

## CINEMATICA DI UN PUNTO MATERIALE

- MECCANICA: studio del moto di uno o più corpi
- CINEMATICA: studio del moto di un corpo *indipendentemente* dalle sue cause  
(esempi:  
*spostamento, velocità media, velocità istantanea*).
- DINAMICA: studio delle cause del moto di un corpo (FORZE)

# CINEMATICA DI UN PUNTO MATERIALE

- Moto unidimensionale: il moto avviene lungo una retta (verticale, orizzontale, inclinata)
- per un ``punto'' materiale:
  - oggetti di dimensioni sufficientemente piccole (dipende dalle posizioni e dimensioni degli altri corpi; es.: se considero la rotazione della Terra attorno al Sole posso trattare la Terra in prima approssimazione come un corpo puntiforme; non posso se considero il moto di rotazione della Terra attorno al suo asse)
  - oggetti che si muovono *come* un corpo puntiforme: tutte le sue parti si muovono rigidamente nella stessa direzione e con la stessa velocità.

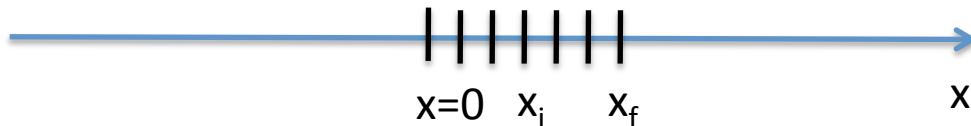
# CINEMATICA DI UN PUNTO MATERIALE

➤ SISTEMA DI COORDINATE: per definire la posizione dell' oggetto in esame.

- Stabilisco un verso della retta, che chiamo verso positivo.
- Considero un punto arbitrario come origine sulla retta, che indicherò con  $x=0$
- stabilisco una unità di misura per le distanze (il metro).

Allora la posizione di un corpo sulla retta rispetto all' origine è data dalla “distanza” del corpo dall'origine (la coordinata  $x$  misurata in metri).

Tale coordinata  $x$  è  $>0$  se il corpo si trova a destra dell'origine,  $x$  è  $<0$  se si trova a sinistra dell'origine.



Supponiamo che un corpo si trovi all'istante  $t_i$  nella posizione  $x_i$ :  $t_i \rightarrow x_i = x(t_i)$

Dopo l'intervallo di tempo  $\Delta t = t_f - t_i$  si trova nella posizione  $t_f$ :  $x_f$ :  $t_f \rightarrow x_f = x(t_f)$

**N.B.**: verso ed un'origine sono arbitrari, ***ma una volta scelti bisogna essere coerenti con la scelta fatta durante i calcoli***

# CINEMATICA DI UN PUNTO MATERIALE

➤ Definisco lo **spostamento** come la quantità

$$\Delta x = x_f - x_i$$

N.B.: lo spostamento può essere sia  $>0$  che  $<0$  a seconda che lo spostamento avvenga rispettivamente nel verso concorde a quello fissato sull'asse  $x$  o nel verso opposto

Esempio: se  $x_f = -5$  m e  $x_i = 2$  m, allora  $\Delta x = -5$  m  $-(2$  m)  $= -7$  m, è chiaro che il corpo si è mosso nel verso opposto a quello fissato sull'asse  $x$ .

➤ Legge oraria del moto: la posizione del corpo lungo la retta cambierà da istante di tempo ad istante di tempo. Quindi ad ogni istante  $t$  potrò associare la sua coordinata  $x(t)$ :

$$t \rightarrow x(t)$$

e quindi la coordinata  $x$  sarà una funzione del tempo. Tale funzione  $x(t)$  si chiama **LEGGE ORARIA DEL MOTO**.

## CINEMATICA DI UN PUNTO MATERIALE: VELOCITA' MEDIA

- VELOCITA' MEDIA: rapporto tra lo spostamento effettuato nell'intervallo di tempo  $\Delta t = t_f - t_i$  e l'intervallo di tempo  $\Delta t$

$$v_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i}$$

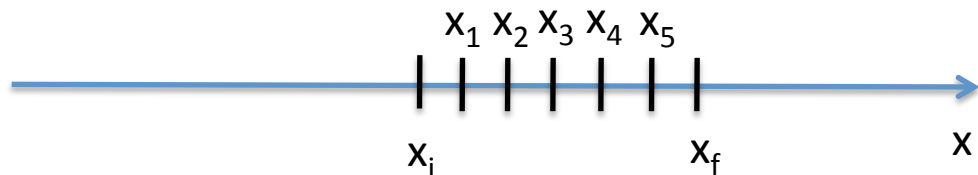
Unita' di misura nel S.I.: m/s. Le sue dimensioni sono  $[v_m] = L/T$ .

$v_m$  non da solo informazioni su quanto velocemente si muove un oggetto, ma da anche informazioni sul verso nel quale si muove. Infatti  $\Delta t$  e' sempre  $>0$ , ma  $\Delta x$  puo' essere  $>0$  o  $<0$  a seconda di un moto che avviene, rispettivamente, nel verso concorde o nel verso opposto rispetto a quello fissato sull'asse  $x$ . **Quindi anche  $v_m$  puo' essere  $>0$  o  $<0$  a seconda che il moto avvenga, rispettivamente, nel verso concorde o nel verso opposto rispetto a quello fissato sull'asse  $x$ .**

Nota: Come sara' chiaro quando introdurremo i vettori, il segno della velocita' (o dell'accelerazione) e' legato al fatto che in realta' velocita' e accelerazione sono dei vettori le cui componenti possono essere  $>0$  o  $<0$ . Solo che nel caso unidimensionale si puo' fare a meno di "scomodare" i vettori, perche' il moto avviene su una retta che puo' essere percorsa o in un verso o nel verso opposto.

## CINEMATICA DI UN PUNTO MATERIALE: VELOCITA' ISTANTANEA

- La velocità media non dà una descrizione accurata del moto di una particella. Per avere una descrizione accurata dovrei conoscerla per intervalli di tempo via via più piccoli. L'ideale sarebbe conoscere la velocità istante per istante.



Considero quindi dei sotto-intervalli di tempo via via sempre più piccoli e per ciascuno di questi calcolo la velocità media:

$$v_m^{(1)} = \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} = \frac{x_1 - x_i}{t_1 - t_i}; \quad v_m^{(2)} = \frac{\Delta x_2}{\Delta t_1} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}; \quad v_m^{(3)} = \frac{\Delta x_3}{\Delta t_3} = \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2};$$

e così via fino all'ultimo sotto-intervallo

Per conoscere la velocità ad ogni istante devo via via ridurre gli intervalli di tempo.

## CINEMATICA DI UN PUNTO MATERIALE: VELOCITA' ISTANTANEA

➤ Allora si definisce come velocita' istantanea (o semplicemente velocita'):

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

Ovvero, detto in parole:  
la velocita' istantanea e' il limite di  $\Delta x / \Delta t$   
per  $\Delta t$  che tende a zero.

In pratica: devo calcolare (o misurare) la velocita' media di  $\Delta x / \Delta t$  per intervalli di tempo sempre piu' piccoli, tendenti allo zero (intervalli infinitesimi)

N.B.1: dimensioni e unita' di misura sono le stesse della velocita' media.

N.B.2:  $v$  puo essere sia  $>0$  che  $<0$ . Il significato del segno e' lo stesso di quello spiegato per la velocita' media

N.B.3.: la velocita' media si riferisce ad un intervallo di tempo finito, la velocita' istantanea si riferisce ad un istante di tempo specifico, e in genere e' diversa da istante ad istante. Per cui, istante per istante potremo associare a ciascun istante di tempo un ben determinato valore della velocita' :  $t \rightarrow v(t)$ .

## CINEMATICA DI UN PUNTO MATERIALE: VELOCITA' ISTANTANEA

La definizione di velocita' istantanea corrisponde in matematica alla definizione di derivata:

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

ovvero, detto in parole: la velocita' e' la derivata rispetto al tempo della coordinata  $x(t)$



# MOTO RETTILINEO UNIFORME

- Supponete che un corpo si muova con velocità costante, ovvero con una velocità che non dipende dal tempo (la velocità ha lo stesso valore fissato per ogni istante, per esempio  $v=0.5 \text{ m/s.}$ )

Potremo scrivere  $v=\text{costante}=v_0$ , dove  $v_0$  denota il valore costante della velocità.

- Ci domandiamo: è possibile ricavare da questa informazione qual è la legge oraria del moto in questo caso?

Sì: la risposta è

$$x(t) = x_0 + v_0(t - t_0).$$

dove  $x_0$  la posizione iniziale del corpo, e  $t_0$  l'istante iniziale.

- **Procedura: si veda ne due pagine seguenti.**

Prendiamo la relazione

$$(1) \quad v(t) = v_0 .$$

Sappiamo che, siccome  $v = dx/dt$  possiamo scrivere

$$(2) \quad \frac{dx}{dt} = v(t) = v_0 .$$

Allora prendiamo l'integrale sia a sinistra che a destra dell'uguale tra un istante iniziale  $t_i$  e un generico istante finale  $t$  (se vale l'uguaglianza sappiamo che anche i due integrali devono essere uguali).

L'integrale a sinistra dell'uguale dà:<sup>1</sup>

$$(3) \quad \int_{t_i}^t \frac{dx}{dt} dt = x(t) \Big|_{t_i}^t = x(t) - x(t_i) .$$

Integro a destra dell'uguale:<sup>2</sup>

$$(4) \quad \int_{t_i}^t v_0 dt = v_0 \int_{t_i}^t dt = v_0(t - t_i) ,$$

dove ho usato la proprietà degli integrali per cui se sto integrando una costante (nel nostro caso  $v_0$  che non dipende appunto dal tempo  $t$ ) posso, come si dice, “portare fuori dall'integrale” tale costante. A questo punto uguagliamo i due integrali:

$$(5) \quad x(t) - x(t_i) = v_0(t - t_i) ,$$

ovvero

$$(6) \quad x(t) = x(t_i) + v_0(t - t_i) .$$

Questa equazione fornisce la legge oraria del moto per un moto rettilineo uniforme, ovvero esprime come la coordinata  $x$  di un corpo varia al variare del tempo  $t$ .

---

<sup>1</sup>Il risultato della Eq. (12) dipende dal fatto che per calcolare l'integrale di una funzione, diciamo  $f(t)$  (nel nostro caso rispetto alla variabile tempo  $t$ ) devo trovare quella funzione  $g(t)$  la cui derivata rispetto al tempo  $t$  da la funzione  $f(t)$  che voglio integrare. Devo poi valutare tale funzione  $g(t)$  tra i due estremi di integrazione (ovvero fare la differenza  $[g(t) - g(t_i)]$ ). Nel caso specifico della equazione (12) la funzione da integrare è proprio la derivata di  $x(t)$  rispetto al tempo  $t$ , per cui la funzione  $g(t)$  è proprio  $x(t)$ .

<sup>2</sup>Si noti che la notazione matematica rigorosa nello scrivere questi integrali sarebbe, per esempio per l'integrale nella Eq.(12),  $\int_{t_i}^t \frac{dx}{dt'} dt'$ , solo che per semplicità di notazione invece che scrivere  $t'$  scriviamo semplicemente  $t$  anche dentro all'integrale.

Spesso l'istante iniziale  $t_i$  viene indicato con  $t_0$ , e quindi  $x(t_i)$  viene indicato con  $x(t_0) = x_0$ . Così facendo possiamo riscrivere la Eq. (14) come

$$(7) \quad x(t) = x_0 + v_0(t - t_0).$$

N.B.: si noti che spesso si può fare la scelta per cui l'istante iniziale  $t_0 = 0$  per cui

$$(8) \quad x(t) = x_0 + v_0 t$$

N.B.: la procedura descritta qui sopra è quella che trovate (anche se con meno dettagli) nel paragrafo 2.8 a pag. 22-23 del libro.

## ACCELERAZIONE MEDIA E ISTANTANEA

### ➤ ACCELERAZIONE MEDIA:

rapporto tra la variazione della velocità  $\Delta v$  che si verifica nell'intervallo di tempo  $\Delta t = t_f - t_i$  e l'intervallo di tempo  $\Delta t$

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i}$$

### ➤ ACCELERAZIONE ISTANTANEA (o più semplicemente accelerazione):

si definisce in modo del tutto analogo a quanto fatto per la velocità istantanea

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

N.B.: le dimensioni fisiche dell'accelerazione media ed istantanea sono  $L/T^2$ ;  
l'unità di misura è  $m/s^2$ .

## ACCELERAZIONE ISTANTANEA

La definizione di accelerazione istantanea corrisponde alla derivata della velocità  $v(t)$  rispetto al tempo.

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

Ricordando che la velocità è a sua volta la derivata della coordinata  $x$  rispetto al tempo, ovvero  $v(t) = dx/dt$ , allora possiamo anche scrivere

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Ovvero l'accelerazione si può anche ottenere derivando due volte la coordinata  $x(t)$  rispetto al tempo  $t$ .

## MOTO UNIFORMEMENTE ACCELERATO

- Supponete adesso che un corpo si muova con accelerazione costante, ovvero con una accelerazione che non dipende dal tempo (  $a$  ha lo stesso valore fissato per ogni istante, per esempio  $a=5 \text{ m/s}^2$ .)

Potremo scrivere  $a=\text{costante}$

- Ci domandiamo: e' possibile ricavare da questa informazione qual e' la legge oraria del moto in questo caso e la velocita'? La risposta e' si e il riassunto dei risultati e':

$$a = \text{costante}$$

$$v(t) = v_0 + a(t - t_0).$$

$$x(t) = x_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2.$$

dove  $t_0$  e' l'istante iniziale,  $x_0$  la posizione iniziale del corpo, e  $v_0$  la velocita' iniziale del corpo.

- **Procedura: si veda ne due pagine seguenti.**

Consideriamo adesso il moto uniformemente accelerato. In questo caso un corpo puntiforme si muove con accelerazione costante (ovvero che non dipende dal tempo). Innanzitutto ricaviamo un'espressione della velocità in funzione del tempo (ovvero  $v(t)$ ). Matematicamente il procedimento è identico a quello già fatto per il moto rettilineo uniforme (nei passaggi matematici basta che sostituiate  $v_0$  con  $a$  e  $x(t)$  con  $v(t)$ ). Sappiamo che

$$(17) \quad \frac{dv}{dt} = a = \text{costante} .$$

Allora prendiamo l'integrale sia a sinistra che a destra dell'uguale tra un istante iniziale  $t_i$  e un generico istante finale  $t$ .

L'integrale a sinistra dell'uguale dà:

$$(18) \quad \int_{t_i}^t \frac{dv}{dt} dt = v(t) \Big|_{t_i}^t = v(t) - v(t_i) .$$

L'integrale a destra

$$(19) \quad \int_{t_i}^t a dt = a \int_{t_i}^t dt = a(t - t_i) ,$$

dove ho usato la proprietà degli integrali per cui se sto integrando una costante (nel nostro caso l' accelerazione  $a$  che non dipende appunto dal tempo  $t$ ) posso, come si dice, “portare fuori dall'integrale” tale costante. Pertanto uguagliando la (18) e la (19) otteniamo una prima legge importante:

$$(20) \quad v(t) = v(t_i) + a(t - t_i) .$$

Data questa legge siamo in grado di ottenere la legge oraria del moto. Intanto mi ricordo che

$$(21) \quad \frac{dx}{dt} = v(t) .$$

A questo punto integro la Eq. (26) sia a sinistra che a destra dell'uguale tra un istante iniziale  $t_i$  e un generico istante finale  $t$ . Integrando a sinistra ottengo come al solito:

$$(22) \quad \int_{t_i}^t v(t) dt = \int_{t_i}^t \frac{dx}{dt} dt = x(t) \Big|_{t_i}^t = x(t) - x(t_i) .$$

L'integrale a destra dell'uguale nella Eq. (26) dà:

$$(23) \quad \int_{t_i}^t [v(t_i) + a(t - t_i)] dt = v(t_i) \int_{t_i}^t dt + a \int_{t_i}^t (t - t_i) dt = v(t_i)(t - t_i) + \frac{1}{2}a(t - t_i)^2 .$$

Uguagliando la (22) con la (23) otteniamo la legge oraria del moto:

$$(24) \quad x(t) = x(t_i) + v(t_i)(t - t_i) + \frac{1}{2}a(t - t_i)^2 .$$

Spesso l'istante iniziale  $t_i$  viene indicato con  $t_0$ , e quindi  $x(t_i)$  viene indicato con  $x(t_0) = x_0$  e  $v(t_i)$  con  $v(t_0) = v_0$ . Pertanto, riepilogando si ha:

(25)

$$a = \text{costante}$$

(26)

$$v(t) = v_0 + a(t - t_0).$$

(27)

$$x(t) = x_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2.$$

Nel caso in cui si faccia la scelta per cui l'istante iniziale  $t_0 = 0$

(28)

$$a = \text{costante}$$

(29)

$$v(t) = v_0 + at$$

(30)

$$x(t) = x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2.$$

N.B1.: Una possibile semplice verifica che i risultati ottenuti sono corretti consiste, per esempio, nel derivare rispetto al tempo la (26), ottenendo così:

$$(31) \quad \frac{dv(t)}{dt} = a,$$

come ci si doveva aspettare visto che l'accelerazione è la derivata della velocità rispetto al tempo.

N.B.2: se ci riduciamo al caso particolare  $a = 0$  dalla legge oraria del moto (27) otteniamo esattamente la Eq. (7)

(32)

$$x(t) = x_0 + v_0(t - t_0),$$

ovvero la legge oraria di un moto rettilineo uniforme: di nuovo è quello che ci si aspetta visto che  $a = dv/dt = 0$  equivale a dire che la velocità in questo caso particolare rimane costante.