

# Cinematica

**Obiettivo:** descrizione spazio-temporale del moto di un corpo

La posizione e il moto di un corpo sono concetti “relativi”: necessità di scegliere un “sistema di riferimento” (SdR), che chiameremo “fisso”, secondo criteri di comodità e di semplicità (ex. sistema terrestre, sistema solare, ecc.)

Schematizzazione del **punto materiale:**

corpo avente

- massa finita
- dimensioni trascurabili (ma non nulle!) rispetto alle distanze lineari che esso percorre

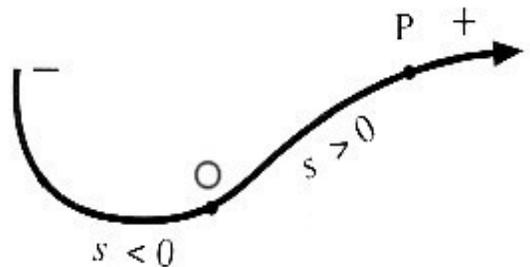
## Equazione vettoriale del moto

Nel SdR cartesiano prescelto il moto del corpo è descritto da

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \rightarrow \begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$$

che definiscono la “traiettoria” nello spazio in funzione del tempo. Fissata un'origine O sulla traiettoria e indicata con s (numero reale) l'ascissa curvilinea (intrinseca) su di essa, per ogni punto P della traiettoria avremo

s = lunghezza dell'arco OP  
e quindi il moto di P potrà essere espresso tramite



$$\vec{r} = \vec{r}(s)$$



equazione della  
traiettoria

$$s = s(t)$$



legge oraria

# Velocità del punto materiale

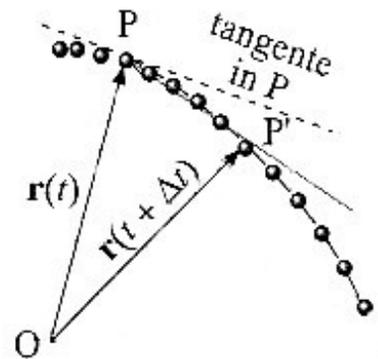
Nel SdR prescelto

$$\begin{array}{lclcl} \text{avremo} & \text{a} & t = t_1 & \text{-->} & \bar{r} = \bar{r}(t_1) \\ & \text{a} & t = t_1 + \Delta t & \text{-->} & \bar{r} = \bar{r}(t_1 + \Delta t) \end{array}$$

Si definisce **velocità media** nell'intervallo  $\Delta t$

$$\bar{v}_m = [\bar{r}(t_1 + \Delta t) - \bar{r}(t_1)] / \Delta t$$

$\bar{v}_m$  non dipende dal percorso reale ma solo dalle posizioni iniziale e finale (secante PP') in  $\Delta t$ .



Per una descrizione più fedele del moto occorre allora definire la **velocità istantanea** tramite

$$\bar{v}(t_1) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v}_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta \bar{r} / \Delta t) = (d\bar{r}/dt)_{t_1}$$

Introducendo il **versore tangente**  $\bar{u}_t$  come

$$\bar{u}_t(P) = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} (\Delta \bar{r} / \Delta s) = (d\bar{r}/ds)_P$$

si ha che  $\bar{v}(t_1)$  può anche essere espressa come

$$\bar{v}(t_1) = (d\bar{r}/dt)_{t_1} = (d\bar{r}/ds)_{t_1} (ds/dt)_{t_1} = (ds/dt)_{t_1} \bar{u}_t(P) = v_s(t_1) \bar{u}_t$$

ovvero  $\bar{v}(t_1)$  è tangente alla traiettoria in  $P(t_1)$  e ha una rappresentazione cartesiana data da

$$\bar{v}(t_1) = (dx/dt)\bar{u}_x + (dy/dt)\bar{u}_y + (dz/dt)\bar{u}_z = v_x \bar{u}_x + v_y \bar{u}_y + v_z \bar{u}_z$$

# Accelerazione del punto materiale

Analogamente a quanto visto per la velocità definiremo **accelerazione media** nell'intervallo  $\Delta t$

$$\bar{a}_m = [ \bar{v}(t_1 + \Delta t) - \bar{v}(t_1) ] / \Delta t$$

e un'**accelerazione istantanea**

$$\bar{a}(t_1) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{a}_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta \bar{v} / \Delta t) = (d\bar{v}/dt)_{t_1} = (d^2\bar{r}/dt^2)_{t_1}$$

con rappresentazione cartesiana data da

$$\bar{a}(t_1) = (dv_x/dt)\bar{u}_x + (dv_y/dt)\bar{u}_y + (dv_z/dt)\bar{u}_z = a_x \bar{u}_x + a_y \bar{u}_y + a_z \bar{u}_z$$

## Espressione intrinseca

$$\bar{a}(t_1) = (d\bar{v}/dt)_{t_1} = (dv_s \bar{u}_t / dt)_{t_1} = (dv_s/dt)_{t_1} \bar{u}_t + v_s (d\bar{u}_t / dt)_{t_1}$$

componente tangenziale

$$(d\bar{u}_t / dt)_{t_1} = (d\bar{u}_t / ds)(ds/dt) = v_s (d\phi/ds)\bar{u}_n = (v_s/\rho)\bar{u}_n$$

componente normale

con  $\bar{u}_n$  versore normale alla traiettoria in P e  $\rho$  raggio del cerchio osculatore in P.

Concludendo

$$\bar{a}(t_1) = \bar{a}_t(t_1) + \bar{a}_n(t_1) = a_t(t_1)\bar{u}_t + a_n(t_1)\bar{u}_n =$$

$$= (dv_s/dt)\bar{u}_t + (v_s^2/\rho)\bar{u}_n = a_s \bar{u}_t + (v_s^2/\rho)\bar{u}_n$$

E' evidente che se  $\rho \rightarrow \infty$  allora  $a_n(t_1) \rightarrow 0$

# Classificazione dei moti elementari

Le due relazioni  $\bar{v}(t_1) = v_s \bar{u}_t = (ds/dt)\bar{u}_t$   
 $\bar{a}(t_1) = (dv_s/dt)\bar{u}_t + (v_s^2/\rho)\bar{u}_n$

permettono di classificare i moti elementari, caratterizzando l'aspetto cinematico in maniera indipendente da quello geometrico (traiettoria)

Due casi particolarmente semplici sono

1) **moti uniformi** -->  $v_s = \text{costante} = v_{s0}$

2) **moti uniformemente vari** -->  $dv_s/dt = \text{costante} = a_{s0}$

## 1) moto uniforme

Ricordando che  $v_s = (ds/dt) = v_{s0}$ , la legge oraria può essere ottenuta da

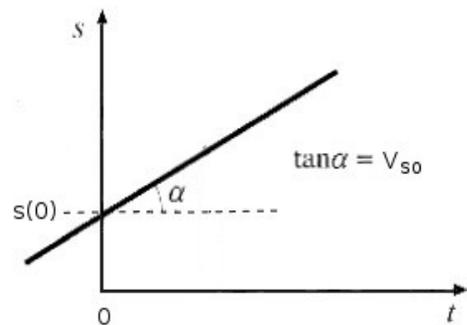
$$s(t) = \int (ds/dt) dt + C = \int v_s dt + C = v_{s0} t + C \rightarrow$$

$$\rightarrow s(t) = v_{s0} t + s(0)$$

con rappresentazione grafica riportata accanto, e inoltre

$$\bar{v}(t) = v_{s0} \bar{u}_t$$

$$\bar{a}(t) = (v_{s0}^2/\rho)\bar{u}_n = \text{costante}$$



Lo stesso risultato è ottenibile con la seguente procedura, detta “separazione delle variabili”

$$v_s(t) = v_{s0} = ds/dt \rightarrow ds = v_{s0} dt$$

ed integrando i due membri tra  $t = 0$  e  $t$

$$s(t) - s(0) = v_{s0} (t - 0) \rightarrow s(t) = v_{s0} t + s(0)$$

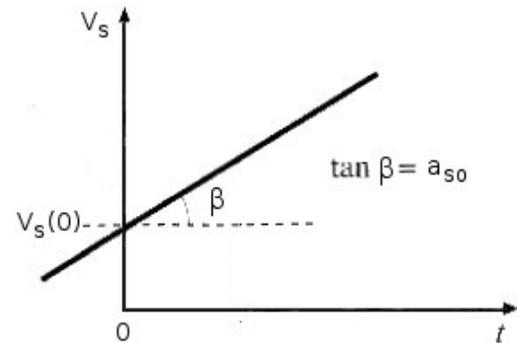
# Classificazione dei moti elementari

$$\bar{v}(t_1) = v_s \bar{u}_t = (ds/dt)\bar{u}_t$$
$$\bar{a}(t_1) = (dv_s/dt)\bar{u}_t + (v_s^2/\rho)\bar{u}_n$$

## 2) **moto uniforme vario** ( $a_s = \text{costante} = a_{s0}$ )

In maniera analoga al caso precedente si ottiene  $v_s(t) = a_{s0} t + v_s(0)$

con rappresentazione grafica riportata accanto nel caso in cui  $a_{s0}$  e  $v_s(0)$  positivi

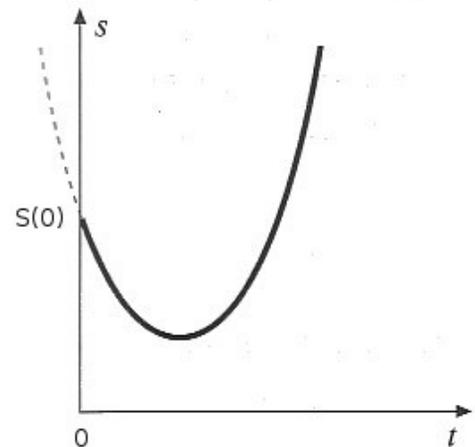


Per arrivare alla legge oraria potremo applicare nuovamente la procedura di separazione delle variabili ottenendo

$$ds = v_s dt = (a_{s0} t dt + v_s(0)) dt \rightarrow s(t) - s(0) = \frac{1}{2} a_{s0} t^2 + v_s(0) t$$

e infine  $s(t) = \frac{1}{2} a_{s0} t^2 + v_s(0) t + s(0)$

con rappresentazione grafica riportata accanto nel caso in cui  $a_{s0}$  e  $s(0)$  positivi,  $v_s(0)$  negativa



Ricavando  $t$  dalla relazione per  $v_s(t)$  e sostituendo in quella per  $s(t)$  si ottiene

$$v_s^2(t) = 2 a_{s0} [s(t) - s(0)] + v_s^2(0)$$

che esprime la velocità in funzione dell'ascissa curvilinea

# Classificazione dei moti elementari

Applichiamo i moti elementari a particolari traiettorie geometriche

$$\begin{aligned}\bar{v}(t_1) &= v_s \bar{u}_t = (ds/dt)\bar{u}_t \\ \bar{a}(t_1) &= (dv_s/dt)\bar{u}_t + (v_s^2/\rho)\bar{u}_n\end{aligned}$$

## Moti rettilinei

Scegliendo un asse coordinato (ad es. x) coincidente con la traiettoria, si ha semplicemente

a) **moto rettilineo uniforme** -->  $x(t) = v_{s0} t + x(0)$

b) **moto rettilineo uniformemente accelerato** -->  
-->  $x(t) = \frac{1}{2} a_{s0} t^2 + v_s(0) t + x(0)$

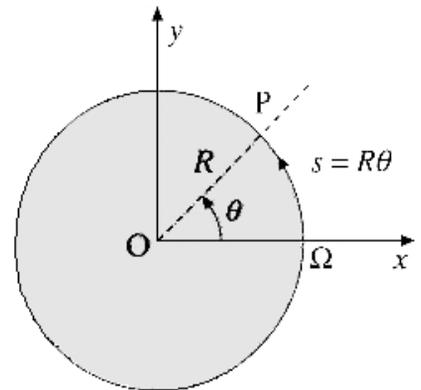
## Moti circolari

Caratterizziamo la traiettoria facendo riferimento alla figura equazione parametriche:

$$x = R \cos \theta \quad y = R \sin \theta \quad z = 0$$

vettore posizione:

$$\bar{r} = R \bar{u}_r \quad \text{con} \quad \bar{u}_r = \cos \theta \bar{u}_x + \sin \theta \bar{u}_y$$



La coordinata curvilinea, a partire da  $\Omega = (R, 0, 0)$ , è  $s = R\theta$

versore tangente:  $\bar{u}_t = d\bar{r}/ds = d\bar{u}_r/d\theta = -\sin \theta \bar{u}_x + \cos \theta \bar{u}_y$

versore normale: dalla relazione  $d\bar{u}_t = d\theta \bar{u}_n = (ds/R) \bar{u}_n$

segue che  $\bar{u}_n = R d\bar{u}_t/ds = -\cos \theta \bar{u}_x - \sin \theta \bar{u}_y = -\bar{u}_r$

### a) moto circolare uniforme

Da  $s(t) = v_{s0} t + s(0)$  segue che  $\theta(t) = (v_{s0}/R) t + \theta(0) = \omega t + \theta(0)$

e, se  $\theta(0)=0$ , anche

$$\bar{r}(t) = R \cos \omega t \bar{u}_x + R \sin \omega t \bar{u}_y$$

infine, essendo  $dv_s/dt = 0$ , si ha

$\bar{a}(t) = (v_{s0}^2/R) \bar{u}_n = (\omega^2 R) \bar{u}_n = -\omega^2 \bar{r}$  accelerazione centripeta

# Classificazione dei moti elementari

## b) Moto circolare uniformemente vario

$$\begin{aligned}\bar{v}(t_1) &= v_s \bar{u}_t = (ds/dt)\bar{u}_t \\ \bar{a}(t_1) &= (dv_s/dt)\bar{u}_t + (v_s^2/\rho)\bar{u}_n\end{aligned}$$

Da  $s(t) = \frac{1}{2} a_{s0} t^2 + v_s(0) t + s(0)$  segue che

$$\theta(t) = \frac{1}{2} (a_{s0}/R) t^2 + (v_s(0)/R) t + \theta(0)$$

ed inoltre

$$\bar{a}(t) = (dv_s/dt) \bar{u}_t + (v_s^2/R) \bar{u}_n$$

Ricordando che la derivata rispetto al tempo di un vettore di modulo costante (il vettore posizione nel moto circolare) è data da

$$d\bar{r}/dt = \bar{v}(t) = \bar{\omega}(t) \times \bar{r}(t)$$

con  $\bar{\omega}(t) = (d\theta/dt) \bar{u}_z = \omega(t) \bar{u}_z$  velocità angolare, avremo

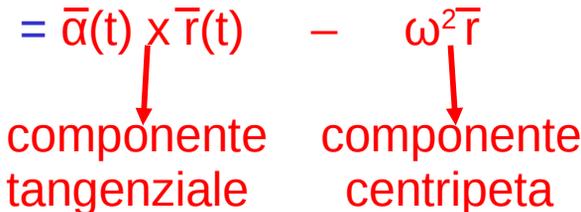
$$\bar{v}(t) = \bar{\omega}(t) \times \bar{r}(t) = \omega(t) r \bar{u}_t$$

Potremo definire l'accelerazione angolare come

$$\bar{\alpha}(t) = d\bar{\omega}(t)/dt = (d\omega(t)/dt) \bar{u}_z = (d^2\theta(t)/dt^2) \bar{u}_z$$

e ricavare

$$\begin{aligned}\bar{a}(t) &= d\bar{v}(t)/dt = d[\bar{\omega}(t) \times \bar{r}(t)]/dt = \\ &= [d\bar{\omega}(t)/dt] \times \bar{r}(t) + \bar{\omega}(t) \times d[\bar{r}(t)]/dt = \\ &= \bar{\alpha}(t) \times \bar{r}(t) + \bar{\omega}(t) \times [\bar{\omega}(t) \times \bar{r}(t)] = \\ &= \bar{\alpha}(t) \times \bar{r}(t) - \omega^2 \bar{r}\end{aligned}$$



componente tangenziale      componente centripeta

# Moti elementari

## Relazioni fondamentali

$$\bar{v}(t_1) = v_s \bar{u}_t = (ds/dt) \bar{u}_t$$

$$\bar{a}(t_1) = (dv_s/dt) \bar{u}_t + (v_s^2/\rho) \bar{u}_n$$

## Moti rettilinei

Scegliendo un asse coordinato (ad es. x) coincidente con la traiettoria, si ha semplicemente

### a) moto rettilineo uniforme

$$x(t) = v_{s0} t + x(0) ; \quad v(t) = v_{s0} ; \quad a(t) = 0$$

### b) moto rettilineo uniformemente accelerato

$$x(t) = \frac{1}{2} a_{s0} t^2 + v_s(0) t + x(0) ; \quad v(t) = a_{s0} t + v_s(0) ; \quad a(t) = a_{s0}$$

## Moti circolari

### a) moto circolare uniforme

$$s(t) = v_{s0} t + s(0) \quad \rightarrow \theta(t) = (v_{s0}/R) t + \theta(0) = \omega t + \theta(0)$$

$$\bar{r}(t) = R \cos \omega t \bar{u}_x + R \sin \omega t \bar{u}_y$$

$$\bar{v}(t) = v_{s0} \bar{u}_t \quad \rightarrow \omega(t) = v_{s0}/R$$

$$\bar{a}(t) = (v_{s0}^2/R) \bar{u}_n = -\omega^2 \bar{r}$$

### b) moto circolare uniformemente vario

$$s(t) = \frac{1}{2} a_{s0} t^2 + v_s(0) t + s(0)$$

$$\rightarrow \theta(t) = (a_{s0}/2R) t^2 + (v_s(0)/R) t + \theta(0)$$

$$\bar{v}(t) = (a_{s0} t + v_s(0)) \bar{u}_t$$

$$\rightarrow \omega(t) = (a_{s0}/R) t + (v_s(0)/R)$$

$$\bar{\alpha}(t) = d\bar{\omega}(t)/dt = (d\omega(t)/dt) \bar{u}_z = (d^2\theta(t)/dt^2) \bar{u}_z = (a_{s0}/R) \bar{u}_z$$

$$\bar{a}(t) = \bar{\alpha}(t) \times \bar{r}(t) = -\omega^2 \bar{r}$$

## Moti periodici

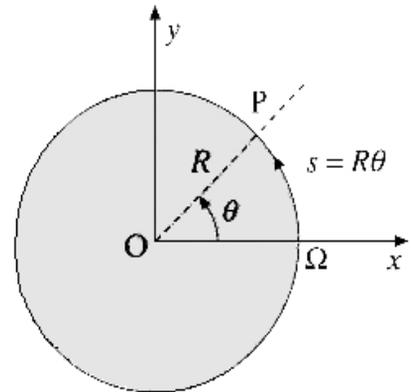
Moto circolare **uniforme**:  $\vec{r}(t) = R \cos\theta \vec{u}_x + R \sin\theta \vec{u}_y$   
con  $\theta = \omega t$  e quindi

$$\vec{r}(t) = R \cos\omega t \vec{u}_x + R \sin\omega t \vec{u}_y$$

primo caso di moto periodico  
ovvero di moto per il quale  
 $\vec{r}(t+nT) = \vec{r}(t)$

per ogni n intero.

Si ha subito che  $T = 2\pi / \omega$



Inoltre  $\vec{a}(t) = -\omega^2 \vec{r} \rightarrow d^2\vec{r}/dt^2 = -\omega^2 \vec{r}$

$$d^2x/dt^2 = -\omega^2 x \quad d^2y/dt^2 = -\omega^2 y$$

**equazioni differenziali caratteristiche  
del moto armonico**

con soluzione

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

dove A (ampiezza) e  $\varphi$  (fase iniziale) sono determinate  
dalle condizioni iniziali (valori di x e di dx/dt a  $t=0$ ,  $x_0$  e  $v_{x0}$ )  
tramite le relazioni

$$\text{tg } \varphi = -v_{x0} / \omega x_0 \quad A = \sqrt{x_0^2 + v_{x0}^2 / \omega^2}$$

Teorema di Fourier:

una qualsiasi funzione periodica può essere espressa come  
somma finita o infinita di funzioni sinusoidali

# Problema inverso della cinematica

Problema diretto:

nota (misurata)  $\bar{r}(t) \rightarrow \bar{v}(t) \rightarrow \bar{a}(t)$

Problema inverso:

nota (misurata)  $\bar{v}(t) \rightarrow ? \rightarrow \bar{r}(t)$  (1)

oppure

nota (misurata)  $\bar{a}(t) \rightarrow ? \rightarrow \bar{v}(t) \rightarrow ? \rightarrow \bar{r}(t)$  (2)

Risposta a (1): Sì, purché la conoscenza di  $\bar{v}(t)$  sia sufficientemente dettagliata e sia nota  $\bar{r}(t)$  ad un istante  $t_0$ .

Si avrà allora

$$\bar{r}(t) = \bar{r}(t_0) + \int_{t_0}^t \bar{v}(t') dt'$$

Risposta a (2): Sì, purché la conoscenza di  $\bar{a}(t)$  sia sufficientemente dettagliata e siano note  $\bar{v}(t)$  e  $\bar{r}(t)$  ad un istante  $t_0$ .

Si avrà allora

$$\bar{v}(t) = \bar{v}(t_0) + \int_{t_0}^t \bar{a}(t') dt'$$

e poi nuovamente

$$\bar{r}(t) = \bar{r}(t_0) + \int_{t_0}^t \bar{v}(t') dt'$$

Applicazione (moto dei gravi):

se si trascura la resistenza dell'aria, tutti i corpi in vicinanza della superficie terrestre si muovono con accelerazione costante  $\bar{g}$  diretta verticalmente verso il basso.

Avremo quindi

$$\bar{v}(t) = \bar{v}(t_0) + \int_{t_0}^t \bar{g}(t') dt' = \bar{v}(t_0) + \bar{g} (t - t_0)$$

$$\bar{r}(t) = \bar{r}(t_0) + \int_{t_0}^t \bar{v}(t') dt' = \bar{r}(t_0) + \bar{v}(t_0) (t - t_0) + \frac{1}{2} \bar{g} (t - t_0)^2$$

# Esercizi sui moti elementari

1) Per poter decollare un aereo a reazione deve raggiungere la velocità minima  $v_0 = 85 \text{ m/s}$  (velocità minima di sostentamento), dopo un moto uniformemente accelerato con  $a_0 = 4.0 \text{ m/s}^2$ . Nel caso in cui il pilota dovesse interrompere il decollo, può farlo con una decelerazione di modulo  $a_1 = 5.0 \text{ m/s}^2$  al massimo.

Determinare la minima lunghezza che la pista dovrebbe avere affinché l'aereo abbia spazio sufficiente per fermarsi anche nel caso in cui il pilota decidesse di interrompere il decollo al momento in cui l'aereo raggiunge la minima velocità di sostentamento (R. 1626 m)

2) Da un suolo orizzontale si spara un proiettile nella direzione che forma un angolo  $\varphi_0$  rispetto al suolo. Chiamando  $\theta$  il cosiddetto angolo di visuale corrispondente all'angolo che la congiungente tra il punto di lancio e il punto di massima quota forma con l'orizzontale, a) determinare la relazione tra  $\theta$  e  $\varphi_0$

b) calcolare il valore di  $\theta$  corrispondente a  $\varphi_0 = 45^\circ$

(R. a)  $\tan \theta = \frac{1}{2} \tan \varphi_0$  ; b)  $\theta = 26.56^\circ$

3) Una pallina di massa  $m = 100 \text{ g}$  viene lanciata orizzontalmente con una velocità  $v = 5.0 \text{ m/s}$ . All'istante del lancio (preso come istante iniziale,  $t=0$ ) la pallina si trova ad una quota  $h = 1.0 \text{ m}$ . Determinare:

a) a quale distanza (dalla verticale per il punto di partenza) la pallina raggiunge il pavimento

b) il tempo complessivo in cui la pallina, dopo l'impatto con il pavimento (supposto istantaneo e perfettamente elastico), ritorna all'altezza pari a  $h/2$ .

(R. a) 2.25 m ; b) 0.58 s )

4) Da lontano un automobilista vede scattare il verde del semaforo e decide di tentare di passare prima che torni il rosso. Egli stima che la sua distanza dal semaforo sia di 600 m e sa che il verde ha una durata di 45 s. La sua velocità è di 30 km/h. Riuscirà a passare in tempo? In caso negativo,, di quanto deve accelerare per riuscirci?

(R. per passare il semaforo è necessaria un'accelerazione maggiore di  $0.22 \text{ m/s}^2$ )

5) All'istante  $t=0$ , un'auto si mette in moto su una pista circolare di raggio  $R = 300 \text{ m}$ . Fino all'istante  $t_1 = 10 \text{ s}$ , l'accelerazione tangenziale ha valore costante  $a_t$  e lo spazio percorso è 150 m. Si determini il modulo e la direzione dell'accelerazione totale dell'auto all'istante  $t_1$   
(R.  $a = 4.24 \text{ m/s}^2$  ,  $\tan \varphi = 1$  con  $\varphi$  angolo tra l'accelerazione e il vettore posizione a  $t = t_1$  )

6) Un satellite si muove intorno alla Terra ( $R_T = 6371 \text{ km}$ ) ad una distanza di 550 km dalla superficie e con un periodo di rivoluzione  $T = 1 \text{ h } 35 \text{ m } 12 \text{ s}$ .

a) Calcolare l'accelerazione centripeta e la velocità del satellite

b) Esprimere la velocità e l'accelerazione del satellite in forma vettoriale

(R. a)  $v = 7.63 \text{ m/s}$   $a_c = 8.35 \text{ m/s}^2$ ; b)  $\underline{v} = v[-\text{sen}(wt)\underline{u}_x + \text{cos}(wt)\underline{u}_y]$ ;  $\underline{a} = -a[\text{cos}(wt)\underline{u}_x + \text{sen}(wt)\underline{u}_y]$

7) Si considerino i moti circolari uniformi elencati nel seguito e si proceda al calcolo delle grandezze richieste.

a) Davide rotea la sua fionda, di lunghezza  $l = 1.0 \text{ m}$ , alla velocità di 2 giri al secondo. Con quale velocità si muove il sasso verso la fronte di Golia nel momento in cui viene lasciato andare?

b) Quale è il modulo dell'accelerazione di un granello di polvere sul bordo di un disco che gira a 33 giri al minuto e ha un diametro  $D = 30 \text{ cm}$ ?

(R. a)  $v = 12.6 \text{ m/s}$  ; b)  $a = 1.79 \text{ m/s}^2$ )