UNIVERSITÀ DI PADOVA · 1222

Corso di Fisica Generale – Pt1
Chimica Industriale 25/26

Lez 4. Moti relativi

Docente:

Alessandro Patelli

alessandro.patelli@unipd.it



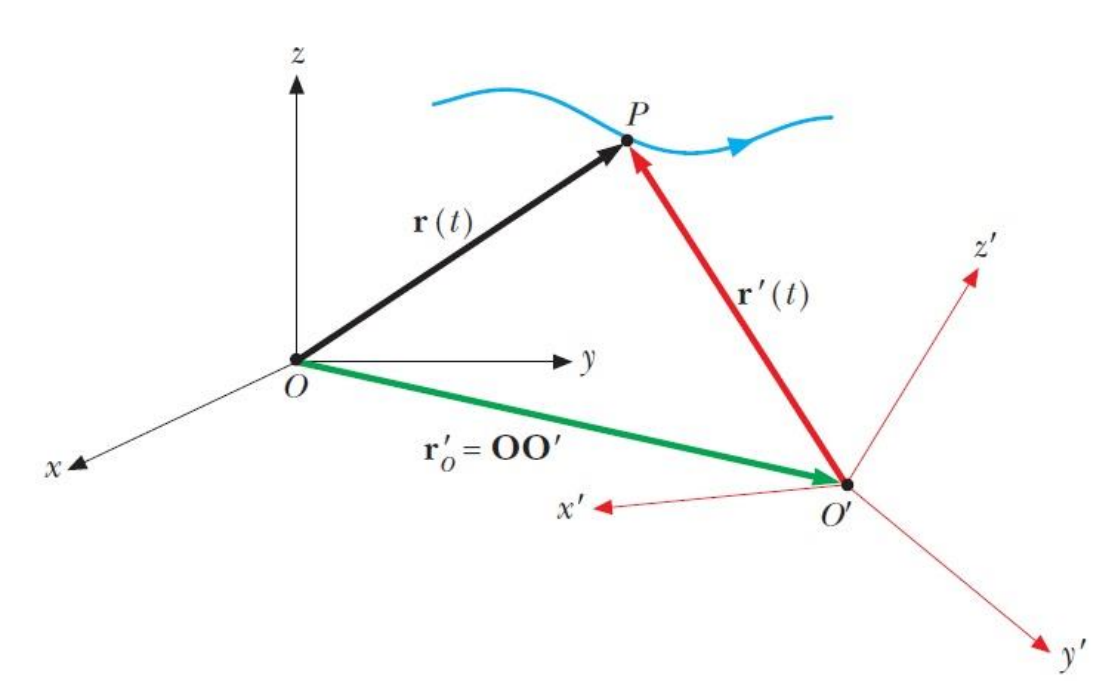
Sommario

- Sistemi di riferimento in moto relativo
- Sistemi inerziali
- Sistemi non inerziali → forze apparenti
- Moti di trascinamento traslatorio rettilineo uniforme, accelerato e rotatorio

Le **leggi fisiche** non dipendono dalla scelta del sistema di riferimento e non esiste pertanto un punto privilegiato dello spazio e nemmeno un'orientazione privilegiata:

lo **spazio** appare **omogeneo e isotropo**.

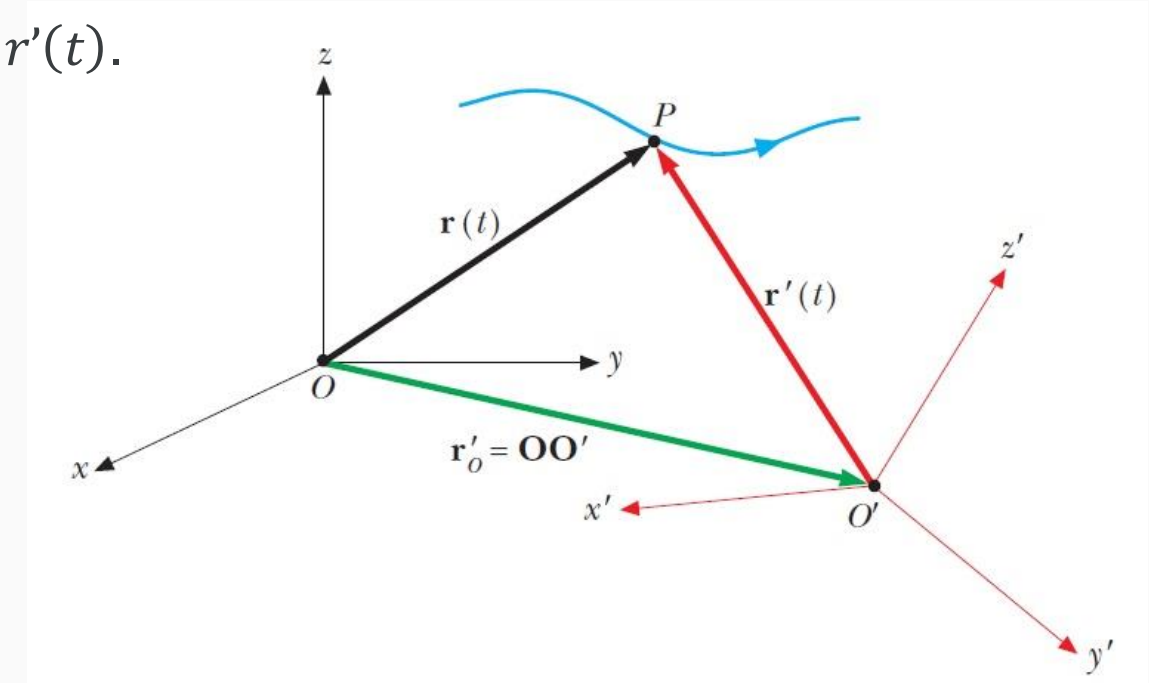
Se ho due sistemi di riferimento **in moto** relativo fra di loro le **leggi fisiche** non possono dipendere dal sistema di riferimento a meno che il moto non abbia alcune caratteristiche. **Non sussiste una invarianza generale** delle leggi fisiche fra due sistemi in moto relativo.



Un punto P descrive una traiettoria nello spazio

Definisco un sistema di riferimento fisso S (x, y, z) ed uno mobile S' (x', y', z').
Il punto P avrà rispettivamente posizione $r(t)$ e $r'(t)$.
Si può scrivere che

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



$$\vec{r}(t) = x\hat{u}_x + y\hat{u}_y + z\hat{u}_z$$

$$\vec{r}_{O'(t)} = x_{O'}\hat{u}_x + y_{O'}\hat{u}_y + z_{O'}\hat{u}_z$$

$$\vec{r}'(t) = x'\hat{u}_{x'} + y'\hat{u}_{y'} + z'\hat{u}_{z'}$$

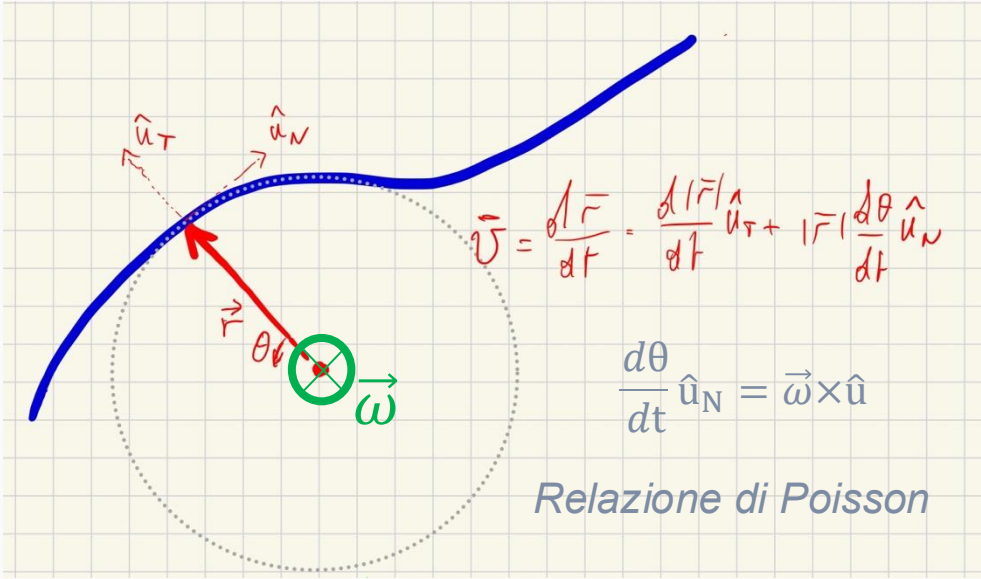
La velocità del punto risulta $\vec{v}(t) = \vec{v}_{O'} + \frac{d\vec{r}'}{dt}$

Esplicitiamo quindi la relazione $\vec{v}(t) = \vec{v}_{O'} + \frac{d\vec{r}'}{dt}$

$$\frac{d\vec{r}'}{dt} = \left(\frac{dx'}{dt}\hat{u}_{x'} + \frac{dy'}{dt}\hat{u}_{y'} + \frac{dz'}{dt}\hat{u}_{z'}\right) + \left(x'\frac{d\hat{u}_{x'}}{dt} + y'\frac{d\hat{u}_{y'}}{dt} + z'\frac{d\hat{u}_{z'}}{dt}\right)$$

Velocità nel sistema S' *Rotazione del sistema S'*

$$\frac{d\hat{u}}{dt} = \frac{d\theta}{dt}\hat{u}_N = \vec{\omega}\times\hat{u}$$



$$\frac{d\vec{r}'}{dt} = \left(\frac{dx'}{dt}\hat{u}_{x'} + \frac{dy'}{dt}\hat{u}_{y'} + \frac{dz'}{dt}\hat{u}_{z'}\right) + \left(x'\vec{\omega}\times\hat{u}_{x'} + y'\vec{\omega}\times\hat{u}_{y'} + z'\vec{\omega}\times\hat{u}_{z'}\right) = \vec{v}' + \vec{\omega}\times\vec{r}'$$

Riprendendo ora la formula della velocità del punto P

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_{O'} + \frac{d\vec{r}'}{dt} = \vec{v}' + \vec{v}_{O'} + \vec{\omega}\times\vec{r}' = \vec{v}' + \vec{v}_{t}$$

Velocità nel sistema S' — *Velocità di trascinamento*

Possiamo definire due casi particolari

- Il sistema mobile non ruota rispetto a quello fisso ($\vec{\omega} = 0$). Si parla di moto relativo traslatorio tra i due sistemi, ovvero di **moto di trascinamento traslatorio**

$$\vec{v}(t) = \vec{v}' + \vec{v}_{O'}$$

- Il sistema mobile non si sposta rispetto a quello fisso ($\vec{v}_{O'} = 0$), ma ruota. Si parla di moto relativo rotatorio tra i due sistemi, ovvero di **moto di trascinamento rotatorio**.

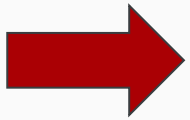
$$\vec{v}(t) = \vec{v}' + \vec{\omega}\times\vec{r}'$$

Ricaviamo ora la relazione che sussiste tra le accelerazioni del punto P rispetto ai due sistemi di riferimento S e S' in moto relativo.

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

Come prima posso considerare che $\frac{d\vec{v}'}{dt} = \vec{a}' + \vec{\omega}\times\vec{v}'$

Posso anche considerare che $\vec{\omega}\times\frac{d\vec{r}'}{dt} = \vec{\omega}\times(\vec{v}' + \vec{\omega}\times\vec{r}') = \vec{\omega}\times\vec{v}' + \vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}'$



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

Teorema delle accelerazioni relative

Accelerazione di trascinamento

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

Accelerazione di Coriolis

Traslazione 0'

Accelerazione centripeta dovuta alla rotazione di 0'

Accelerazione tangenziale dovuta alla rotazione di 0'

Possiamo definire due casi particolari

- Il sistema mobile non ruota rispetto a quello fisso ($\vec{\omega} = 0$). Si parla di moto relativo traslatorio tra i due sistemi, ovvero di **moto di trascinamento traslatorio**

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_{O'}$$

- Il sistema mobile non si sposta rispetto a quello fisso ($\vec{v}_{O'} = 0$), ma ruota. Si parla di moto relativo rotatorio tra i due sistemi, ovvero di **moto di trascinamento rotatorio**.

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

Definiamo come sistema di riferimento inerziale S, un sistema in cui vale il principio di inerzia.

➡ Un corpo non soggetto a forze o è in quiete o si muove di moto rettilineo uniforme.

➡ $\vec{F} = m\vec{a} = 0$

➡ $\vec{a} = 0$

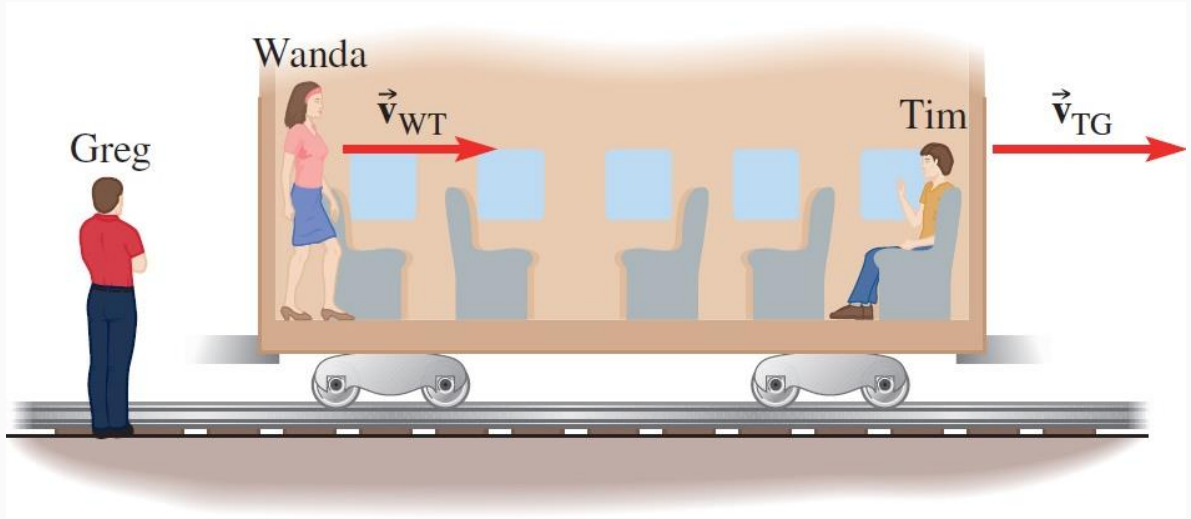
Allora se definisco un altro sistema di riferimento S' per poter descrivere le stesse leggi fisiche occorre che

$$\vec{a}_{O'} + \vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}' + \frac{d\vec{\omega}}{dt}\times\vec{r}' + 2\vec{\omega}\times\vec{v}' = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{a}_{O'} = 0 \quad \vec{\omega} = 0$$

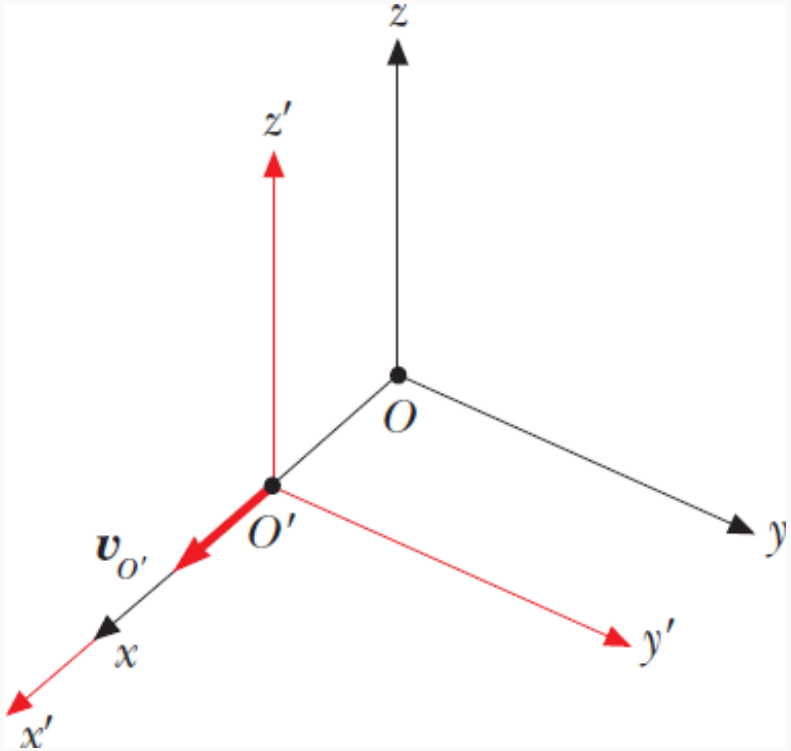
definito un sistema di riferimento inerziale, tutti gli altri sistemi in moto traslatorio rettilineo uniforme rispetto a questo sono anch'essi inerziali.

Wanda sta camminando lungo il corridoio di un treno che si muove lungo i binari a velocità costante. Quanto velocemente cammina Wanda? Tim e Greg daranno risposte diverse.

La risposta alla domanda "Quanto velocemente?" dipende dall'osservatore.



$$\vec{a}_{O'} = 0$$
$$\vec{\omega} = 0$$
$$\vec{v}_{O'} = costante$$



$$\vec{r}(t) = \vec{r}_{O'} + \vec{r}'(t)$$
$$\vec{v}(t) = \vec{v}' + \vec{v}_{O'} + \vec{\omega}\times\vec{r} = \vec{v}' + \vec{v}_{O'}$$
$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_{O'} + \vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}' + \frac{d\vec{\omega}}{dt}\times\vec{r}' + 2\vec{\omega}\times\vec{v}' = 0$$

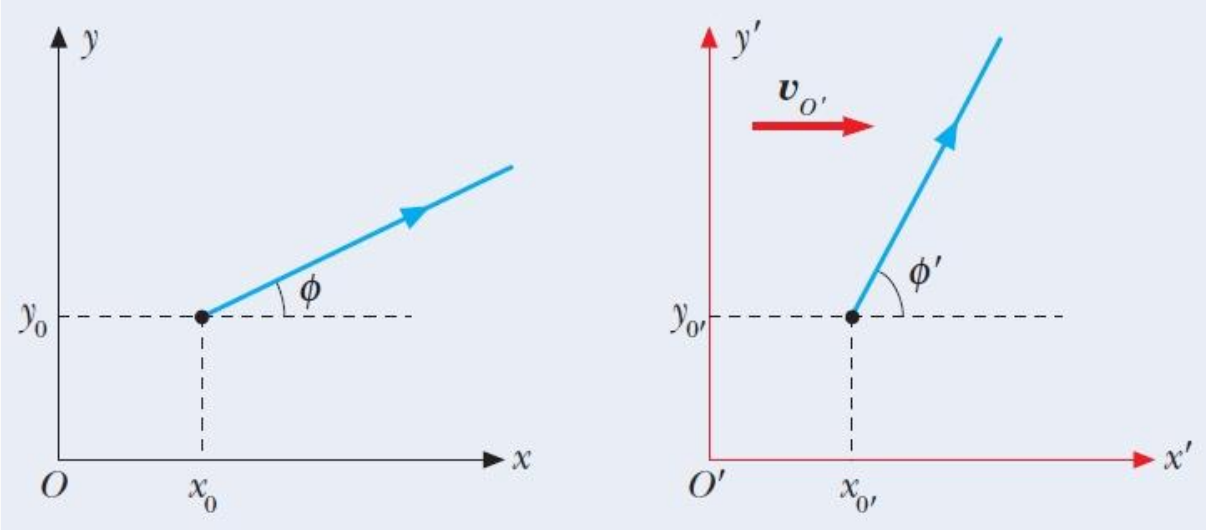
Si ha quindi come legame fra i due sistemi di riferimento

$$\vec{v}(t) = \vec{v}' + \vec{v}_{O'}$$
$$\vec{a} = \vec{a}'$$

Da cui segue per la posizione

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

Esempio



Un punto P descrive nel piano x, y un moto rettilineo uniforme con velocità v, di componenti v_x e v_y , partendo all'istante $t = 0$ dalla posizione di coordinate x_0, y_0.

Determinare il moto visto dal sistema O', in moto con velocità v_O parallela all'asse x.

$$x = x_0 + v_x t, \qquad x' = x - v_{O'} t = x_0 + (v_x - v_{O'}) t,$$

$$y = y_0 + v_y t, \qquad y' = y = y_0 + v_y t,$$

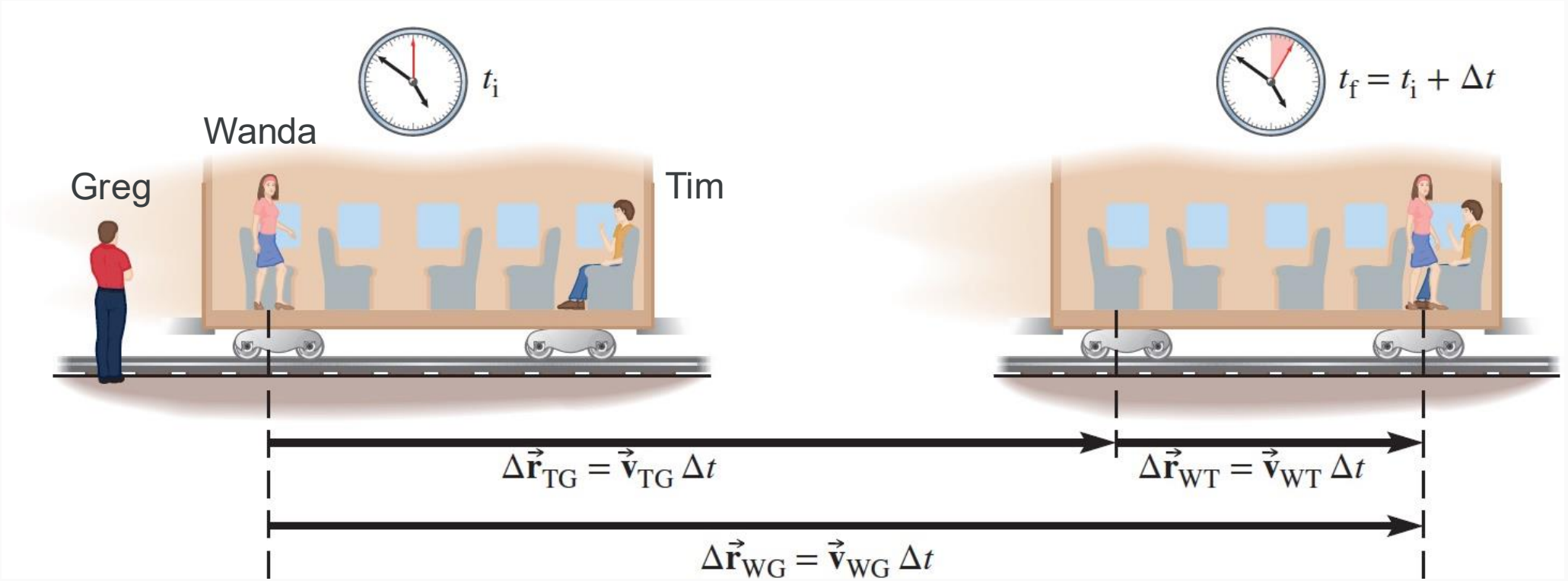
$$z = 0, \qquad z' = z = 0,$$

$$v'_x = v_x - v_{O'}, \qquad v'_y = v_y \qquad v'_z = v_z = 0$$

il moto è rettilineo uniforme, ma inclinazione e modulo della velocità sono diversi

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{v_y}{v_x}, \quad \operatorname{tg}\phi' = \frac{v'_y}{v'_x} = \frac{v_y}{v_x - v_{O'}},$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad v' = \sqrt{(v_x - v_{O'})^2 + v_y^2}$$



$$\overrightarrow{v_{WT}} = \overrightarrow{v_{WG}} - \overrightarrow{v_{TG}}$$





Le equazioni del moto della palla sono

$$x = x_0 + v_0 cos\theta t + v_{TG} t \qquad x' = x_0 + v_0 cos\theta t$$

$$y = y_0 \qquad y' = y_0$$

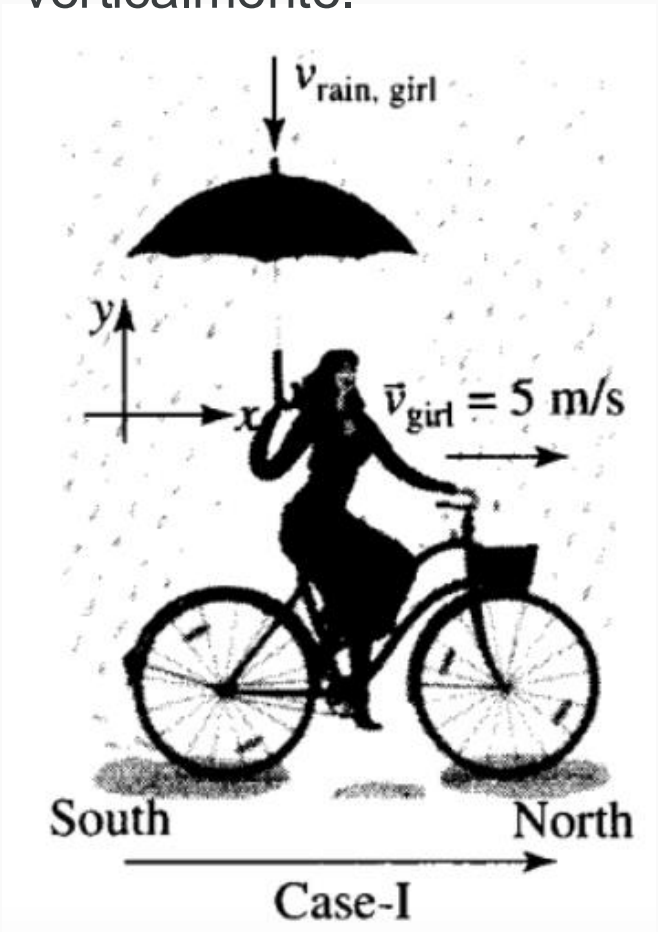
$$z = z_0 + v_0 sin\theta t - \frac{1}{2} g t^2 \qquad z' = z_0 + v_0 sin\theta t - \frac{1}{2} g t^2$$

$$\vec{v}(t) = \vec{v}' + \vec{v}_{O'}$$

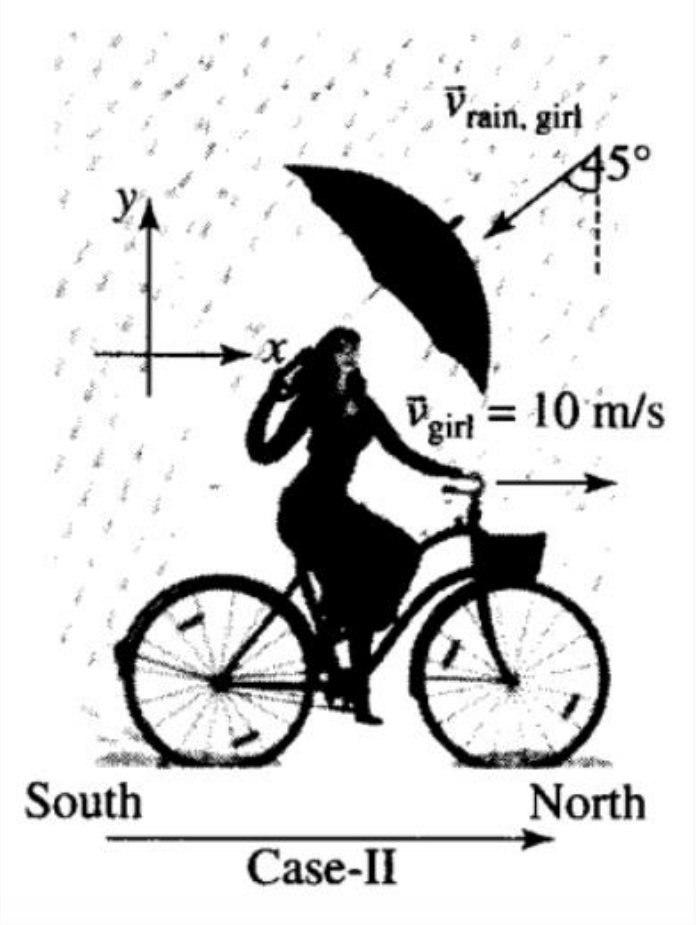
$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x' \\ v_y' \\ v_z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{TG} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Pioggia

Una ragazza pedalando in bici va a una velocità di 5 m/s in direzione Nord, osserva la pioggia cadere giù verticalmente.



Se aumenta la velocità fino a 10 m/s, la pioggia le appare caderle addosso a 45° rispetto la verticale.

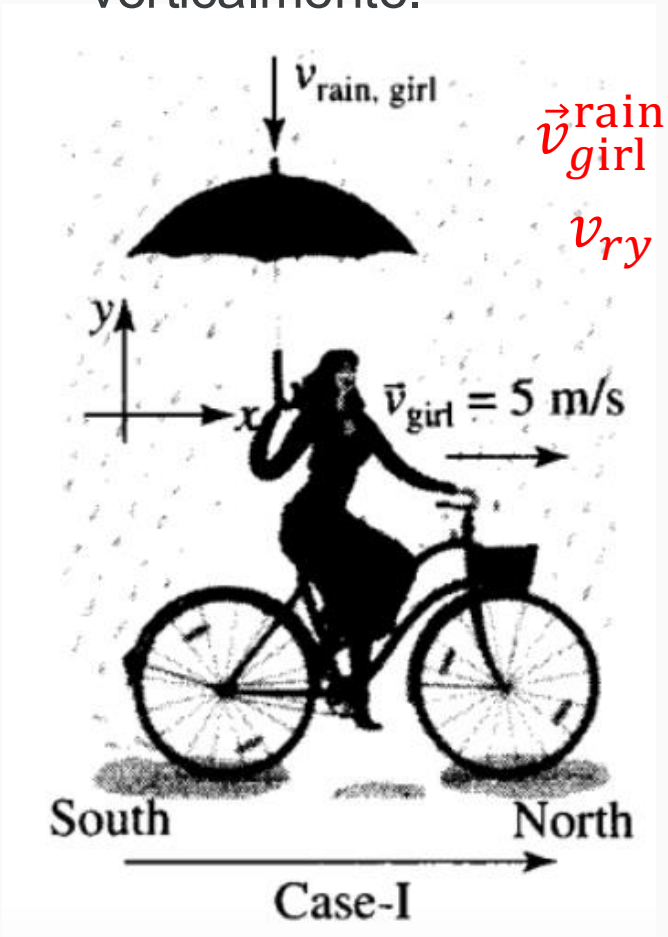


Che velocità ha la pioggia?

In che direzione cade la pioggia per un osservatore fermo sul marciapiede?

Pioggia

Una ragazza pedalando in bici va a una velocità di 5 m/s in direzione Nord, osserva la pioggia cadere giù verticalmente.



$\vec{v}_{girl}^{\,rain}$

v_{ry}

v_{rx}

v_{girl}

$v_{rx} - v_{ciclo,x} = 0$

$$\vec{v}(t) = \vec{v}' + \vec{v}_{O'}$$

$$\vec{v}_r^{\,\text{rain}} = \vec{v}_{girl}^{\,\text{rain}} + \vec{v}_{\text{ciclo}}$$

$$\vec{v}_{girl}^{\,\text{rain}} = \vec{v}_r^{\,\text{rain}} - \vec{v}_{\text{ciclo}}$$

$$\begin{pmatrix} v_{girl,x}^{rain} \\ v_{girl,y}^{rain} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{r,x}^{rain} - v_{ciclo,x} \\ v_{r,y}^{rain} \end{pmatrix}$$

r -- sistema di riferimento del marciapiede

$girl$ -- sistema di riferimento della ragazza

Caso I

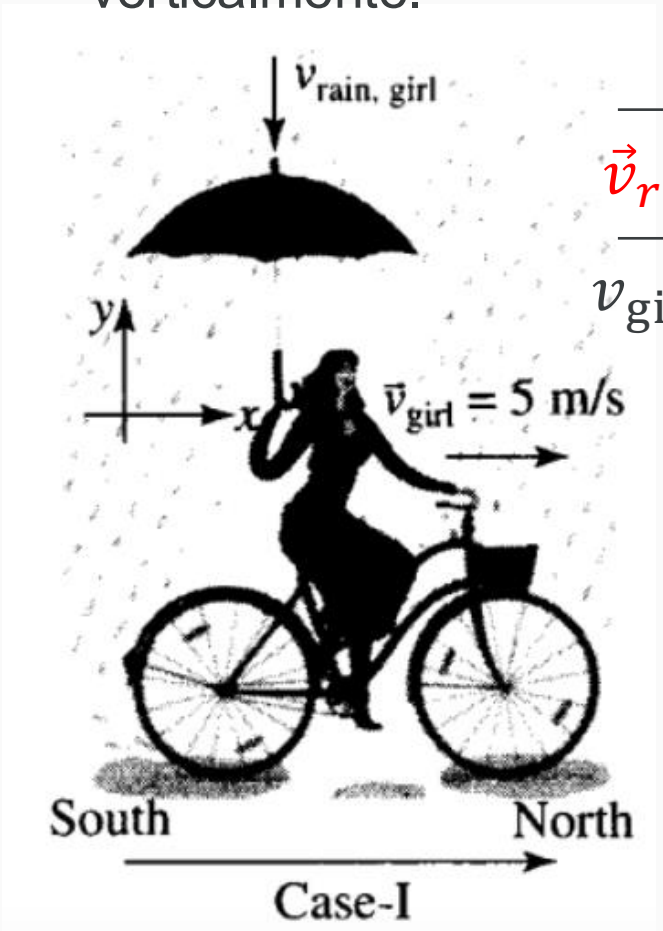
$$\vec{v}_{rain} = v_{rx}\hat{x} + v_{ry}\hat{y}$$

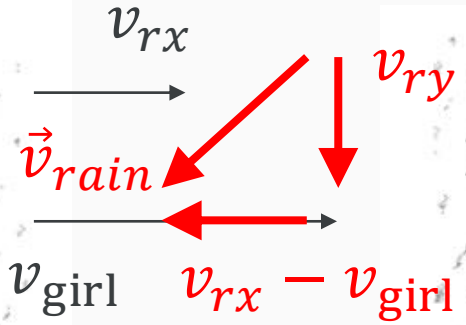
$$v_{rx} - v_{girl,x} = 0$$

$$v_{rx} = v_{girl,x} = 5\ m/s$$

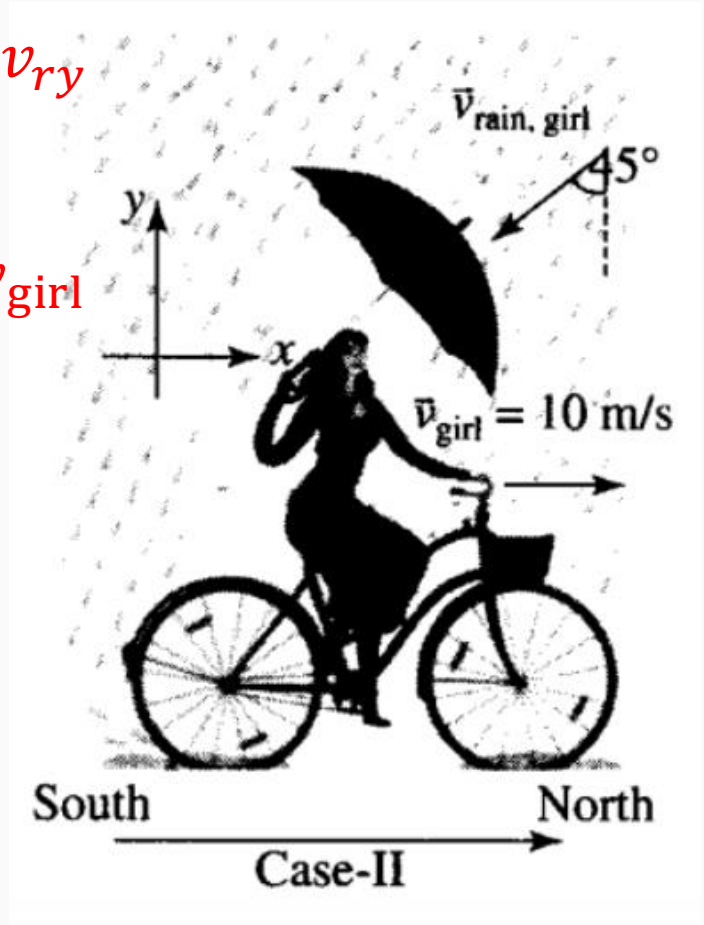
Pioggia

Una ragazza pedalando in bici va a una velocità di 5 m/s in direzione Nord, osserva la pioggia cadere giù verticalmente.





Se aumenta la velocità fino a 10 m/s, la pioggia le appare caderle addosso a 45° rispetto la verticale.



r -- sistema di riferimento del marciapiede

$girl$ -- sistema di riferimento della ragazza

Caso II

$$v_{ry} = (v_{rx} - v_{girl,x}) \tan(45°)$$
$$= -5\ m/s$$

$$|\vec{v}_{rain}| = \sqrt[2]{{v_{rx}}^2 + {v_{ry}}^2}$$
$$= \sqrt{2} \cdot 5\ m/s$$

Qual è la direzione del vento apparente?





Sistemi non inerziali – Forze apparenti

Supponiamo di avere ho un sistema inerziale S in cui quindi la velocità di un corpo varia solo se interagisce con un altro corpo

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

Definiamo ora un altro sistema di riferimento S' con moto accelerato rispetto al precedente. Si ottiene

$$\vec{F} = m\left(\vec{a}' + \vec{a}_{O'} + \vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}' + \frac{d\vec{\omega}}{dt}\times\vec{r}' + 2\vec{\omega}\times\vec{v}'\right)$$

$$\vec{F} = m\vec{a}' + m\vec{a}_t + m\vec{a}_c$$

Il moto accelerato del sistema di riferimento si traduce nella presenza di forze apparenti

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_t + \vec{F}_c \quad \Rightarrow$$

$$\vec{F}_t = -m\left(\vec{a}_{O'} + \vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}' + \frac{d\vec{\omega}}{dt}\times\vec{r}'\right)$$ *Forza di trascinamento*

$$\vec{F}_c = -2m\vec{\omega}\times\vec{v}'$$ *Forza di Coriolis*

Supponiamo di avere ho un sistema inerziale S in cui quindi la velocità di un corpo varia solo se interagisce con un altro corpo

$$\vec{F}$$

Definiamo ora un altro sistema di riferim
precedente. Si ottiene

$$\vec{F} = m\left(\vec{a}' + \vec{a}_{O'}\right.$$

$$\vec{F} = m\vec{a}' + m\vec{a}_t + m\vec{a}_c$$

Risulta evidente che le **forze apparenti** non derivano dalle interazioni fondamentali ma dal moto del sistema di riferimento e non esistono in un sistema di riferimento inerziale. Inoltre, esse sono **sempre proporzionali alla massa** del punto e vengono pertanto chiamate anche **forze di inerzia**.

Il moto accelerato del sistema di riferimento si traduce [illegible] presenza di forze apparenti

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_t + \vec{F}_c$$

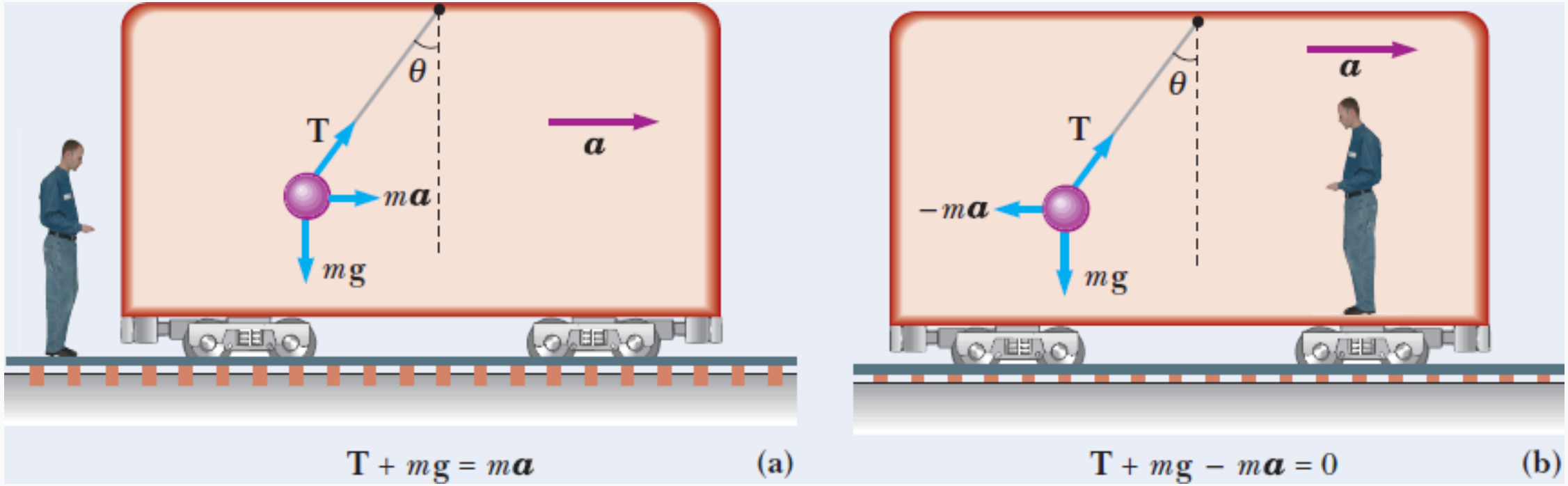
$$\vec{F}_t = -m\left(\vec{a}_{O'} + \vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}' + \frac{d\vec{\omega}}{dt}\times\vec{r}'\right)$$ *Forza di trascinamento*

$$\vec{F}_c = -2m\vec{\omega}\times\vec{v}'$$ *Forza di Coriolis*

Moto di trascinamento traslatorio rettilineo accelerato

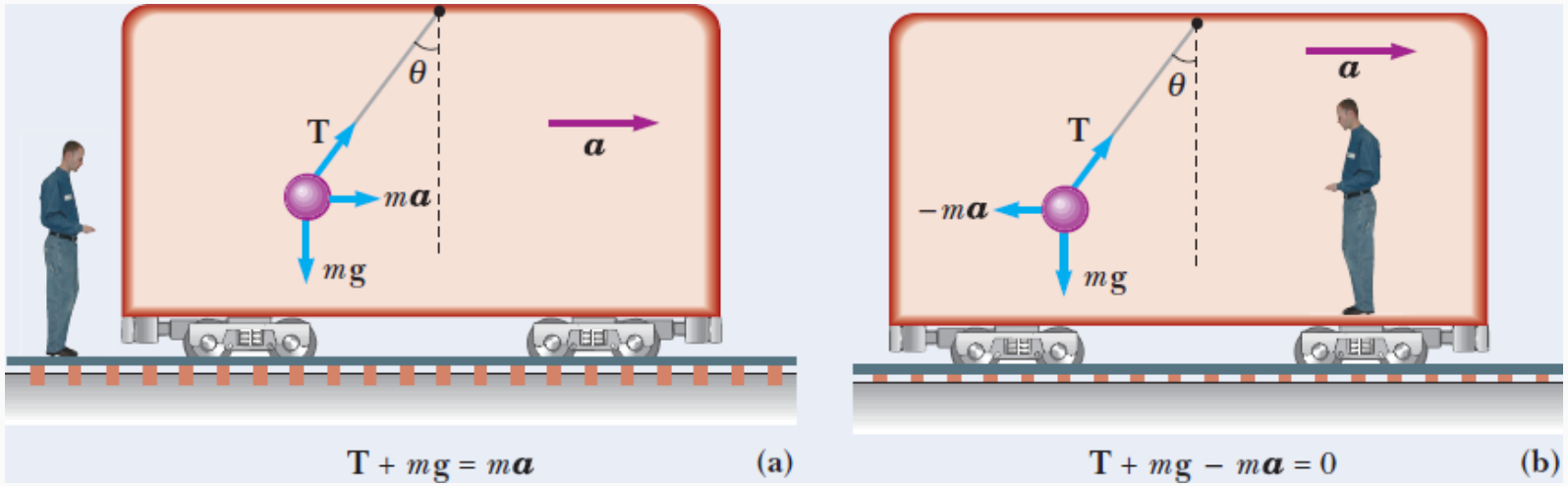
Una pallina di massa m è appesa tramite un filo al soffitto di un vagone. Quando il treno accelera con accelerazione a il filo si inclina formando un angolo θ con la verticale. Descrivere la situazione fisica vista da un osservatore iniziale O e da un osservatore O' situato sul vagone.

$$\vec{\omega} = 0$$



$\mathbf{T} + m\mathbf{g} = m\boldsymbol{a}$ (a)

$\mathbf{T} + m\mathbf{g} - m\boldsymbol{a} = 0$ (b)



$\vec{\omega} = 0$

Nel sistema O

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

$$T\cos\theta - mg = 0$$

$$T\sin\theta = ma$$

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_{O'}$$

Nel sistema O'

$$\vec{T} + m\vec{g} + \overrightarrow{F_{app}} = m\overrightarrow{a'} = 0$$

$$T\cos\theta - mg = 0$$

$$T\sin\theta - ma = 0$$

Moto di trascinamento rotatorio uniforme

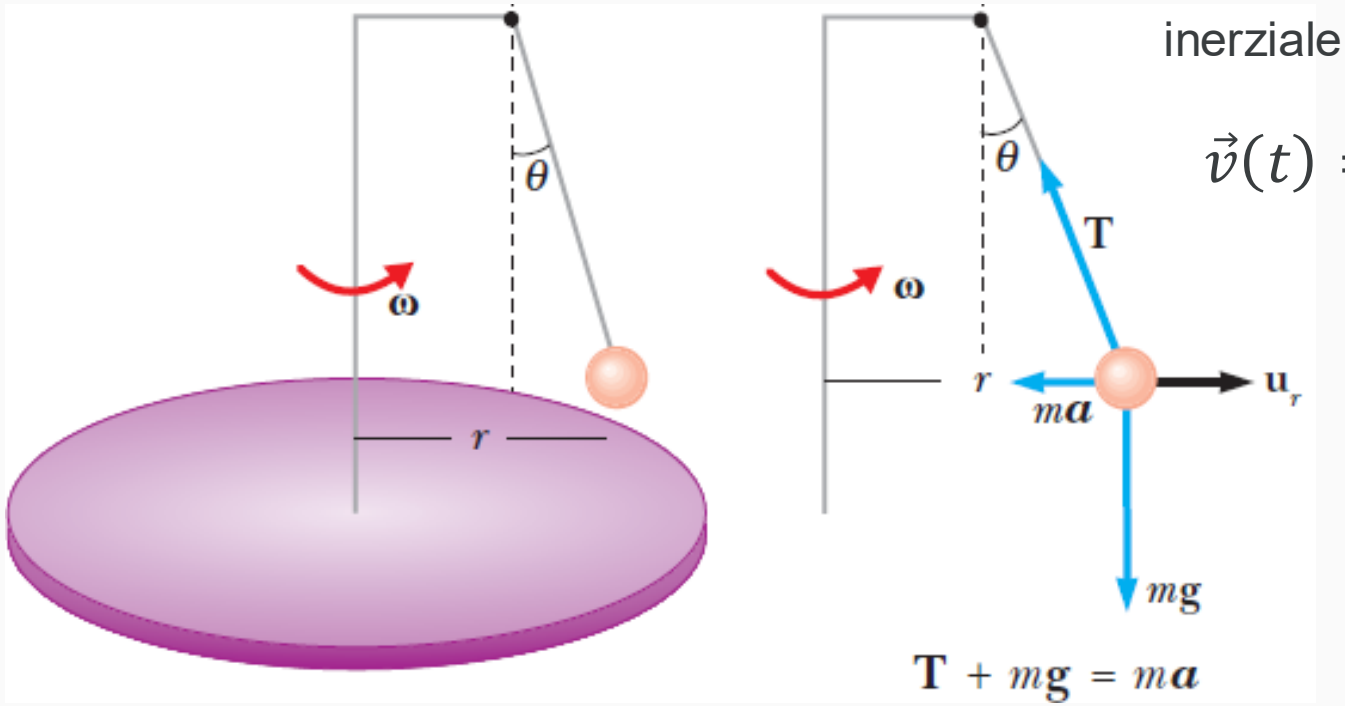
Filo a piombo su una piattaforma orizzontale ruotante attorno ad un asse con il punto di sospensione fuori dell'asse di rotazione → $\vec{v}' = 0$

$\vec{v}_{O'} = 0$

$\vec{a}_{O'} = 0$

$\vec{\omega} = costante$

$\vec{v}' = 0$



$$\vec{v}(t) = \cancel{\vec{v}'} + \vec{\omega}\times\vec{r}' = \vec{\omega}\times\vec{r}'$$

inerziale

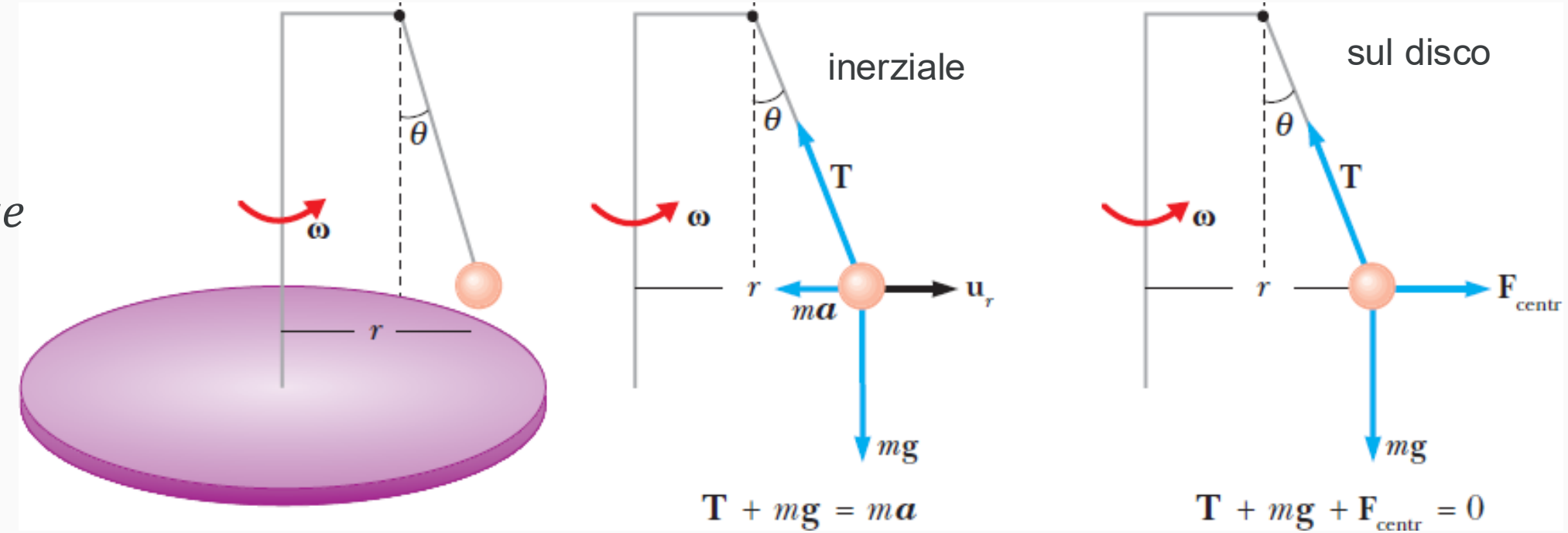
$$\vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a} = -m\omega^2 r\hat{u}_r \Rightarrow \begin{aligned} T\cos\theta - mg &= 0 \\ T\sin\theta &= ma = m\omega^2 r \end{aligned} \Rightarrow \tan\theta = \frac{\omega^2 r}{g}$$

Moto di trascinamento rotatorio uniforme

$\vec{v}_{O'} = 0$

$\vec{a}_{O'} = 0$

$\vec{\omega} = costante$



sul disco $\vec{T} + m\vec{g} = m(\cancel{\vec{a}'} + \vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}' + 2\vec{\omega}\times\cancel{\vec{v}'}) = m\vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}' = \vec{F}_{centr}$

$$\Rightarrow \begin{cases} T\cos\theta - mg = 0 \\ T\sin\theta - m\omega^2 r = 0 \end{cases} \Rightarrow \tan\theta = \frac{\omega^2 r}{g}$$

Moto di trascinamento rotatorio uniforme

$\vec{v}_{O'} = 0$

$\vec{a}_{O'} = 0$

$\vec{\omega} = costante$

$\vec{v} = cost \Rightarrow \vec{F} = 0$

In questo caso $\vec{v}(t) = \vec{v}' + \vec{\omega}\times\vec{r}'$

$\cancel{\vec{F}} = m(\vec{a}' + \vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}' + 2\vec{\omega}\times\vec{v}')$

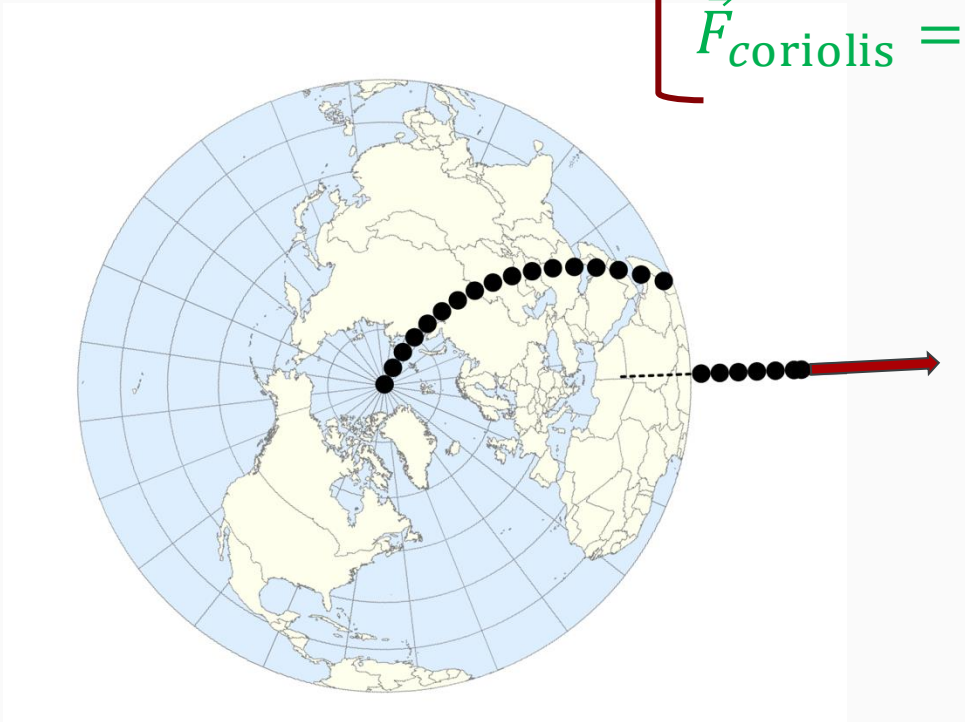
$\vec{F}_{\text{centr}} + \vec{F}_{coriolis} = m\vec{a}'$

$$\begin{cases} \vec{F}_{\text{centr}} = -m\vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}' \\ \vec{F}_{coriolis} = -2m\vec{\omega}\times\vec{v}' \end{cases}$$

Forza di Coriolis

https://javalab.org/en/coriolis_effect_en/

$\vec{r} = \vec{v}t = vt\hat{u}_r$



Proiettiamo lungo gli assi le forze apparenti

$$\vec{F}_{coriolis} = -2m\vec{\omega}\times\vec{v}' = +2m\omega\dot{y}'\hat{u}_{x'} - 2m\omega\dot{x}'\hat{u}_{y'}$$

$$\vec{\omega}\times\vec{v}' = det\begin{pmatrix} \hat{u}_{x'} & \hat{u}_{y'} & \hat{u}_{z'} \\ 0 & 0 & \omega \\ \dot{x}' & \dot{y}' & 0 \end{pmatrix} = -\omega\dot{y}'\hat{u}_{x'} + \omega\dot{x}'\hat{u}_{y'}$$

$$\vec{F}_{centr} = -m\vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}'$$

$$\vec{\omega}\times\vec{r}' = \det\begin{pmatrix} \hat{u}_{x'} & \hat{u}_{y'} & \hat{u}_{z'} \\ 0 & 0 & \omega \\ x' & y' & 0 \end{pmatrix} = -\omega y'\hat{u}_{x'} + \omega x'\hat{u}_{y'}$$

$$\vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}' = \det\begin{pmatrix} \hat{u}_{x'} & \hat{u}_{y'} & \hat{u}_{z'} \\ 0 & 0 & \omega \\ -\omega y' & \omega x' & 0 \end{pmatrix} = -\omega^2 x'\hat{u}_{x'} - \omega^2 y'\hat{u}_{y'}$$

Leggi del moto

$$\ddot{x}' - 2\omega\dot{y}' - \omega^2 x' = 0$$

$$\ddot{y}' + 2\omega\dot{x}' - \omega^2 y' = 0$$

Condizioni iniziali

$$x' = y' = 0$$

$$\dot{x}' = v_{ox}\,;\dot{y}' = 0$$

Si risolve combinando le due equazioni nel campo complesso $\alpha = x' + iy'$

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} + \mathrm{i}\, 2\omega\dot{\alpha} - \omega^2\alpha = 0 \\ \alpha = 0 \\ \dot{\alpha} = v_{ox} \end{cases}$$

Le radici del polinomio associato sono $\alpha = -i\omega \pm \sqrt{-\omega^2 + \omega^2} = -i\omega$

$$\alpha(t) = (A + Bt)e^{-\mathrm{i}\omega t}$$

$$\alpha(0) = A = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha(t) = Bte^{-\mathrm{i}\omega t}$$

$$\dot{\alpha}(\mathrm{t}) = B(1 - i\omega t)e^{-\mathrm{i}\omega t}$$

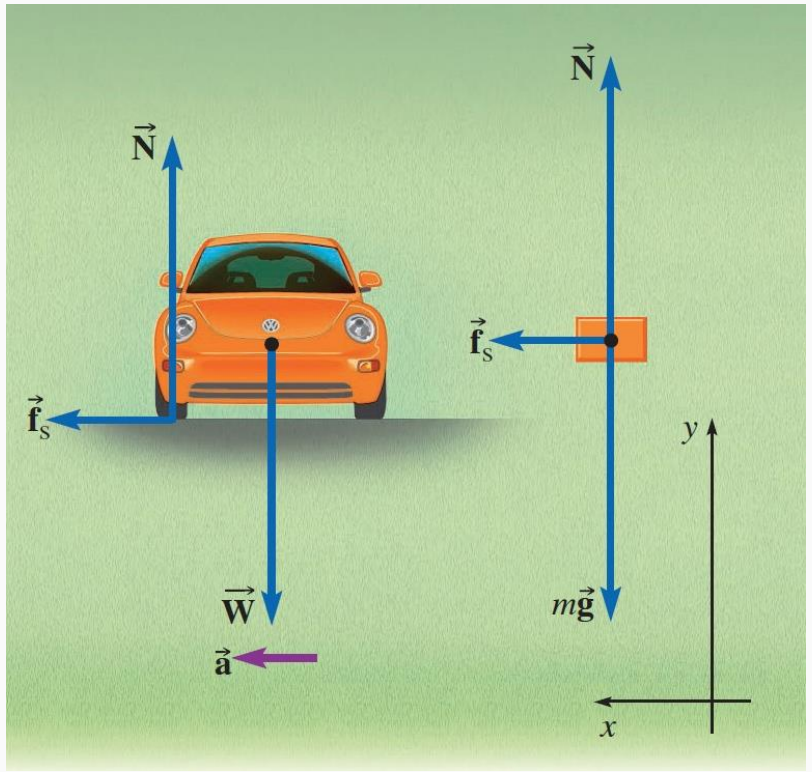
$$\dot{\alpha}(0) = B = v_{ox} \quad \Rightarrow \quad \alpha(t) = v_{ox}te^{-\mathrm{i}\omega t} = v_{ox}t(\cos\omega t + i\,\sin\omega t)$$

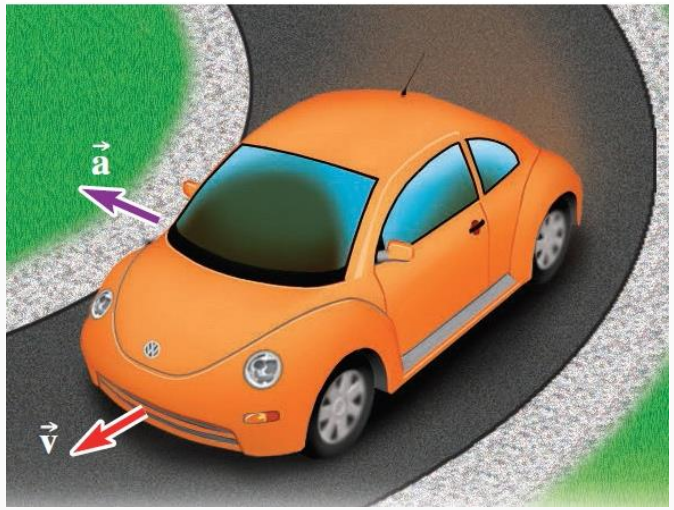
$$x'(t) = v_{ox}t\,\cos\omega t$$

$$y'(t) = v_{ox}t\,sin\omega t$$

Curve non sopraelevate

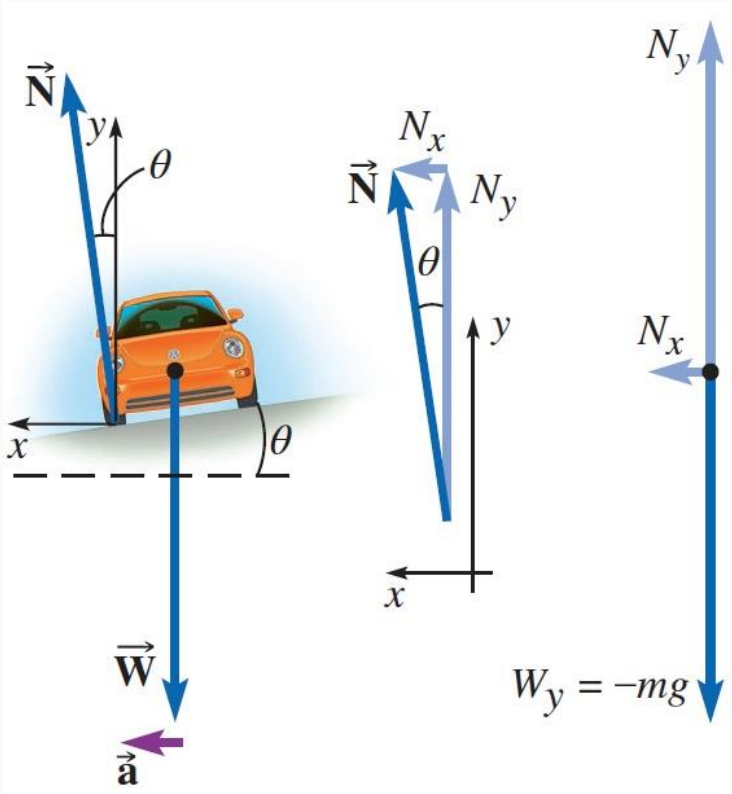
Unbanked





Come percepisce il passeggero la curva nei due casi?

Banked



Centrifuge

Certifications/Compliance	CE, ROHS, WEEE
Controller Type	Touchscreen Interface
Dimensions (HWD)	36.6 x 27.6 x 31.7 in. (93.0 x 70.0 x 80.5cm)
Net Weight	658 lb. (299kg)
Program Storage	120 programs with alpha-numeric naming
Standards	IEC 61010-2-020 2nd Ed. or later
Temperature Range	-10° to +40°C
Capacity	4 x 1000mL
Type	Superspeed centrifuge
Max. Speed	24,000 rpm
Max. RCF	68,905 x g
Refrigerated	Yes
Noise Level	<59dBA
Description	Sorvall LYNX 4000 Superspeed Centrifuge

$\omega \quad m/s$

$a_r = \omega^2 r \quad m/s^2$

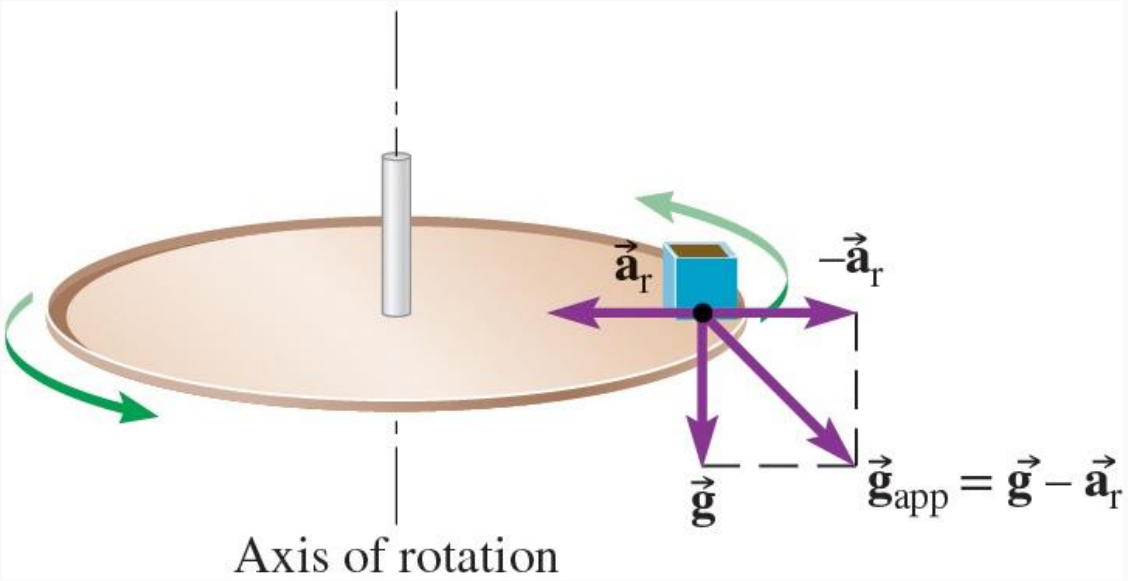


Exercise

Un biologo sta studiando la crescita delle piante e vuole simulare un campo gravitazionale due volte più forte di quello terrestre.

Posiziona le piante su una tavola rotante orizzontale nel suo laboratorio sulla Terra a una distanza di 12.5 cm dall'asse di rotazione.

Quale velocità angolare darà alle piante un campo gravitazionale apparente $\vec{g}$ la cui grandezza è 2.0 g ?



Soluzione

Strategia Usa $a_t = \omega^2 r$ per trovare la velocità angolare richiesta. Il campo gravitazionale apparente totale è uguale alla somma vettoriale dell'intensità del campo gravitazionale e dell'accelerazione radiale.

Soluzione Calcola la velocità angolare.

$$g_{app}^2 = a_{\mathrm{r}}{}^2 + g^2 = \omega^4 r^2 + g^2, \text{ so } \omega^4 r^2 = g_{app}^2 - g^2, \text{ or}$$

$$\omega = \left(\frac{g_{app}^2 - g^2}{r^2} \right)^{1/4} = \left(\frac{4.0 g^2 - g^2}{r^2} \right)^{1/4} = \left[\frac{3.0(9.80 \text{ m/s}^2)^2}{(0.125 \text{ m})^2} \right]^{1/4} = \boxed{12 \text{ rad/s}}.$$

Conclusioni

Un **sistema inerziale** è un sistema in cui un corpo non soggetto a forze (che non interagisce con altri corpi) o è in quiete o si muove di moto rettilineo uniforme.

I sistemi inerziali sono tra di loro o in quiete o si muovono di moto rettilineo uniforme e il moto dei corpi è descritto dalle stesse leggi fisiche.

Questa **invarianza delle leggi** fisiche deriva dal fatto che non ho un punto privilegiato dello spazio: lo **spazio appare omogeneo e isotropo**.

Se un sistema di riferimento si muove con **moto accelerato** rispetto ad uno inerziale appaiono delle **forze apparenti**

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

Traslazione O'

Accelerazione centripeta dovuta alla rotazione di O'

Accelerazione tangenziale dovuta alla rotazione di O'

Accelerazione di Coriolis