masse dovranno essere una l'opposta dell'altra:

$$h_1 = -h_2$$

Otteniamo così un'equazione da derivare, applicando la relazione già usata prima riguardo alle accelerazioni,  $a_1 = -a_2$ .

$$E = m_1gh - m_2gh + \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \frac{1}{2}I_z\omega^2$$

$$\frac{d}{dt}E = m_1gv - m_2gv + m_1av + m_2av + \frac{Mva}{2} = 0$$

Per quanto riguarda il fattore  $\frac{Mva}{2}$ , possiamo vedere come si svolgono i calcoli sostituendo  $I_z$  prima o dopo la derivazione:

$$\frac{1}{2}I_z\omega^2 = \frac{1}{2}\frac{MR^2}{2}\omega^2 = \frac{MR^2\omega^2}{4} = \frac{Mv^2}{2}, \quad \text{da } \omega R = v, \quad \frac{d}{dt}\frac{Mv^2}{2} = \frac{Mva}{4}$$

oppure:

$$\frac{d}{dt}\frac{1}{2}I_z\omega^2 = I_z\omega\alpha = \frac{MR^2}{2}\omega\alpha = \frac{MR^2}{2}\frac{va}{R^2} = \frac{Mva}{4}$$

Come vediamo, dividendo per  $v$  (che sappiamo essere  $\neq 0$  in caso di non equilibrio) si ha:

$$\frac{Ma}{2} = m_2g - m_2a - m_1a - m_1g \Rightarrow a = g\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2 + \frac{M}{2}}$$

Che è esattamente identico a quanto avevamo ottenuto con gli altri metodi. Tomato tomato.

## 60 Introduzione all'elettrostatica

L'elettrostatica è la branca della fisica che si occupa di cariche elettriche. Possiamo interpretare la carica come la capacità di un corpo di esercitare forza elettrostatica.

### Carica

La carica è una caratteristica di un corpo data dalla struttura molecolare, o meglio dall'interazione degli elettroni e dei protoni che costituiscono le sue molecole. La carica ha un segno: può essere positiva o negativa. Si decide per convenzione la carica dell'elettrone essere negativa. Vale il principio secondo cui cariche dello stesso segno si respingono e cariche di segno discorde si respingono. Può essere utile osservare brevemente la struttura dell'atomo:

### Introduzione informale all'atomo

L'atomo è la particella fondamentale degli elementi chimici. E' formato da un nucleo di neutroni e protoni attorno al quale orbitano gli elettroni. Queste tre particelle elementari hanno le seguenti caratteristiche:

Particella	Massa	Carica
Protone	$1.673 \times 10^{-27}$ kg	$+1 e$
Elettrone	$9.109 \times 10^{-31}$ kg	$- 1 e$
Neutrone	$1.675 \times 10^{-27}$ kg	0

Introduciamo un'unità di misura per la carica: il Coulomb (C). Si definisce la carica fondamentale come la carica di un protone o l'opposto della carica di un elettrone, che vale  $1.602 \times 10^{-19}$  C. Visto che la carica viene espressa da quantità discrete di particelle elementari, è deducibile che essa sia quantizzata.

Possiamo poi dire che la dimensione di un nucleo di atomo è nell'ordine del Fermi, unità di misura corrispondente a  $10^{-15}$  m, mentre il raggio atomico è nell'ordine dell'angstrom, corrispondente invece a  $10^{-10}$  m. Dell'atomo possiamo definire il numero di massa  $A$  e il numero atomico  $Z$ . Il numero di massa corrisponde al numero di particelle elementari (protoni e neutroni) che compongono il nucleo, mentre il numero atomico corrisponde al solo numero di protoni. In generale è quindi vero che  $A > Z$ . Si ha poi che il numero di elettroni, in un atomo con carica neutra, è uguale al numero di protoni. Il numero atomico caratterizza periodicamente gli elementi chimici: si ha che un atomo con un numero di massa (quindi di neutroni) diverso da quello del suo elemento è un isotopo, e un atomo con numero di elettroni diverso da quello dei suoi protoni è uno ione (che può essere positivamente carico, quando perde elettroni, e negativamente carico, quando ne acquista).

### Materiali neutri e a reticolo polare

Si possono distinguere comportamenti diversi della materia:

- **Neutro** Di materiali caratterizzati da legami covalenti, e che quindi hanno una distribuzione neutra di carica.
- **Polare** Di materiali caratterizzati da legami ionici, dove alcuni ioni hanno carica positiva e altri carica negativa. Nel complesso, in genere, la carica è neutra, ma si potrà polarizzare il materiale in modo da renderlo localmente carico in una certa zona.

### **Elettricità statica in una bacchetta**

Poniamo di avere una bacchetta di vetro e di strofinarla contro un panno di lana. Saremo adesso in grado di sollevare dei piccoli pezzi di carta semplicemente avvicinandogli la bacchetta. Questo semplice esperimento può essere spiegato dall'elettrostatica: strofinando la bacchetta sul panno, abbiamo costretto i due corpi a scambiarsi cariche. La carica complessiva resterà costante, per il principio di conservazione della carica: la bacchetta cederà carica negativa al panno e si caricherà quindi positivamente. Quando la avviciniamo alla carta, la bacchetta, ora carica positivamente, indurrà nella carta una carica negativa sul lato superiore (e di conseguenza una carica positiva sul lato inferiore). Questo produrrà una forza di attrazione (forza di Coloumb) che vincerà l'attrazione gravitazionale, portando i pezzi di carta a sollevarsi.

### **Induzione elettrostatica**

Il comportamento appena dimostrato dalla carta è un'esempio di induzione elettrostatica. Supponiamo di avere una sbarretta metallica: avvicinando una carica positiva alla sua destra, o una negativa alla sua sinistra, costringiamo la carica positiva ad accumularsi a destra e quella negativa a sinistra, caricando localmente la sbarretta. Nella pratica, la variazione di carica è data dalla migrazione degli elettroni, liberi di spostarsi nel metallo, da destra verso sinistra: gli ioni rimasti a destra saranno carichi positivamente. Se a questo punto dividessi l'oggetto a metà, otterrei due corpi carichi globalmente (o almeno che non potrebbero trasferire fra di loro carica per contatto).

### **Distribuzione simmetrica di carica**

Intuitivamente, una sfera carica positivamente tende a concentrare le sue cariche verso l'esterno, in modo da minimizzare le forze repulsive. In modo analogo a prima, non sono le "cariche" in sé per sé a muoversi, ma gli elettroni che vengono trasferiti dall'esterno verso l'interno, lasciando gli ioni sul bordo carichi positivamente.

### **Bilancia a torsione**

L'attrazione o repulsione elettromagnetica (quindi la forza elettromagnetica) può essere misurata attraverso uno strumento noto come bilancia a torsione. La bilancia a torsione è un'apparato formato da una sbarra avente due sferette cariche alle estremità: la sbarra può ruotare su se stessa rispetto ad un asse

verticale, torcendo il perno che la tiene ferma. Avvicinando cariche diverse alle sferette, possiamo osservare una rotazione della sbarra proporzionale alla forza elettromagnetica esercitata dalle due sferette. Chiaramente, se le due sferette tenderanno ad avvicinarsi, le loro cariche saranno opposte, uguali se viceversa. Un'apparato simile fu usato da Cavendish per misurare la costante gravitazionale  $G$ , usando però masse molto più grandi.

## 61 Forza di Coulomb

La forza di Coulomb è la forza che due cariche esprimono fra di loro. Poste due cariche  $a$  e  $b$ , la sua espressione è:

$$\vec{F}_{ab} = k \frac{q_a \cdot q_b}{r^2} \hat{r}$$

Questa sarà la forza espressa su  $b$  da  $a$ .  $q_a$  e  $q_b$  sono rispettivamente le cariche di  $a$  e  $b$ ,  $r$  distanza fra di loro, e  $\hat{r}$  il vettore:

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}_b - \vec{r}_a}{|\vec{r}_b - \vec{r}_a|}$$

Notiamo che questa forza è espressa come inverso del quadrato delle distanze, proprio come lo era l'attrazione gravitazionale. La differenza sta nel fatto che la forza di Coulomb può avere segno negativo, quindi respingere oltre che attrarre. Ovvero, rispetta il terzo principio della dinamica:

$$\vec{F}_{ab} = -\vec{F}_{ba}$$

e le caratteristiche di repulsività e attrattività che avevamo prima riportato: con  $qA$  e  $qB$  discordi, dirige l'uno verso l'altro corpo. In caso contrario, li allontana. Vediamo la costante  $k$ :

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

dove  $\epsilon_0$  è la **costante dielettrica nel vuoto**, anche detta permittività dielettrica nel vuoto, che vale  $8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$ , e  $k$ , chiamata **costante di Coulomb**, vale  $9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$ .

### Principio di sovrapposizione

Nel caso su una carica agiscano più cariche, la forza risultante sarà semplicemente la somma delle forze rispetto ad ogni singola carica:

$$\vec{F} = k \sum_i^n \frac{q_1 q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Nel caso le cariche non siano allineate, occorrerà dividere la forza nelle componenti relative agli assi, e trovare quindi il vettore risultante.

## 62 Campo elettrico

Dal principio appena enunciato ricaviamo che la forza di Coulomb relativa a una singola carica  $q_1$  è:

$$\vec{F} = k \sum_i^n \frac{q_1 q_i}{r_i^2} \hat{r}_i = q_1 \sum_i k \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Diciamo che  $q_1$  è la nostra carica di prova, dal valore di 1 C. Possiamo allora dividere entrambi i lati dell'eguaglianza per  $q_1$ :

$$\frac{\vec{F}}{q_1} = \sum_i k \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i = \vec{E}$$

chiamiamo questa nuova misura campo elettrico. Il campo elettrico è un campo, ovvero una funzione:

$$\vec{E} : \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}^3$$

che associa ad ogni punto nello spazio un vettore, che rappresenta la forza che subirebbe una carica di 1 C in quel punto. Questa definizione operativa può essere usata nella pratica per calcolare il campo elettrico in un punto: si collochi una carica nello spazio, ne si misuri la forza risultante, il quoziente fra questi due valori sarà il campo elettrico in quel punto. Converrà che la nostra carica di prova sia piccola in modo da non influire sulla configurazione di cariche che vogliamo analizzare.

### Campo generato da una carica

Analizziamo un caso ad alta simmetria: una singola carica nello spazio. Applicando la definizione, abbiamo che il campo nei pressi della carica sarà:

$$\frac{F}{q_p} = \frac{k \frac{q_p q_1}{r^2} \hat{r}}{q_p} = k \frac{q_1}{r^2} \hat{r}$$

Il campo elettrico avrà quindi simmetria sferica attorno al punto generatore del campo stesso. Per avere una visione migliore del campo, introduciamo le:

### Linee di campo

Le linee di campo di un campo vettoriale sono un'insieme di linee parallele in ogni punto al campo vettoriale. Possiamo usare le linee di campo per visualizzare gli andamenti dei campi.

### Dipolo elettrico

Consideriamo il campo elettrico generato da una coppia di cariche  $q$  di segno opposto  $+q$  e  $-q$  separate da una distanza  $d$ . Sia l'origine del piano cartesiano coincidente col centro del dipolo: avremo che  $+q$  ha coordinata  $(0, 0, \frac{d}{2})$ , e  $-q$  ha coordinata  $(0, 0, -\frac{d}{2})$ . Calcoliamo il campo lungo l'asse del dipolo  $z$  e lungo un'asse ad esso perpendicolare (prendiamo  $x$ ,  $y$  sarebbe equivalente).

- **Lungo z:** sarà il caso più semplice, basterà applicare la formula del campo elettrico generato da una carica ad entrambe le cariche:

$$\vec{E} = \sum k \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

considerando la distanza  $\pm \frac{d}{2}$  dall'origine lungo z:

$$\begin{aligned} \vec{E}(0, 0, z) &= \frac{kq\hat{z}}{(z - \frac{d}{2})^2} - \frac{kq\hat{z}}{(z + \frac{d}{2})^2} = kq\hat{z} \left( \frac{1}{(z - \frac{d}{2})^2} - \frac{1}{(z + \frac{d}{2})^2} \right) \\ &= kq\hat{z} \left( \left( z - \frac{d}{2} \right)^{-2} - \left( z + \frac{d}{2} \right)^{-2} \right) = \frac{kq\hat{z}}{z^2} \left( \left( 1 - \frac{d}{2z} \right)^{-2} - \left( 1 + \frac{d}{2z} \right)^{-2} \right) \end{aligned}$$

A noi interessa il caso in cui  $z$  sia molto maggiore di  $d$ , ovvero  $z \gg d$ . Questo ci permette di usare l'approssimazione:

$$z \gg d \Rightarrow \left( 1 + \frac{d}{2z} \right)^{-2} \approx \left( 1 - 2\frac{d}{2z} \right) = \left( 1 - \frac{d}{z} \right)$$

Questo ci dà il risultato:

$$\frac{kq\hat{z}}{z^2} \left( \left( 1 - \frac{d}{z} \right)^{-2} - \left( 1 + \frac{d}{z} \right)^{-2} \right) \approx \frac{kq\hat{z}}{z^2} \left( \left( 1 + \frac{d}{z} \right) - \left( 1 - \frac{d}{z} \right) \right) = 2 \frac{kqd}{z^3} \hat{z}$$

Ciò significa che a grandi distanze  $z$ , o a distanze  $d$  trascurabili, il campo elettrico a  $z$  dal dipolo lungo il suo asse vale  $2 \frac{kqd\hat{z}}{z^3} \frac{N}{C}$ . Definiamo allora la quantità  $p$ , detta **momento di dipolo**, come:

$$p = qd, \quad \vec{E}(0, 0, z) = 2 \frac{kqd}{z^3} \hat{z} = 2 \frac{kp}{z^3} \hat{z}$$

Che ci dà il risultato finale. Notiamo  $\hat{z}$  versore essere diretto verso  $\vec{z}$  ovvero lo spostamento: in sostanza, il campo del dipolo è sempre diretto nella stessa direzione. Se siamo vicini al polo positivo, tenderemo ad allontanarci dal dipolo; se siamo vicini al polo negativo, tenderemo ad avvicinarci.

- **Lungo x/y:** assumiamo il caso  $x$  essere uguale a  $y$ : in entrambi i casi il campo sarà calcolato sul piano ortogonale al dipolo. Calcoliamo, come prima, il campo generato dalle cariche: avremo che la componente lungo  $x$ , parallela all'asse del dipolo, è nulla (le componenti ortogonali si

annullano fra di loro). A restare sarà solamente la componente parallela all'asse del dipolo, che avrà il valore di due volte il campo generato da una singola carica in quel punto, negativo. Calcoliamo quest'ultimo valore: è utile costruire un triangolo rettangolo con un cateto sulla semidistanza fra i poli e l'altro sulla distanza tra il centro del dipolo e il punto  $(x, 0, 0)$ . A questo punto la distanza  $r$  sarà l'ipotenusa del triangolo:

$$r = \sqrt{x^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

e il campo:

$$\vec{E}(x, 0, 0) = -2 \frac{kq\hat{z}}{\left(x^2 + \frac{d^2}{4}\right)}$$

A noi interessa soltanto il campo lungo  $z$ , ergo dobbiamo moltiplicare il campo per il seno dell'angolo  $\alpha$  che l'ipotenusa forma sull'asse  $x$ .  $\sin \alpha$  è dato da cateto minore su ipotenusa, ergo:

$$\sin \alpha = \frac{\frac{d}{2}}{\sqrt{x^2 + \frac{d^2}{4}}}, \quad \vec{E}(x, 0, 0) = -2 \frac{kq\hat{z}}{\left(x^2 + \frac{d^2}{4}\right)} \frac{\frac{d}{2}}{\sqrt{x^2 + \frac{d^2}{4}}} = -\frac{kqd\hat{z}}{\left(x^2 + \frac{d^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Come prima, imponiamo il fatto che  $x$  è molto maggiore di  $d$ :

$$x \gg d \Rightarrow \vec{E}(x, 0, 0) = -\frac{kqd}{x^3}\hat{z} = -\frac{kp}{x^3}\hat{z}$$

Notiamo dal risultato finale che il campo lungo l'asse ortogonale ad un dipolo è antiparallelo all'asse del dipolo stesso.

## 63 Densità di carica

Passiamo al calcolo del campo elettrico su distribuzioni continue di cariche.

- **Densità (di volume) di carica**

Consideriamo l'incremento di carica  $dq$  sul volume infinitesimo  $dV$ . Possiamo definire una densità  $\rho_q$  di carica tale per cui:

$$\rho_q = \frac{dq}{dV}$$

si misura in  $\frac{C}{m^3}$ . Possiamo calcolare il campo elettrico dalla densità di carica su un infinitesimo di volume in  $\vec{r}$  visto da  $\vec{r}'$  applicando la forza di Coulomb, come:

$$d\vec{E}(\vec{r}) = \frac{k\rho_q \vec{r}' dV}{(r - r')^3} (\vec{r} - \vec{r}')$$



Dove notiamo il cubo al denominatore è lì solamente per normalizzare  $(\vec{r} - \vec{r}')$  in  $(r - r')$  versore. A questo punto potremo passare alla distribuzione completa di cariche sul volume  $V$  prendendo l'integrale:

$$\vec{E}(\vec{R}) = \int_V \frac{k\rho_q \vec{r}'}{(r - r')^3} (\vec{r} - \vec{r}') dV$$

- **Densità superficiale di carica**

Similmente, possiamo definire la densità superficiale di carica:

$$\sigma_q = \frac{dq}{dA}$$

si misura in  $\frac{C}{m^2}$ .

- **Densità lineare di carica**

Infine, possiamo definire la densità lineare di carica:

$$\lambda_q = \frac{dq}{dl}$$

si misura in  $\frac{C}{m}$ .

Vediamo alcune applicazioni della densità di carica per descrivere il campo generato da diversi oggetti:

- **Anello uniformemente carico**

Calcoliamo la campo generato da un'anello metallico  $A$  uniformemente carico, giacente sul piano  $xy$  dello spazio, lungo il suo asse di simmetria centrale. Consideriamo l'oggetto solo nella sua lunghezza, ergo usiamo la densità lineare di carica  $\lambda_q$ . Anche in questo caso è efficace costruire un triangolo rettangolo, con un cateto posto sulla distanza fra l'origine il punto  $(0, 0, z)$ , e l'altro posto sul raggio dell'anello. Avremo che le componenti lungo il piano parallelo a  $xy$  si annullano, e l'unica risultante è quella in  $z$ . Calcoliamo allora il campo infinitesimo come il campo generato sul punto  $(0, 0, z)$  per il coseno dell'angolo fra l'asse  $z$  e la congiungente del punto con un altro punto sul raggio, ovvero il rapporto fra la distanza  $z$  e l'ipotenusa del triangolo:

$$d\vec{E}(0, 0, z) = \frac{k dq \hat{z}}{(r^2 + z^2)} \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}}$$

Calcoliamo allora il campo totale come l'integrale:

$$\vec{E}(0, 0, z) = \int_A \frac{k \hat{z}}{(r^2 + z^2)} \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \lambda_q dl$$

Notiamo che nessun termine dentro l'integrale dipende da  $l$ , e  $\int_A dl$  non è altro che  $2\pi r$ , ergo:

$$\vec{E}(0, 0, z) = \frac{k\hat{z}}{(r^2 + z^2)} \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \lambda_q \int_A dl = \frac{k2\pi r \lambda_q \hat{z}}{(r^2 + z^2)} \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}}$$

Abbiamo che la carica totale sull'anello è:

$$Q = 2\pi r \lambda_q, \quad \vec{E}(0, 0, z) = \frac{kzQ}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \hat{z}$$

Da cui la soluzione esatta. Possiamo ora considerare il comportamento "da lontano" dell'anello, applicando la stessa approssimazione di prima:

$$z \gg r \Rightarrow \vec{E}(0, 0, z) = \frac{kQ}{z^2} \hat{z}$$

Può essere interessante fare la considerazione inversa: in punti molto vicini all'anello, ovvero dove  $z \ll r$ , si ha:

$$z \ll r \Rightarrow \vec{E}(0, 0, z) = z \frac{kQ}{r^3}$$

Si nota che per una carica  $-q$  di segno opposto alla  $Q$  dell'anello, la forza ha effettivamente la forma della legge di Hooke, e forma un'oscillatore armonico.

- **Disco uniformemente carico** Vediamo un caso simile: il campo generato da un disco  $D$  uniformemente carico, giacente sul piano  $xy$  dello spazio, lungo il suo asse di simmetria centrale. In questo caso considereremo l'oggetto sulla sua superficie, ergo useremo la densità superficiale di carica  $\sigma_q$ . Consideriamo lo stesso schema precedente, ma variando  $r$  dal centro della circonferenza fino al suo bordo: avremo che su un frammento infinitesimo del disco (ergo una circonferenza con lunghezza  $2\pi r$ ) il campo generato sarà:

$$d\vec{E}(0, 0, z) = \frac{kz\hat{z}}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} 2\pi r \sigma_m dr$$

Troviamo allora il campo totale prendendo l'integrale:

$$\begin{aligned} \vec{E}(0, 0, z) &= \int_0^R \frac{kz\hat{z}}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} 2\pi r \sigma_m dr = kz\sigma_m \hat{z} \pi \int_0^R \frac{2r dr}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \\ &= kz\sigma_m \hat{z} \pi \left[ -\frac{2}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right]_0^R = kz\sigma_m \hat{z} \pi \left( \frac{2}{z} - \frac{2}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right) \end{aligned}$$

$$= 2k\sigma_m\pi \left( 1 - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right)$$

Da cui l'equazione finale. Notiamo come per:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \vec{E} = 2k\sigma_m = \frac{\sigma_m}{2\epsilon_0}$$

è il campo generato da un piano infinito (a qualunque distanza!), che è una buona approssimazione per l'armatura di un condensatore lontano dai bordi.

- **Filo uniformemente carico**

Come ultimo esempio prendiamo un filo di lunghezza  $2l$ , centrato sull'origine, e calcoliamone il campo a una certa distanza  $x$ . Applicando la forza di Coulomb osserviamo che di poter prendere due punti, ad un capo e all'altro del filo, e calcolarne il contributo: se prendiamo  $y$  uguali ma opposte abbiamo che le forze si annullano lungo l'asse verticale  $z$ , e la risultante è tutta diretta verso il piano ortogonale (prendo  $x$ ) con modulo pari a 2 volte la componente  $x$  della forza esercitata da un singolo punto. Notiamo che questo approccio ci permette però di trovare la forza esercitata da 2 punti per volta, ergo dividiamo per due per ottenere il contributo:

$$d\vec{E}(x, 0, 0) = \frac{k\lambda dz}{z^2 + x^2} \frac{x}{\sqrt{z^2 + x^2}} \hat{x}$$

Dove il primo denominatore è il quadrato della distanza del punto sul filo da quello dove calcoliamo il campo, ovvero l'ipotenusa di un triangolo costruito sull'asse  $x$  con cateti  $l$  e  $x$ , e la seconda frazione rappresenta il coseno dell'angolo formato dall'ipotenusa e l'asse  $x$ . Prendiamo allora l'integrale per avere il campo totale:

$$\vec{E}(x, 0, 0) = \int_{-l}^l \frac{k\lambda dz}{z^2 + x^2} \frac{x}{\sqrt{z^2 + x^2}} \hat{x} = k\lambda x \hat{x} \int_{-l}^l \frac{dz}{(z^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

L'integrale calcolato si risolve attraverso sostituzione trigonometrica, e dà il risultato:

$$\int \frac{dx}{(x^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{x}{a^2 \sqrt{x^2 + a^2}} + c$$

con cui possiamo quindi risolvere:

$$\vec{E}(x, 0, 0) = k\lambda x \hat{x} \int_{-l}^l \frac{dz}{(z^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} = k\lambda x \hat{x} \left[ \frac{z}{x^2 \sqrt{z^2 + x^2}} \right]_{-l}^l$$

$$= k\lambda x \hat{x} \frac{2l}{x^2 \sqrt{l^2 + x^2}} = k\lambda \frac{2l}{x \sqrt{l^2 + x^2}} \hat{x}$$

Che è la formula per il campo generato dal filo di lunghezza finita. Sostituiamo a  $k$  il suo valore, ovvero  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ :

$$\vec{E}(x, 0, 0) = k\lambda \frac{2l}{x \sqrt{l^2 + x^2}} \hat{x} = \frac{l\lambda}{2\pi\epsilon_0 x \sqrt{l^2 + x^2}}$$

e vediamo il caso per un filo di lunghezza infinita prendendo il limite:

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \frac{l\lambda}{2\pi\epsilon_0 x \sqrt{l^2 + x^2}} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 x}$$

## 64 Flusso del campo elettrico

Si introduce adesso il concetto di flusso di un campo vettoriale, e in particolare di flusso del campo elettrico. Si inizia con un esempio piuttosto semplice:

### Flusso lungo una superficie piana

Prendiamo una superficie piana  $A$ , immersa in un campo vettoriale  $\vec{E}$ . Definiamo un vettore  $\vec{A}$  corrispondente alla normale della superficie, con modulo pari alla sua area. Definiremo allora il flusso del campo sulla superficie come:

$$\Phi_E = EA$$

Ruotiamo adesso la superficie di un certo angolo  $\theta$  (o ruotiamo il campo dello stesso angolo, poco cambia). Avremo che il flusso non è più attraverso l'intera superficie, ma attraverso una sua frazione, data dal prodotto scalare:

$$\Phi_E = EA \cos \theta = \vec{E} \cdot \vec{A}$$

### Flusso su una superficie

Le definizioni date finora sono valide su superfici localmente piane, ma spesso saremo interessati a calcolare flussi su superfici anche irregolari. Definiamo quindi, sulla base della scorsa formula, il flusso su un'elemento infinitesimo di superficie  $d\vec{A}$ :

$$d\Phi_E = \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Questo ci permette di calcolare il flusso lungo un'intera superficie  $\Omega$ , prendendo l'**integrale di superficie**:

$$\Phi_E = \int_{\Omega} \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Notiamo che il flusso può avere verso positivo (superficie e campo sono allineati), verso negativo (l'esatto contrario) e, intuitivamente, può essere nullo (nel caso in cui il campo scorra perpendicolare alla superficie).

### Flusso del campo elettrico

Il flusso può essere usato sul campo elettrico: cariche  $q$  influenzeranno il campo elettrico  $\vec{E}$  che avrà un certo flusso  $\Phi_E$  su diverse superfici. Sarà a noi utile considerare superfici chiuse, ovvero superfici che delimitano porzioni finite di spazio. Considerata una certa superficie chiusa  $\Omega$ , vediamo l'impatto sul flusso della stessa che hanno cariche poste al suo interno e al suo esterno.

- **Cariche esterne:** abbiamo una carica  $q$  posta esternamente alla nostra superficie  $\Omega$ . Possiamo dividere il flusso lungo  $\Omega$  in flusso in entrata e in uscita, ovvero il flusso del campo *entrante* nella superficie e il flusso del campo *uscente* dalla superficie:

$$\begin{aligned} d\Phi_E &= d\Phi_{E_i} + d\Phi_{E_f} = -|d\vec{A}_i \cdot \vec{E}_i| + |d\vec{A}_u \cdot \vec{E}_u| \\ &= -|d\vec{A}_i \cdot \vec{E}_i| + d\vec{A}_i \left( \frac{du}{di} \right)^2 \cdot \vec{E}_i \left( \frac{di}{du} \right)^2 = 0 \end{aligned}$$

ovvero, tutte le linee di campo che entrano nella superficie prima o poi escono dalla superficie, e il flusso netto vale necessariamente 0. I differenziali quadri rappresentano il fatto che il campo scala col quadrato della variazione dell'elemento di superficie, la superficie l'esatto opposto. In sostanza, il campo di una carica esterna alla superficie, una volta uscito, avrà valore proporzionale all'inverso del quadrato della distanza su un'area che scala come il quadrato della distanza: i due effetti si annullano e il flusso totale risulta nullo.

- **Cariche interne:** poniamo adesso  $q$  all'interno della superficie, e assumiamo temporaneamente la suddetta essere sferica. Applicando la definizione di flusso abbiamo:

$$\Phi_E = \int_{\Omega} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \vec{E} \int_{\Omega} d\vec{A}$$

Visto che il campo, dipendente dal raggio, non varia su una sfera. Il secondo termine sarà semplicemente la superficie della sfera stessa. Appliciamo quindi questo e la definizione di campo sulla forza di Coulomb:

$$\Phi_E = k \frac{q}{r^2} (4\pi r^2) = 4\pi k q$$

Questo spiega perché  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ :

$$\Phi_E = 4\pi k q = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Quest'ultimo risultato, fondamentale, prende il nome di:

## 65 Teorema di Gauss

Abbiamo appena dimostrato l'assunto fondamentale del teorema di Gauss: su una superficie sferica, il flusso del campo elettrico è:

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Facciamo alcune generalizzazioni. Innanzitutto, generalizziamo il risultato a superfici chiuse di qualsiasi forma: notiamo che tutte le linee di campo uscenti dalla sfera sono anche uscenti da una qualsiasi superficie chiusa, ergo il teorema vale per ognuna. Infine, possiamo dire che il risultato vale per qualsiasi combinazioni di cariche *interne* alla superficie, ergo:

$$\Phi_E = \sum_i^n \frac{q_i}{\epsilon_0}$$

per tutte le cariche  $i < n$  comprese all'interno della superficie. Ricordiamo che le cariche esterne non hanno invece alcun contributo.

Vediamo alcune applicazioni del teorema di Gauss per il calcolo di flussi e campi elettrici:

- **Flusso di un dipolo**

Calcoliamo il flusso generato da un dipolo su una superficie gaussiana ad esso circostante. Si ha che, su una superficie gaussiana che comprende entrambe le cariche, tutte le linee di campo escono ed entrano nella superficie, ergo il flusso totale vale 0:

$$\Phi(\vec{E}) = 0$$

Nel caso si prenda una superficie gaussiana che circonda solamente una delle cariche di dipolo, dovremo considerare tale come carica puntiforme. Ricordiamo che, data la proporzionalità del campo elettrico  $\vec{E}$  generato dal dipolo, e quella della superficie  $S$  al crescere del raggio:

$$\vec{E} \propto \frac{1}{r^3}, \quad S \propto r^2 \Rightarrow \Phi(\vec{E}) \propto \frac{1}{r}$$

Ergo un eventuale flusso dovrebbe scalare come l'inverso del raggio. N.B.: In realtà, non dovrebbe essere possibile applicare il teorema di Gauss ad un dipolo, in quanto non è possibile trovare una superficie

gaussiana che "racchiuda" l'interezza del campo. Il professore è quantomai ombroso sull'argomento, il risultato viene riportato solo a scopo indicativo.

- **Campo generato da un filo uniformemente carico con Gauss**  
Possiamo usare il teorema di Gauss per calcolare il campo elettrico generato da un filo uniformemente carico. Riprendiamo la nozione di densità lineare di carica:

$$dQ = \lambda dl$$

su una qualche lunghezza infinitesima  $dl$ . La carica complessiva di un filo di lunghezza  $h$  sarà allora:

$$Q = h\lambda$$

Vediamo poi che il sistema formato dal filo (disposto sull'asse  $z$ ) è invariante a rotazione assiale. Il campo deve quindi essere radiale. Prendiamo una superficie gaussiana cilindrica che contiene interamente il filo. Impostiamo il flusso attraverso il teorema di Gauss:

$$\Phi(\vec{E}) = \frac{h\lambda}{\epsilon_0}$$

e attraverso la definizione, tenendo conto del fatto che il flusso totale sarà la somma del flusso sulle basi  $\Phi_B(\vec{E})$  e sull'area laterale del cilindro  $\Phi_L(\vec{E})$ :

$$\Phi(\vec{E}) = \Phi_B(\vec{E}) + \Phi_L(\vec{E})$$

Notiamo quindi il campo lungo le basi è nullo, in quanto aventi vettori normali ortogonali alle linee di campo. La totalità del flusso sarà quindi data dalla superficie laterale, che forma in ogni punto un angolo  $\theta = 0$  con il campo, e restituisce quindi:

$$\Phi(\vec{E}) = \int_L d\vec{A} \cdot d\vec{E}(\vec{r}) = \int_L d\vec{A} E(d) = E(d)2\pi dh$$

dove  $d$  è la distanza dal centro del filo dove si calcola il campo elettrico. Notiamo il passaggio da  $\vec{E}$  a  $E$  in solo modulo, possibile in quanto il campo a una distanza  $d$  dal centro (e quindi su una circonferenza) è costante. Possiamo a questo punto eguagliare le due espressioni trovate per  $\Phi(\vec{E})$ :

$$E(d)2\pi dh = \frac{h\lambda}{\epsilon_0} \Rightarrow E(d) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 d}$$

Che è in accordo con quanto trovato precedentemente attraverso il principio di sovrapposizione.

- **Campo generato da una sfera uniformemente carica**

Per calcolare il campo elettrico generato da una sfera uniformemente carica, possiamo sfruttare la sua simmetria radiale: in ogni punto posto a distanza  $r$  avremo campo costante. Appliciamo allora la densità (volumetrica) di carica  $\rho$ :

$$dq = \rho dV, \quad Q = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi R^3$$

dove  $\frac{4}{3} \pi R^3$  è il volume della sfera. Possiamo quindi applicare Gauss:

$$\Phi(\vec{E}) = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\rho 4\pi R^3}{3\epsilon_0}$$

Troviamo un'altra espressione per il flusso applicando la definizione, scegliendo una certa superficie gaussiana  $S$  (anch'essa sferica) di raggio  $r$ , che contenga la circonferenza. Avremo che il flusso su tale superficie vale:

$$\Phi \vec{E} = \int_S d\vec{A} \cdot d\vec{E} = E(r) \int_S d\vec{A}$$

Avremo che l'integrale di superficie di  $\vec{A}$  su  $S$  non sarà altro che la superficie della sfera, ergo:

$$\int_S d\vec{A} = 4\pi r^2, \quad \Phi \vec{E} = E(r) 4\pi r^2$$

Eguagliando, come prima, questo con il risultato ottenuto da Gauss abbiamo:

$$E(r) 4\pi r^2 = \frac{\rho 4\pi R^3}{3\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0}, \quad E(r) = \frac{\rho R^3}{3r^2 \epsilon_0} = k \frac{Q}{r^2}$$

Questo ci assicura che il campo elettrico prodotto da una distribuzione di carica a simmetria sferica è proporzionale a  $\frac{1}{r^2}$ . Potremmo essere interessati al campo generato dalla carica al suo interno: in questo caso dovremo scegliere una superficie gaussiana di raggio  $r < R$ . Si avrà in questo caso che la carica su cui applichiamo il teorema di Gauss (che chiameremo  $Q_{int}$ ) è minore: comprende soltanto del volume di sfera in  $r$ :

$$Q_{int} = \rho \frac{4}{3} \pi r^3$$

Possiamo allora applicare la stessa uguaglianza precedente:

$$E(r) 4\pi r^2 = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}, \quad E(r) = k \frac{Q_{int}}{r^2}$$



Sostituire la formula di  $Q_{int}$  sarebbe possibile, ma non conveniente: calcoliamo piuttosto il rapporto  $\frac{Q}{Q_{int}}$ .

$$\frac{Q}{Q_{int}} = \frac{\rho \frac{4}{3} \pi R^3}{\rho \frac{4}{3} \pi r^3} = \frac{R^3}{r^3}$$

e moltiplichiamo numeratore e denominatore del campo:

$$E(r) = k \frac{Q_{int} \cdot \frac{Q}{Q_{int}}}{r^2 \cdot \frac{R^3}{r^2}} = k \frac{Q}{R^3} r$$

Notiamo che per  $r = R$ , ovvero avvicinandosi alla superficie della sfera, abbiamo:

$$k \frac{Q}{r^2} = k \frac{Q}{R^2} = k \frac{Q}{R^3} R$$

ovvero quanto calcolato per  $r$  interni ed esterni alla sfera va a coincidere. Riassumendo, abbiamo quindi che il campo generato dalla sfera vale esattamente 0 nel suo punto di centro, cresce linearmente fino ad un massimo di  $k \frac{Q}{R^2}$  sulla sua superficie, e poi decresce quadraticamente al suo esterno.

- **Campo generato da un guscio sferico uniformemente carico**  
Calcoliamo il campo elettrico generato da un guscio sferico completamente cavo, di spessore trascurabile. Avremo bisogno della densità di carica superficiale del disco  $\sigma$ , e potremo calcolare la carica:

$$Q = 4\pi R^2 \sigma$$

Racchiudiamo adesso il guscio con una superficie gaussiana non dissimile da quella adoperata per la sfera carica. Avremo l'uguaglianza:

$$E(r) 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}, \quad E(r) = k \frac{Q}{r^2}$$

Risultato esattamente identico a quello della sfera. Vediamo adesso cosa succede se prendiamo  $r < R$ . In questo caso dovremo considerare una superficie gaussiana completamente interna al guscio. Questa superficie non conterrà alcuna carica! In altre parole, il campo elettrico generato da un guscio sferico uniformemente carico al suo interno è nullo. Questo risultato viene spiegato più generalmente nel cosiddetto **teorema del guscio sferico**, riguardante perlopiù la forza gravitazionale, che stabilisce:

- Un guscio sferico di massa uniforme genera lo stesso campo di una carica puntiforme posta esattamente al suo centro;
- Il campo generato dal guscio sferico in un punto al suo interno è nullo.

- **Campo generato da un guscio spesso uniformemente carico**

Facciamo un esempio analogo al precedente, ma considerando il nostro guscio come dotato di un certo spessore. Questo da solo renderà necessario l'utilizzo della densità (volumetrica) di carica  $\rho$ , da cui potremo impostare, chiamando il raggio interno  $a$  e quello esterno  $b$ :

$$Q = \rho \frac{4}{3} \pi (b^3 - a^3)$$

Su un raggio  $r$  esterno al guscio, il risultato sarà coincidente con i due precedenti: prendiamo sempre una superficie gaussiana sferica che racchiuda l'intero oggetto, applichiamo Gauss ed otteniamo:

$$E(r)4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}, \quad E(r) = k \frac{Q}{r^2}$$

Il caso interessante è quello in cui il campo viene calcolato all'interno del guscio. Avremo che la carica a questo punto varrà:

$$Q_{int} = \rho \frac{4}{3} \pi (r^3 - a^3)$$

questo ci darà:

$$E(r)4\pi r^2 = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}, \quad E(r) = \rho \frac{4}{3} \pi \frac{r^3 - a^3}{4\pi R^2}$$

che, a differenza del caso sferico, non è una funzione lineare di  $r$ . Notiamo che per  $a \rightarrow 0$ , questa forma tende al caso lineare: ciò ha senso in quanto un guscio sferico con raggio minore nullo non è altro che una sfera.

- **Campo generato da una distribuzione di carica piana, uniforme e infinita**

Vediamo il caso di una distribuzione di carica piana, uniformemente carica e infinita. Ricordiamo che tale distribuzione di carica può essere rappresentata da un disco uniformemente carico di raggio infinito, il cui campo abbiamo già calcolato attraverso il principio di sovrapposizione. Ne risulterà che il limite per il raggio che tende ad infinito della formula

che avevamo trovato corrisponderà a quanto ricaveremo adesso. Iniziamo col considerare una lastra piana e uniformemente carica: definita la densità di carica superficiale  $\sigma$  potremo applicare Gauss:

$$Q = A\sigma, \quad \Phi \vec{E} = \frac{A\sigma}{\epsilon_0}$$

Possiamo scegliere un'altra superficie gaussiana: per un qualsiasi punto  $\vec{r}$  sulla lastra a distanza  $d$ , consideriamo un cilindro perpendicolare alla lastra. Avremo che il flusso lungo tale cilindro è diviso nel flusso lungo il lato, che sarà nullo, e il flusso sulle basi:

$$\Phi \vec{E} = \Phi_L \vec{E} + \Phi_B \vec{E} = 2AE(d)$$

Imponendo l'uguaglianza delle formule per il flusso si avrà:

$$2AE(d) = \frac{A\sigma}{\epsilon_0}, \quad E(d) = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

- **Campo generato dalle lastre di un condensatore ad armature parallele**

Il risultato appena trovato si presta al calcolo del campo generato all'interno ed all'esterno di un componente circuitale assai comune: il condensatore. Assumiamo un condensatore come formato da due lastre piane, che prendiamo come infinite (come si è visto, questa approssimazione descrive piuttosto bene ciò che succede lontano dai bordi). Assegneremo alle due lastre le densità di carica superficiale  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ . Un calcolo immediato si può fare attraverso il principio di sovrapposizione, per due lastre generanti campo  $\frac{\sigma_i}{2\epsilon_0}$ , il campo totale esterno sarà:

$$E_{int} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\epsilon_0}$$

mentre il campo totale interno sarà (dovremo considerare segni invertiti, in quanto avviciniamo le lastre da direzioni opposte):

$$E_{est} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\epsilon_0}$$

Un calcolo simile può essere fatto usufruendo del teorema di Gauss, giungendo allo stesso risultato. Sia  $L$  una superficie gaussiana, identica a quella usata sulla lastra nell'esempio precedente, posta sulla lastra  $\sigma_1$ ;  $R$  una superficie simile sulla lastra  $\sigma_2$ , e infine  $C$  una superficie gaussiana che comprenda di entrambe le lastre. Possiamo impostare

uguaglianze simili a quelle già usate finora (fra flusso calcolato "a mano" e con Gauss) su queste superfici. Ad esempio, riguardo a  $L$ :

$$AE_L = \frac{Q_{est}}{\epsilon_0} = \frac{A\sigma_1}{2\epsilon_0}, \quad E_L = \frac{\sigma_1}{2\epsilon_0}$$

Ciò ci permette di ricavare il sistema:

$$\begin{cases} E_L = \frac{\sigma_1}{2\epsilon_0} \\ E_R = \frac{\sigma_2}{2\epsilon_0} \\ E_C = E_L - E_R \end{cases}$$

da cui:

$$E_C = E_{est} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\epsilon_0}$$

Per il campo esterno. Per quanto riguarda il campo interno, basterà prendere una superficie gaussiana che comprende solamente la parte interna delle lastre  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ . Impostando Gauss si avrà:

$$\int E \cdot dA = E \cdot A = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)A}{2\epsilon_0}, \quad E_{int} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\epsilon_0}$$

Che corrisponde con quanto trovato prima. Possiamo adesso considerare il caso particolare del condensatore, dove  $\sigma_1 = -\sigma_2$ :

$$E_{est} = \frac{\sigma - \sigma}{2\epsilon_0} = 0, \quad E_{int} = \frac{\sigma + \sigma}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

- **Distribuzione di carica cilindrica** Vediamo un'esempio di distribuzione di carica cilindrica che non è un filo monodimensionale, ma un vero e proprio cilindro con un dato volume  $V$ . Diciamo che  $R$  è il raggio del cilindro,  $h$  la sua altezza, e che il campo elettrico è ortogonale alla sua parete: questo significherà che il flusso lungo le basi è nullo. Diciamo allora di calcolare il campo a una distanza  $r > R$ . Possiamo dire che la carica è, stabilita una densità di carica  $\rho$ :

$$Q = \rho V = \rho \pi R^2 h$$

A questo punto potremo impostare il campo:

$$\Phi_L = \int \vec{E} \cdot dA = E(r) 2\pi r h$$

Su una superficie cilindrica di raggio  $r$ . Lo stesso valore per Gauss:

$$\Phi_L = \frac{\rho V}{\epsilon_0} = \frac{\rho \pi R^2 h}{\epsilon_0}$$

da cui diciamo:

$$E(r) 2\pi r h = \frac{\rho \pi R^2 h}{\epsilon_0}, \Rightarrow E(r) = \frac{\rho R^2}{2r \epsilon_0}$$

Calcoliamo allora il campo su un punto interno  $r < R$ . Dovremo considerare la carica interna, e non totale:

$$Q_{int} = \rho V_{int} = \rho \pi r^2 h$$

E impostare la stessa uguaglianza di prima:

$$E(r) 2\pi r h = \frac{\rho \pi r^2 h}{\epsilon_0}, \Rightarrow E(r) = \frac{\rho r}{2\epsilon_0}$$

Notiamo che i campi sulla frontiera del cilindro si equivalgono. Infatti:

$$r = R \Rightarrow \frac{\rho R^2}{2\pi \epsilon_0} = \frac{\rho R}{2\epsilon_0} = \frac{\rho r}{2\epsilon_0} \Big|_{r=R}$$

## 66 Isolanti e conduttori

La distinzione fra materiali conduttori e isolanti sta nel comportamento dei loro elettroni: negli isolanti, gli elettroni non sono liberi di muoversi, e le parti che vengono caricate (per induzione) restano tali soltanto localmente. Al contrario, nei conduttori gli elettroni sono liberi di muoversi: la carica su un conduttore si distribuisce sempre ed immediatamente (o quasi, in un tempo nell'ordine dei  $10^{-16}$ s) sulla sua superficie. Questo può ricondursi alla struttura dell'atomo: nel modello di Bohr, si associano livelli energetici ad elettroni a distanze diverse (e quantizzate) dal nucleo. Gli elettroni più vicini al nucleo hanno energia maggiore di quelli più esterni. Di contro, gli elettroni esterni sono quelli più semplici da ionizzare, cioè da sottrarre all'atomo. Gli elettroni sullo stato occupato più esterno prendono il nome di banda di valenza: ora, il fenomeno della conduzione è dato dalla banda immediatamente superiore, ovvero la più piccola non occupata da elettroni, che viene detta banda di conduzione. E' su questa banda che gli elettroni possono scorrere liberamente portando allo spostamento della carica fra atomi circostanti. Il gap fra banda di valenza e banda di conduzione viene detto "banda proibita".

### Equilibrio elettrostatico di conduttori

Si possono enunciare (e dimostrare) 4 proprietà fondamentali dei conduttori in stato di equilibrio elettrostatico, ovvero dove le cariche non si muovono.

- Il campo elettrico all'interno di un conduttore è sempre nullo. Questo perché la carica si distribuisce sui bordi: possiamo dimostrare tale risultato attraverso il teorema di Gauss. Se prendiamo una qualsiasi superficie di Gauss completamente interna ad un corpo conduttore, il flusso attraverso essa sarà necessariamente nullo. Se tale non fosse il caso, il campo generato all'interno della superficie porterebbe le cariche a spostarsi verso l'esterno del corpo: esso non sarebbe più in equilibrio. In altre parole, l'unico punto dove la carica può disporsi senza muoversi ulteriormente è il bordo (la superficie) del corpo. Questo principio è alla base della gabbia di Faraday: il campo interno è nullo sia per corpi pieni che in presenza di cavità. Per questo motivo una gabbia metallica, come qualsiasi corpo conduttore provvisto di una cavità, isola completamente il suo interno da qualsiasi campo elettrico esterno.
- Se il conduttore è isolato, le cariche si possono trovare solo sulla sua superficie. Questo è un'altro modo di formulare quanto detto prima. Anche in questo caso possiamo applicare Gauss: visto che il campo interno ad un corpo conduttore è nullo, una qualsiasi superficie gaussiana (poniamo cilindrica) che comprende il corpo avrà necessariamente flusso nullo. L'unica possibile superficie gaussiana che registra un qualche flusso è quella disposta in modo da contenere soltanto il bordo del corpo: e anche in questo caso, avrà flusso solamente sulla faccia esterna parallela alla superficie stessa, in quanto la faccia interna avrà (come prima) flusso zero.
- Il campo è perpendicolare alla superficie in ogni punto immediatamente circostante al corpo. Anche questo è necessario per preservare l'equilibrio: poniamo che il campo immediatamente esterno abbia una componente aggiuntiva rispetto alla sola componente normale. In questo caso le cariche verranno spinte verso una direzione tangente alla superficie del corpo: l'equilibrio è stato violato.
- Il campo si accumula sulle zone a raggio di curvatura minore: le "punte" della superficie accumulano quantità maggiori di carica. Questo risultato è spiegato dal potenziale elettrico: si ha che il campo elettrico è in ogni punto perpendicolare alle isolinee del potenziale elettrico. Immaginiamo allora due sfere, di raggio  $r_1$  e  $r_2$ , collegate fra di loro da un filo conduttore di volume trascurabile. Visto che le due sfere sono collegate, il loro potenziale è identico. Possiamo allora dire:

$$V = k \frac{q_1}{r_1} = k \frac{q_2}{r_2}$$

Impostiamo allora i campi:

$$E_1 = k \frac{q_1}{r_1^2} = \frac{V}{r_1} E_2 = k \frac{q_2}{r_2^2} = \frac{V}{r_2}, \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

Il rapporto fra i raggi corrisponde all'inverso del rapporto fra i campi: a raggi minori, campi maggiori e viceversa.

### **Campo elettrico immediatamente circostante ad un conduttore**

Calcoliamo adesso il campo elettrico immediatamente circostante ad un conduttore, che sappiamo essere concentrato dalla superficie. Basterà applicare gauss su una superficie che comprende solamente la superficie esterna, o meglio la carica accumulata sulla superficie esterna. Poniamo di prendere una superficie cilindrica: l'unico flusso effettivo sarà lungo la base del cilindro esterna alla superficie  $A$ . Allora:

$$\int dA \cdot E(\vec{r}) = EA = A \cdot \frac{q}{\epsilon_0} \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

per una qualche distribuzione superficiale di carica  $\sigma$ .

### **Campo elettrico di una lastra conduttiva ed isolante**

Cerchiamo di chiarire le differenze fra isolanti e conduttori attraverso l'esempio del campo esterno ad una lastra. Facciamo sia l'esempio conduttivo che quello isolante:

- **Campo esterno ad una lastra conduttiva**

Nel caso della lastra conduttiva la carica si distribuisce sulle due superfici (trascuriamo gli effetti di bordo) con densità superficiale  $\sigma_1$ . Il campo esterno può allora essere calcolato attraverso Gauss, usando un cilindro che prende l'interezza della lastra. Consideriamo quindi il flusso sulle 2 basi:

$$2EdA = \frac{2\sigma dA}{\epsilon_0} \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Sia  $\sigma_c$  la densità superficiale "totale" della lastra, data da  $\sigma_c = 2\sigma$ . Si avrà che il campo esterno vale:

$$E = \frac{\sigma_c}{2\epsilon_0}$$

- **Campo esterno ad una lastra isolante**

Facciamo adesso lo stesso esemio, ma con una lastra isolante. La carica non sarà distribuita sulla superficie ma lungo l'intero corpo, e andremo

a considerare la densità di carica  $\sigma_c$ . Il risultato è però analogo al caso precedente:

$$E = \frac{\sigma_c}{2\epsilon_0}$$

per una stessa superficie gaussiana. In sostanza, il campo elettrico generato dalle due lastre è identico finché è identica la loro densità di carica.

## 67 Potenziale elettrico

Introduciamo adesso una grandezza fondamentale: il potenziale elettrico.

### Circuitazione del campo elettrico

Si ha che il campo elettrico è un campo conservativo: l'integrale di linea  $\int_S$  su un qualche percorso  $S$  al suo interno non dipende in valore dal percorso adottato, ma solamente dal punto di partenza e dal punto di arrivo:

$$\vec{E} = \sum_i^n d\vec{E}_i \rightarrow \int_A^B \vec{E} ds$$

non dipende dalla traiettoria e:

$$\int_A^B \vec{E} ds = \int_A^B \vec{E} ds'$$

per qualsiasi coppia di percorsi  $S$  e  $S'$  diversi. Questo significa che su un percorso chiuso (ovvero un percorso che torna su stesso) l'integrale ha sempre valore nullo. Questo è particolarmente utile per determinare il lavoro necessario per spostare una carica su un campo elettrico.

### Circuitazione e lavoro

Consideriamo, per una certa carica  $q_0$  immersa in un campo elettrico in moto sul percorso  $S$ , l'integrale di linea:

$$\mathcal{L}_S = \int_S \vec{F} ds = q_0 \int_S \vec{E} ds$$

dove sappiamo  $q_0 \vec{E} = \vec{F}$  essere la forza esercitata dal campo sulla carica. Questo non sarà altro che il lavoro necessario a spostare  $q$  su  $S$ , opponendosi al campo elettrico.

### Energia potenziale

Introduciamo ancora un'altro concetto: su un percorso che parte da  $A$  e arriva



a  $B$ , possiamo usare lo stesso integrale di prima per calcolare la variazione di energia potenziale:

$$\mathcal{L}_{AB} = -\Delta U = U_A - U_B = q_0 \int_A^B \vec{E} ds$$

Prendiamo il campo generato da una carica singola, attraverso la legge di Coulomb:

$$= q_0 q k \int_A^B \frac{1}{r^2} (dr \hat{r}) = -q q_0 k \frac{1}{r} \Big|_A^B = q q_0 k \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

Da questo abbiamo che l'energia potenziale per una carica  $q_0$  è:

$$U(\vec{r}) = \frac{q q_0 k}{r}, \quad \lim_{r \rightarrow +\infty} U(\vec{r}) = 0$$

Dove  $r$  è la distanza di  $\vec{r}$  dalla carica. Questo ci permette finalmente di definire il potenziale elettrico:

### Potenziale elettrico

Possiamo svolgere sul potenziale elettrico un'operazione simile a quella fatta sulla forza generata dal campo: dividiamo quindi tutto per  $q_0$ , la nostra carica di prova:

$$\frac{U(\vec{r})}{q_0} = \frac{qk}{r} = V(\vec{r})$$

Questo ultimo valore è il potenziale elettrico. Nel S.I. la sua unità di misura è il Volt (V), che equivale a  $1 \frac{J}{C}$ . Notiamo la stretta correlazione fra potenziale elettrico e campo elettrico: il campo elettrico definisce una "direzione" di spostamento, o meglio di applicazione di forza per qualsiasi carica immerso in esso, ed il campo è definito sul potenziale in modo da spostare suddette cariche da zone ad alto potenziale verso zone a basso potenziale (almeno nel caso di cariche positive, per cariche negative accadrà il contrario). Come vedremo poi, questa relazione è meglio sintetizzata attraverso il calcolo differenziale: si può dire che il campo è il gradiente del potenziale. Questa relazione ha anche una constatazione in termini di unità di misura: se finora avevamo misurato il campo come  $\frac{N}{C}$ , notiamo adesso di poterlo anche definire in  $\frac{V}{m}$ :

$$[E] = k \frac{[q]}{[l^2]} = \frac{[V]}{[l]} = \frac{[F]}{[q]}$$

Che è banale da dimostrare in termini di coerenza dimensionale. Diciamo:

$$k = \frac{[F][l]^2}{q^2}, \quad [E] = \frac{[F][l]^2}{q^2} \frac{[q]}{[l^2]} = \frac{[F]}{[q]}$$

### Lavoro e potenziale elettrico

Avevamo stabilito che, riguardo alla relazione fra lavoro, energia potenziale, e potenziale elettrico per un percorso  $A \rightarrow B$ :

$$-\Delta U_{AB} = L_{AB} = -\Delta V q$$

e nello specifico, riguardo al potenziale di una singola carica puntiforme:

$$(q \cdot) V(\vec{r}) = (q \cdot) \frac{kq_0}{r} = -\Delta U_{AB} = L_{AB}$$

notando il limite:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} V(\vec{r}) = 0$$

In sostanza, abbiamo che il lavoro svolto *dal campo* generato da una carica positiva per spostare un'altra carica positiva (o dal campo generato da una carica negativa per spostare un'altra carica negativa) è positivo, e la variazione di energia negativa: ci sposteremo da una zona di maggiore potenziale ad una zona di minore potenziale, allontanandoci dalla carica. Di contro, se la carica immersa nel campo è negativa (o comunque discorde), tenderà a spostarsi da una zona di minore potenziale a una zona di maggiore potenziale, contro la direzione del campo. Notiamo che il lavoro è comunque positivo: la direzione della forza di Coulomb e dello spostamento della particella corrispondono.

### Lavoro svolto da forze esterne

Introduciamo un'agente esterno, che cerca di spingere la carica nella direzione opposta al campo: nel caso di una carica positiva, cercherà quindi di spostarla nella direzione opposta a quella del campo. Questo comporterà una differenza di potenziale positiva: la forza esterna dovrà *compiere* lavoro, e il campo elettrico invece dovrà fare lavoro negativo, per opporsi ad essa. Sia invece presa in considerazione una carica negativa, che cercheremo di spostare in direzione opposta al campo. In questo caso ci sposteremo da zone a differenza maggiore a zone a differenza minore: la differenza di potenziale è minore. Il lavoro da noi svolto dovrà comunque essere positivo, in quanto ci opporremo al campo, e il campo di contro dovrà svolgere lavoro negativo. Questo significa che il lavoro svolto dalla forza esterna si opporrà al campo, e sarà pari a:

$$L_{est} = -qq_0k \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) = qq_0k \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) = q(V_B - V_A) = q\Delta V$$

Questo può essere ottenuto anche dalla definizione di campo:

$$F = qE, \quad F_{est} = -F = -qE$$

ricordando che il potenziale su un certo percorso di lunghezza  $s$  è (in termini molto semplicistici):

$$E = -\frac{V}{s}$$

che spiega i segni opposti.

### **Nota sulle trasformazioni quasistatiche**

Facciamo un'ultima precisazione: tutto ciò che abbiamo appena detto è vero solo e soltanto se i processi descritti avvengono in regime quasistatico: ovvero, invece di fornire vere e proprie accelerazioni alle cariche in questione, le facciamo passare attraverso più stati continui di equilibrio, in modo che in ogni momento nessuna quantità di energia venga trasformata in energia cinetica. Questo significa che se una certa forza deve avere, per opporsi al campo, un valore maggiore di  $\epsilon$  alla forza espressa dal campo (in modo da vincerla), noi prendiamo il limite per  $\epsilon \rightarrow 0$ . Ciò significa che il tempo impiegato dalla carica a muoversi effettivamente lungo i percorsi di cui parliamo è  $t \rightarrow \infty$ , ovvero infinito. Questo non ci disturba, perché ne parleremo e basta, non aspetteremo che accada.

### **Superfici equipotenziali**

Si dicono superfici equipotenziali particolari regioni dello spazio dove il potenziale è costante. Le superfici equipotenziali possono rivelarsi strumenti utili per descrivere il potenziale elettrico. Vediamo la forma delle superfici equipotenziali di diverse distribuzioni di carica:

- **Superfici equipotenziali di una carica puntiforme**

Avremo che il potenziale nei pressi di una carica puntiforme  $q$  è dato da:

$$V = \frac{kq}{r}$$

E' chiara la simmetria radiale: le superfici equipotenziali avranno la forma di sfere centrate sulla carica. A sfere di raggio maggiore si associerà potenziale minore e viceversa, fino al limite ad infinito:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{kq}{r} = 0$$

- **Superfici equipotenziali dentro un condensatore**

Fra le lastre di un condensatore si ha che il campo è in ogni punto ortogonale alle lastre. Possiamo sfruttare il fatto che una superficie equipotenziale è in ogni punto ortogonale al campo: si avrà quindi che le superfici equipotenziali del condensatore saranno tutte piani (trascurando gli effetti di bordo) paralleli alle lastre. Il potenziale massimo

sarà sul piano immediatamente adiacente alla lastra caricata positivamente, il potenziale minimo su quello immediatamente adiacente alla lastra caricata negativamente.

- **Superfici equipotenziali di un dipolo**

Per un dipolo elettrico, potremo sfruttare la stessa proprietà che abbiamo appena visto: le superfici equipotenziali saranno curvilinee ed in ogni punto perpendicolari alle linee di campo che partono dalle cariche.

### **Elettronvolt**

Come unità di misura *dell'energia* (e non del potenziale elettrico!) introduciamo l'elettronvolt (eV). Si definisce 1 eV come l'energia di un sistema formato da un elettrone che si muove lungo una differenza di potenziale di 1 V, che equivale a  $1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

### **Campo elettrico come gradiente del potenziale**

Esiste un'importante relazione matematica fra campo elettrico e potenziale. Stabilita una certa densità di carica  $\rho(\vec{r}')$ , possiamo calcolare il campo elettrico in un punto  $r$  come:

$$\vec{E}(\vec{r}) = k \int \frac{\rho(\vec{r}') dV' (\vec{r} - \vec{r}')}{(\vec{r} - \vec{r}')^3}$$

dove il cubo, come avevamo già visto, serve a normalizzare il versore  $(\vec{r} - \vec{r}') / |\vec{r} - \vec{r}'|$ . Notiamo inoltre il termine  $dV'$ , che si riferisce al volume, non al potenziale. Possiamo anche calcolare il potenziale elettrico (che è uno scalare) come:

$$V(\vec{r}) = k \int \frac{\rho(\vec{r}') dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

Notiamo allora la relazione:

$$-dV = \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

su uno spostamento infinitesimo  $d\vec{s}$ . Questa non è che la definizione stessa di potenziale. Sarà allora possibile dividere lo spostamento  $d\vec{s}$  sulle tre direzioni:

$$d\vec{s} = dx\hat{x} + dy\hat{y} + dz\hat{z}$$

e riscrivere il tutto come:

$$-dV(x, y, z) = \vec{E} \cdot d\vec{s} = E_x dx + E_y dy + E_z dz$$

Questo ci permette di effettuare le derivate parziali:

$$-\frac{\partial V}{\partial x} = E_x, \quad -\frac{\partial V}{\partial y} = E_y, \quad -\frac{\partial V}{\partial z} = E_z,$$

Questo non è altro che il gradiente di  $V$ . Ciò significa che possiamo scrivere la relazione fondamentale:

$$-\nabla V = \vec{E}$$

### Potenziale di sistemi di cariche

Vediamo come calcolare il potenziale elettrico e l'energia potenziale di sistemi di cariche puntiformi. Iniziamo col **potenziale elettrico**: avremo che per una singola carica puntiforme, il potenziale ad una distanza  $r$  è:

$$V = k \frac{q}{r}$$

come avevamo calcolato dalla definizione. Per potenziali dovuti a più cariche, vale il principio di sovrapposizione:

$$V_{tot} = k \sum_i^n \frac{q_i}{r_i}$$

Calcoliamo poi l'energia potenziale del sistema: questa è definita come l'energia necessaria a portare le cariche in una certa configurazione, partendo da distanza infinita. Questa definizione è valida in quanto ricordiamo che:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} V = 0$$

Ciò ci permette di dire che il lavoro (e quindi l'energia) necessario a spostare la carica è:

$$\mathcal{L}_\infty = U(\vec{r}) = U(\vec{r}) - U(\infty) = q(V(\vec{r}) - V(\infty)) = q(V(\vec{r}))$$

Potremo allora applicare la formula che lega il potenziale elettrico all'energia potenziale:

$$U = q_0 \Delta V \Rightarrow U = k \frac{qq_0}{r}$$

Per distribuzioni di più cariche vale lo stesso principio di sovrapposizione di prima:

$$U_{tot} = k \sum_i^n \frac{qq_i}{r}$$

Occorre notare che, come l'energia, il potenziale ha senso solo in quanto variazione di potenziale: il valore dello "0" del potenziale può essere scelto a piacere, in quanto ne considereremo soltanto le variazioni.

### Potenziale di alcune distribuzioni di carica

Usiamo adesso il calcolo integrale per ottenere il potenziale di alcune distribuzioni di carica.

- **Potenziale di un'anello uniformemente carico**

Consideriamo un disco di raggio  $R$ , e calcoliamone il potenziale ad una distanza  $x$  lungo il suo asse. Dovremo stabilire una densità lineare  $\lambda$  tale che:

$$dq = \lambda dl$$

Il potenziale infinitesimo sarà allora, dalla formula:

$$dV = k \frac{dq}{r} = k \frac{\lambda dl}{d}$$

dove la distanza  $d$  vale quanto l'ipotenusa:

$$d = \sqrt{R^2 + x^2} \Rightarrow k \frac{\lambda dl}{\sqrt{R^2 + x^2}}$$

Calcoliamo allora il potenziale elettrico totale prendendo l'integrale:

$$V = k \int \frac{\lambda dl}{\sqrt{R^2 + x^2}}$$

Visto che nessun termine all'interno dell'integrale dipende dall'angolo sull'anello, possiamo semplicemente stabilire la carica totale sull'anello  $Q$ :

$$Q = 2\pi R\lambda, \quad V = k \frac{Q}{\sqrt{R^2 + x^2}}$$

Possiamo adesso prendere l'opposto del gradiente di questo potenziale per verificare la formula prima dimostrata:

$$-\nabla V = \vec{E}, \quad -\frac{dV}{dx} = k \frac{Qx}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

che è coerente con quanto avevamo dimostrato attraverso il principio di sovrapposizione.

- **Potenziale di un disco uniformemente carico**

Consideriamo un'oggetto simile: un disco di raggio  $R$ , che possiamo modellizzare come una successione concentrica di anelli. Calcoliamone quindi il potenziale ad una distanza  $x$  lungo il suo asse. Dovremo stavolta stabilire una densità superficiale di carica  $\sigma$  tale che:

$$q = 2\pi r dr \sigma, \quad dV = \frac{dqk}{d} = k \frac{2\pi r dr \sigma}{\sqrt{r^2 + x^2}}$$

Basterà adesso prendere quest'ultimo potenziale infinitesimo nell'integrale da 0 a  $R$ :

$$\begin{aligned} V &= k \int_0^R k \frac{2\pi r dr \sigma}{\sqrt{r^2 + x^2}} = 2k\pi\sigma \int_0^R \frac{r}{\sqrt{x^2 + r^2}} dr = 2\pi k\sigma \left[ (r^2 + x^2)^{\frac{1}{2}} \right]_0^R \\ &= 2\pi k\sigma (\sqrt{R^2 + x^2} - x) = 2\pi k\sigma x \left( \sqrt{\frac{R^2}{x^2} + 1} - 1 \right) \end{aligned}$$

notando l'integrale:

$$\int \frac{r}{\sqrt{r^2 + x^2}} dr = (r^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}$$

Possiamo prendere nuovamente l'opposto del gradiente per verificare la relazione fra potenziale e campo:

$$\begin{aligned} -\nabla V &= \vec{E} = -\frac{d}{dx} \left( 2\pi k\sigma \left( \sqrt{R^2 + x^2} \right) \right) \\ &= -\left( \frac{d}{dx} 2\pi k\sigma x \left( \sqrt{\frac{R^2}{x^2} + 1} - 1 \right) - \frac{d}{dx} 2\pi k\sigma x \right) = 2\pi k\sigma - 2\pi k\sigma \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \\ &= 2\pi k\sigma \left( 1 - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right) \end{aligned}$$

che è nuovamente coerente con quanto avevamo dimostrato attraverso il principio di sovrapposizione.