„Piękne rzeczy wypracować można dzięki długiej i uciążliwej nauce, złe natomiast owocują same bez trudu.”

Demokryt z Abdery

Wykład 6.

6.1. Inercjalne układy odniesienia. Transformacja Galileusza.

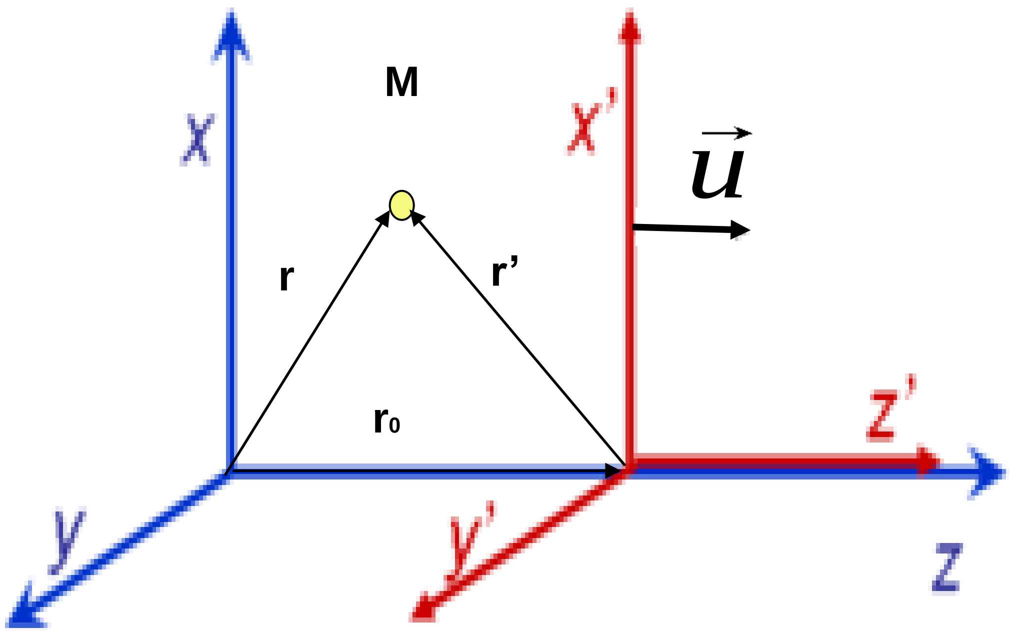
6.2. Siły w układach nieinercjalnych.

Rys. źródło: https://slideplayer.pl/slide/413623/

6.1. TRANSFORMACJA GALILEUSZA

Prawa Newtona są słuszne jedynie w układach inercjalnych.

Założenie: Dwa układy odniesienia (rys.), z których jeden (x,y,z) jest nieruchomy, a drugi (x',y',z') porusza się ruchem postępowym z prędkością $\vec{u} = const$. W chwili $t = 0$ początki obu układów się pokrywają



- Związek między położeniem punktu materialnego w obu układach:

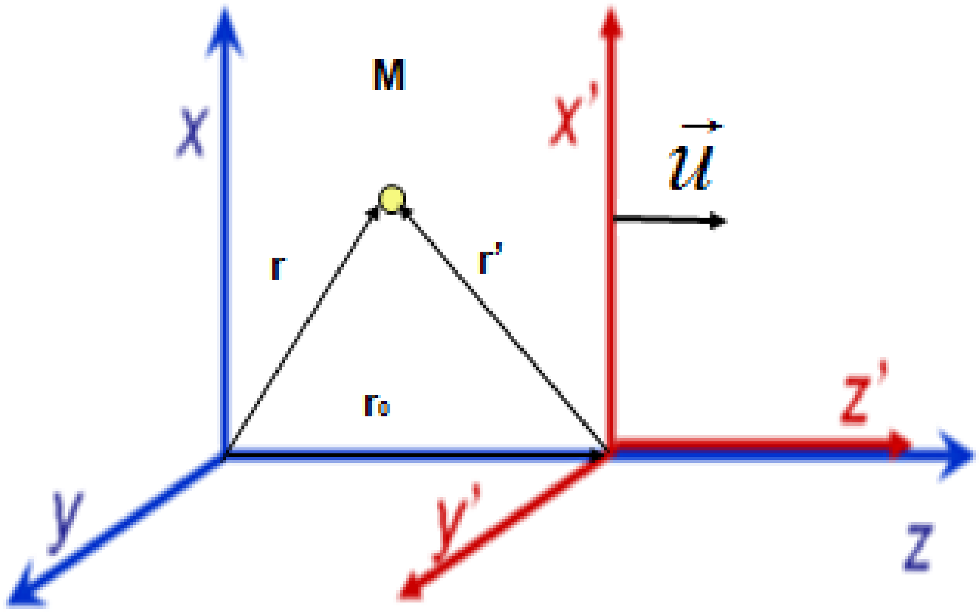
$$\boxed{\vec{r} = \vec{r}\,' + \vec{u}t}$$

Transformacja Galileusza.

$$\begin{cases} x = x' \\ y = y' \\ z = z' + v \cdot t \\ t = t' \end{cases}$$

Zakładamy, że czas mierzony w obu układach jest taki sam.

Równania transformacyjne związane z przekształceniem Galileusza:



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

Stąd :

$$\boxed{\vec{F} = \vec{F}\,'}$$

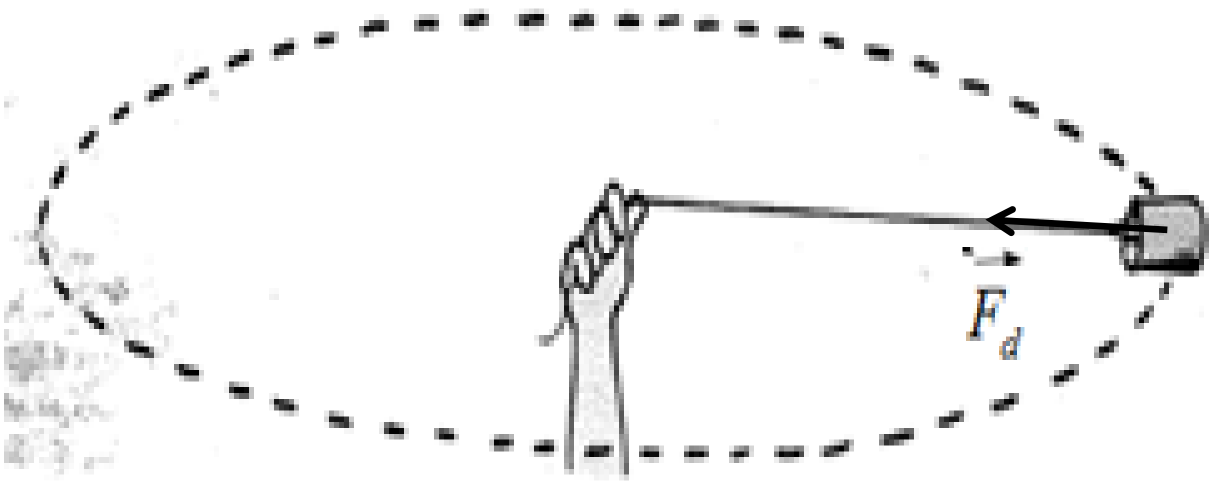
Równania Newtona dla punktu materialnego (układów punktów materialnych) są jednakowe we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.
Są to tzw. niezmienniki przekształcenia Galileusza.

W mechanice klasycznej przyjmuje się również, że masa *m* poruszającego się ciała nie zależy od jego prędkości.

Ciało poruszające się po torze kołowym, jak na przykład puszka (rys.), musi posiadać przyspieszenie, ponieważ ciągle zmienia się kierunek wektora jego prędkości. Każda siła wypadkowa wywołująca jednostajny ruch po okręgu nazywana jest **siłą dośrodkową** $\vec{F}_d$.

Siła dośrodkowa $\vec{F}_d$ jest niezbędna, aby zakrzywić tor ruchu.

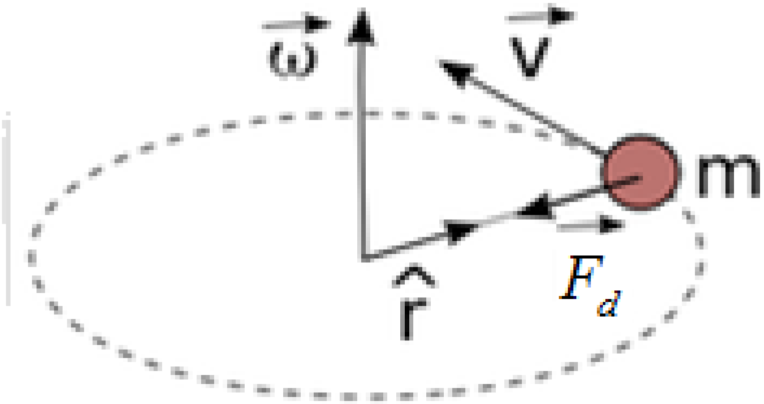
Co jest źródłem siły dośrodkowej (rys.) ?



Rys. **W inercjalnym układzie odniesienia, s**iłą działającą na puszkę jest **siła dośrodkowa** (pomijamy tu siłę ciężkości), skierowana do środka okręgu. Siłę dośrodkową wywierają mięśnie naszej ręki za pośrednictwem napiętego sznurka.

SIŁA DOŚRODKOWA

Siła dośrodkowa – nadaje ciału przyspieszenie, zmieniając kierunek prędkości ciała bez zmiany wartości prędkości. Siła dośrodkowa powoduje zakrzywienie toru ruchu ciała, skierowana jest wzdłuż normalnej (prostopadle) **do toru, w stronę środka jego krzywizny.**



Siła dośrodkowa (F_d) w ruchu po okręgu.

siła dośrodkowa - działająca do środka okręgu i utrzymująca ciało w ruchu po okręgu

$$\boxed{\vec{F}_{\text{dośr}} = m\,\vec{a}_{\text{dośr}}}$$

przyspieszenie dośrodkowe

prędkość liniowa ciała

wartość siły dośrodkowej

$$\boxed{F_{\text{dośr}} = m\frac{v^2}{R} = m\,\omega^2 R}$$

prędkość kątowa ciała w ruchu po okręgu

promień okręgu

Wiele sił może pełnić rolę siły dośrodkowej, np. siła naprężenia, grawitacji, tarcia.

Przykład 1- siła dośrodkowa

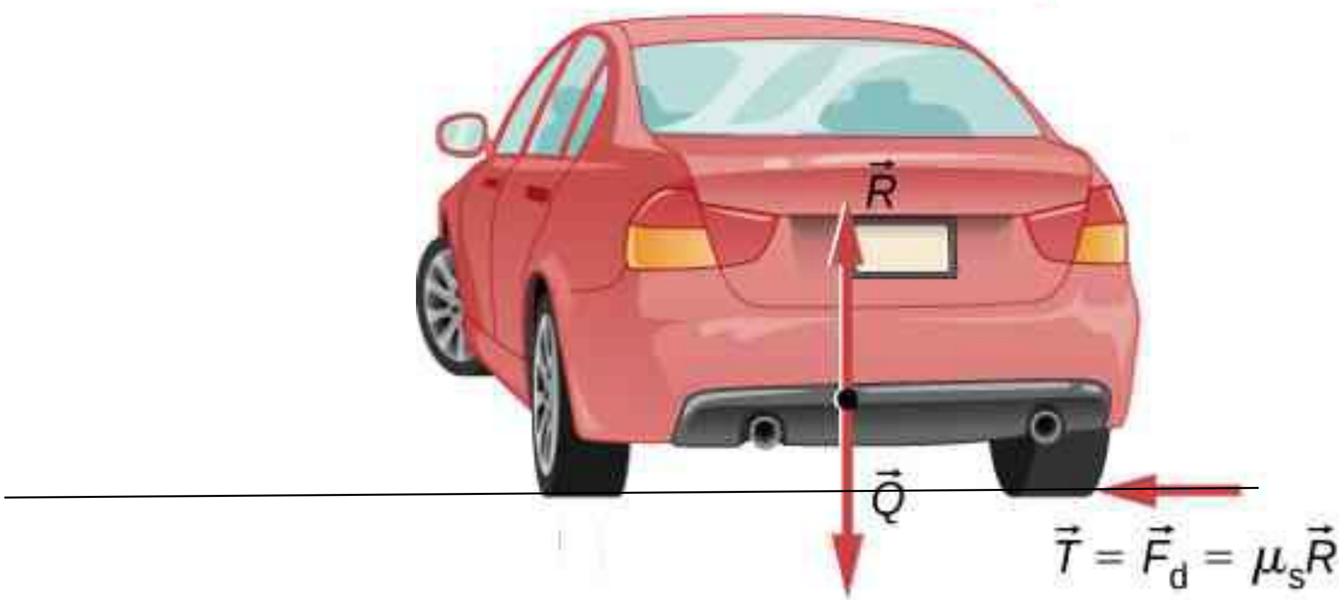
(a) Oblicz siłę dośrodkową wywieraną na auto o masie 900 kg, które pokonuje zakręt o promieniu krzywizny 500 m z prędkością 25 m/s.

(b) Zakładając, że zakręt jest płaski, oblicz minimalny współczynnik tarcia statycznego pomiędzy oponami i drogą, aby auto nie wpadło w poślizg .

Dane:
m= 900 kg
R=500 m
v= 25 m/s

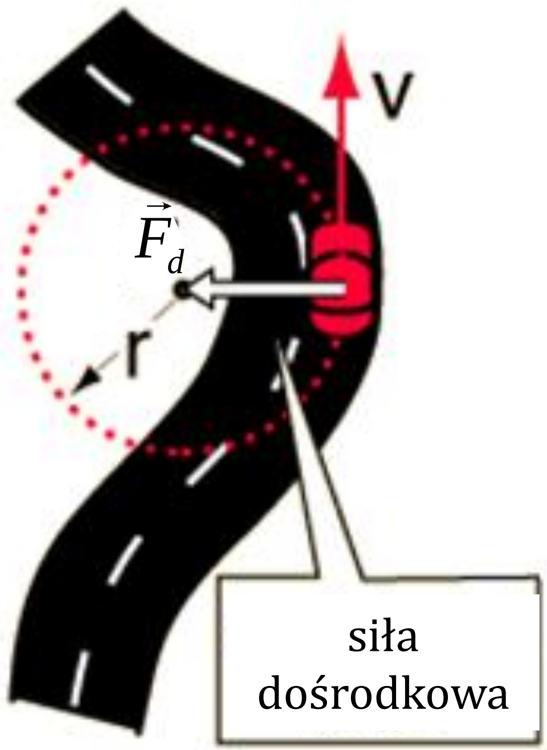
Szukane:
a) F_d =?

b) μ=?

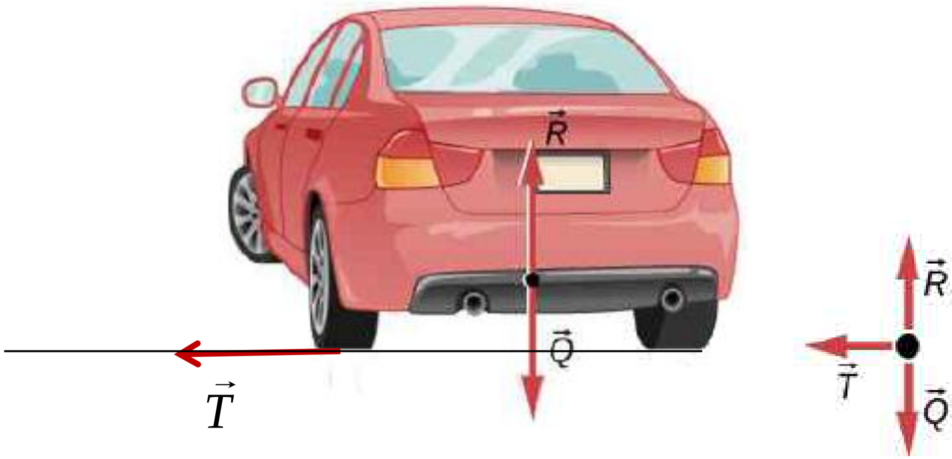


Przykład 1- rozwiązanie ad. (a)

Na samochód (rys.) działają w kierunkach prostopadłych do jego prędkości trzy siły:



Rys. Samochód skręca w lewo na płaskiej powierzchni.



w. : $\vec{F}_w = \vec{Q} + \vec{R} + \vec{T}$

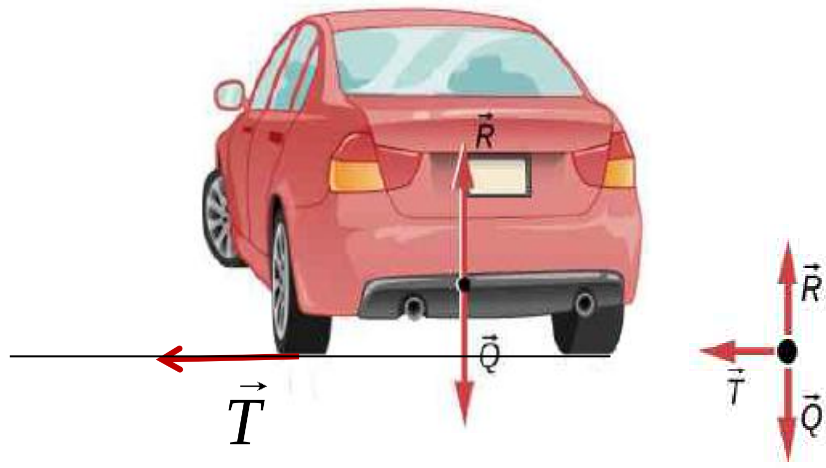
$$\vec{F}_w \equiv \vec{F}_d$$

s. : $F_d = T$

$$F_d = \frac{m \cdot v^2}{R} \Rightarrow F_d = \frac{900kg \cdot \left(25\,\tfrac{m}{s}\right)^2}{500m} = \underline{1125\ N}$$

Przykład 1- rozwiązanie ad. (b)

Siła dośrodkowa równa jest sile tarcia, zatem:



$$F_d = T$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = \mu \cdot N,$$

$$\textit{ponieważ} \quad \left|\vec{N}\right| = \left|\vec{R}\right|, \quad \textit{oraz} \quad \left|\vec{R}\right| = \left|\vec{Q}\right|$$

$$\textit{a zatem}: \quad \frac{m \cdot v^2}{R} = \mu \cdot mg$$

$$\textit{czyli} \qquad \mu = \frac{v^2}{R \cdot g} \Rightarrow \underline{\mu = 0{,}13}$$

Rys. Potrzebny jest odpowiednio duży współczynnik tarcia, aby samochód nie wypadł z drogi,

Znaczenie:

- Większy współczynnik tarcia pozwoliłby na pokonanie zakrętu z większą prędkością.
- współczynnik tarcia nie zależy od masy, co oznacza, że pokonanie zakrętu bez poślizgu na płaskiej powierzchni nie będzie zależne od tego, jak ciężkie jest auto. Nieco inaczej sytuacja wygląda w przypadku, gdy zakręt jest nachylony a nie płaski. Wówczas siła normalna będzie mniejsza.

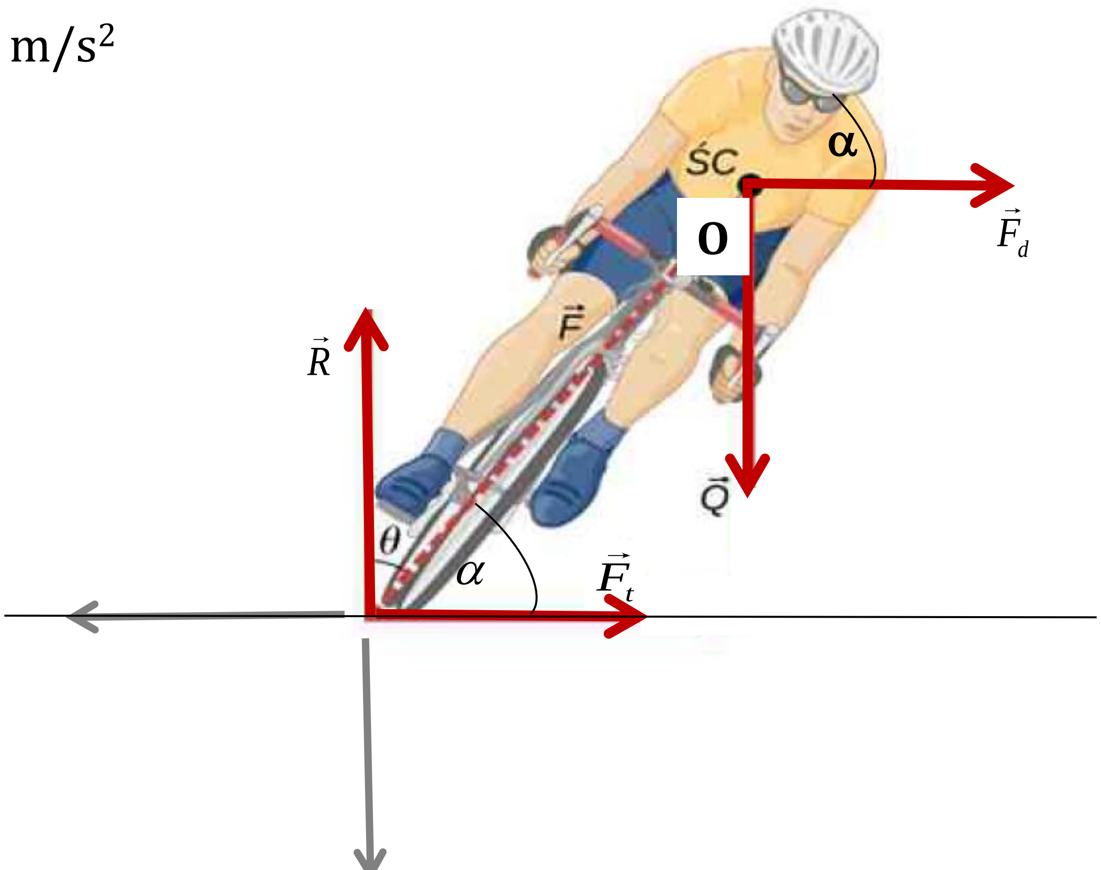
Przykład 2 - kolarz

Kolarz, poruszający się po okręgu o promieniu r jest nachylony ku środkowi okręgu, tworząc z powierzchnią toru kąt α. Współczynnik tarcia opon roweru o nawierzchnie drogi wynosi μ. Z jaką szybkością porusza się kolarz?

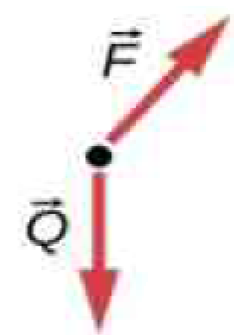
I sp. Rozpatrujemy działanie sił na kolarza w układzie nieruchomym (związanym z drogą).

Dane:
μ, r, α
g= 9,81 m/s^2

Szukane:
(a) v=?



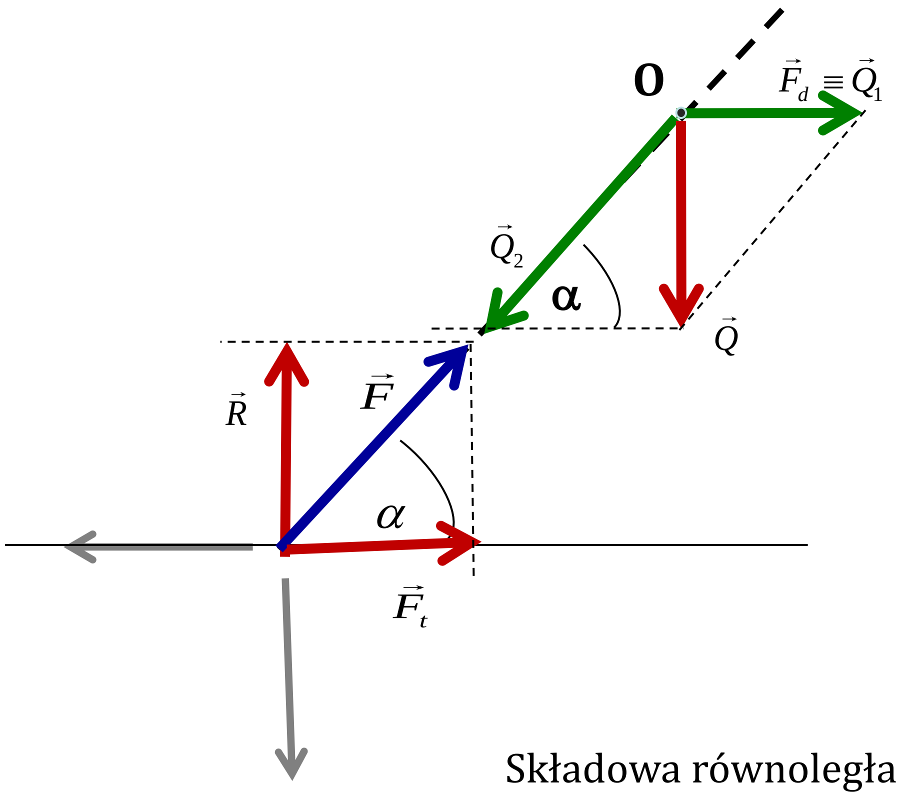
Rozkład sił



Przykład 2 – kolarz

Na kolarza (wraz z rowerem) działają trzy siły:

w. : $$\vec{F}_w = \vec{Q} + \vec{R} + \vec{F}_t$$



Siłę ciężkości Q rozkładamy na dwie składowe: Równoległą do poziomu (Q_1) i równoległą do roweru (Q_2).

Składowa pozioma jest właściwie siłą dośrodkową:

$$\left|\vec{Q}_1\right| \equiv \left|\vec{F}_d\right| = \frac{mv^2}{r} \qquad (1)$$

z rys.: $$ctg\alpha = \frac{\left|\vec{Q}_1\right|}{\left|\vec{Q}\right|} \Rightarrow Q_1 = mgctg\alpha \qquad (2)$$

Składowa równoległa wynosi (rys.).: $$sin\alpha = \frac{\left|\vec{Q}\right|}{\left|\vec{Q}_2\right|} \Rightarrow Q_2 = \frac{Q}{sin\alpha}$$

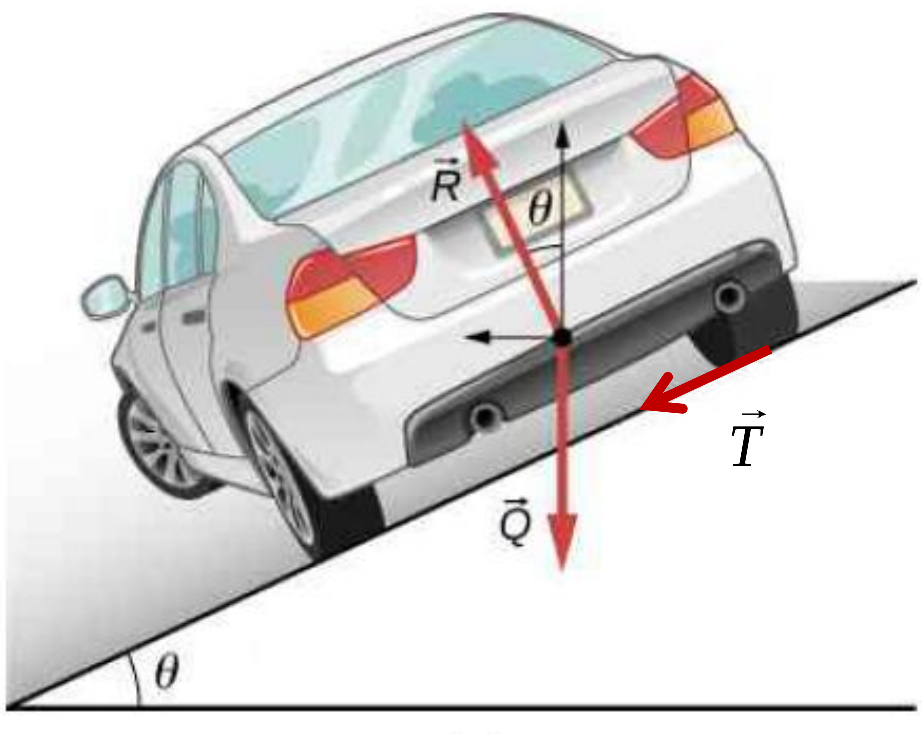
Składowa $\vec{Q}_2$ jest równoważona przez siłę $\vec{F} = \vec{R} + \vec{F}_t$.

W ruchu stabilnym po okręgu składowa pozioma siły ciężkości musi być równa sile dośrodkowej. Porównując (1) i (2):

$$m\frac{v^2}{r} = mgctg\alpha \Rightarrow \boxed{v = \sqrt{rg \cdot ctg\alpha}.}$$

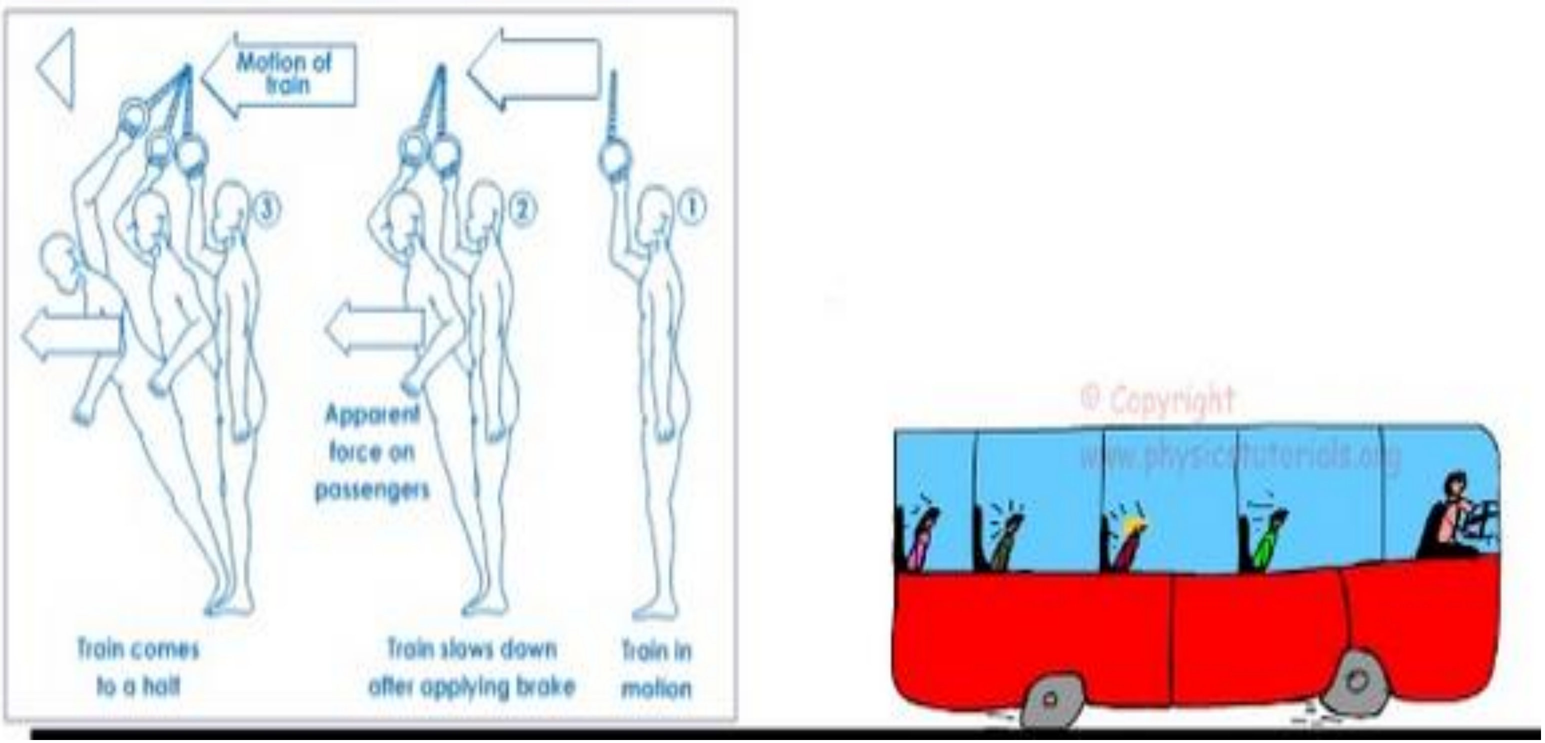
Zadanie* – profilowany zakręt (samodzielnie :)

Samochód o masie 900 kg pokonuje zakręt z prędkością 60 km/h.
Znajdź kąt pochylenia drogi w przypadku wyprofilowanego zakrętu (rys.), jeżeli współczynnik tarcia kół o nawierzchnię drogi wynosi 0,4, a promień krzywizny zakrętu jest równy 300 m



6.2. UKŁADY NIEINERCJALNE

Co mają ze sobą wspólnego: hamujący autobus, pokonywanie zakrętu samochodem, jazda na karuzeli oraz ruch obrotowy Ziemi?



Rys. Gdy autobus nagle zatrzymuje się, pasażerowie podskakują do przodu.
Rys. źródło; https://www.slideshare.net/vyvianleow/inertia-31388790

Układy nieinercjalne, to takie , które przyspieszają względem inercjalnego układu odniesienia.

UKŁADY NIEINERCJALNE

<u>Układem nieinercjalnym</u> nazywamy taki układ odniesienia, który porusza się ruchem przyspieszonym (lub opóźnionym) względem inercjalnego układu.

- Ziemia **<u>nie</u> jest układem inercjalnym.** Wykonuje ruch obrotowy wokół swej osi, a ponadto obiega Słońce po elipsie.

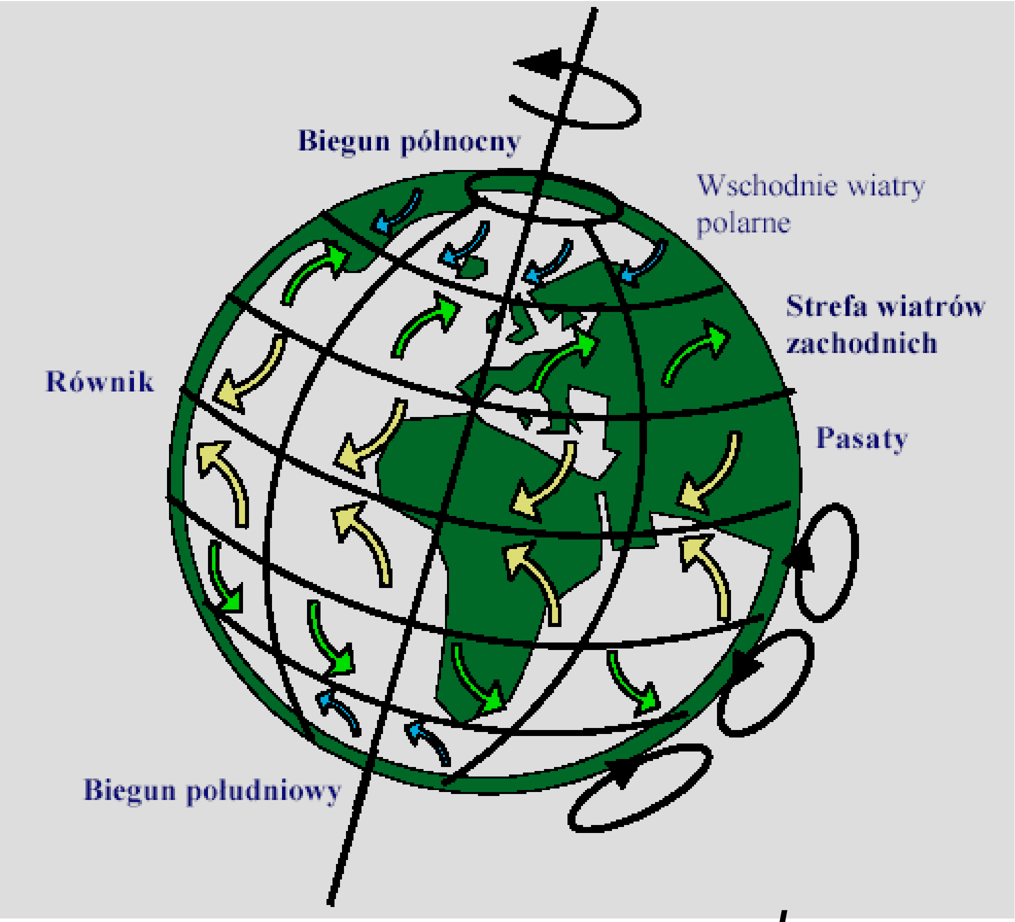
- W pewnych przypadkach można jednak zaniedbać efekty nieinercjalności układu odniesienia, związanego z Ziemią.

- Fizycy jednak odnoszą się do Ziemi jako do układu inercjalnego; dokonują takiego wyboru, ponieważ Ziemia jest niemal inercjalnym układem odniesienia, w którym wszystkie siły mają zidentyfikowane pochodzenie fizyczne. W takim układzie odniesienia zasady dynamiki Newtona są spełnione.

Czy te same prawa rządzą we wszystkich układach odniesienia?

Jak wytłumaczyć w nieinercjalnym układzie odniesienia istniejące zjawiska:

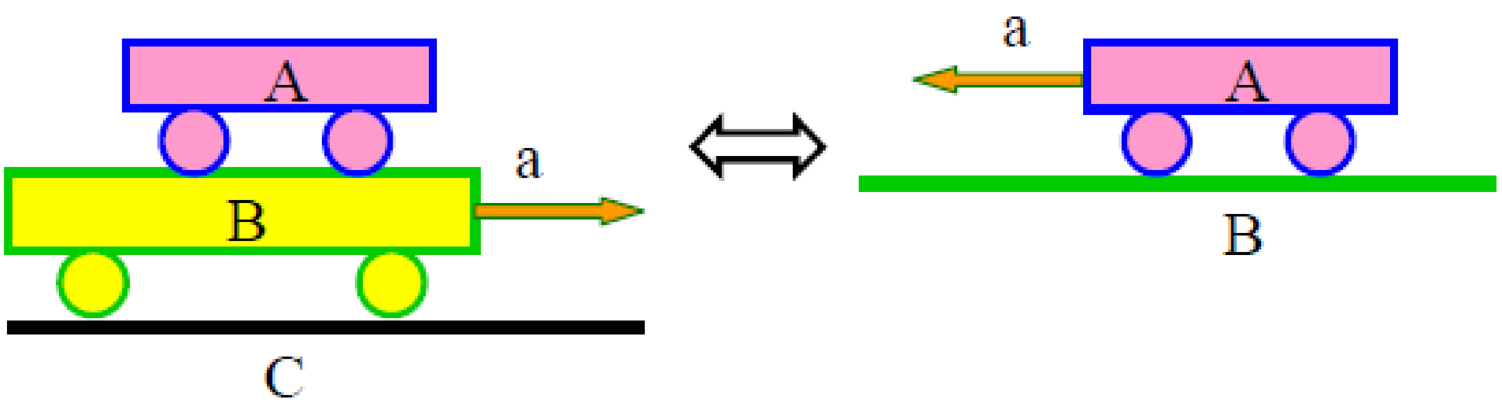
- „skręcenie” kierunku wiatrów w niżach i wyżach na obu półkulach**?**
- odchylanie się na wschód ciał swobodnie spadających **?**
- podmywanie jednego z brzegów rzek płynących wzdłuż południków**?**
- obrót płaszczyzny wahań wahadła Foucaulta **?**



Rys. źródło: https://slideplayer.pl/slide/413623/

Jakie siły działają w nieinercjalnych układach odniesienia ?

Na **wózek A** (rys.) nie działa żadna siła, więc **jest nieruchomy** względem podłoża **C**



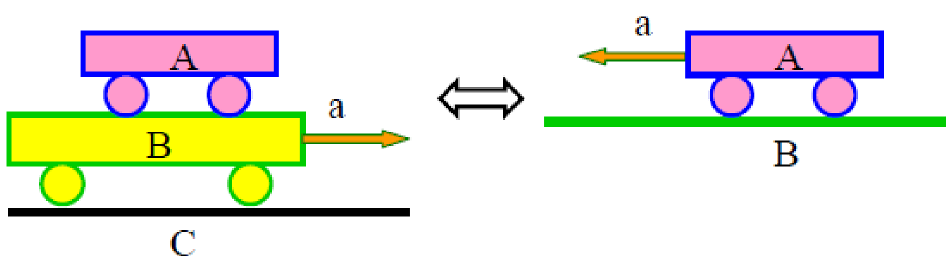
Rys., źródło: Fizyka I ,M. A.Karpierz

Natomiast **względem przyspieszającego wózka B porusza się** z przyspieszeniem **−a**.

A**nalizując ruch wózka A względem B**, wózek ten zachowuje się tak, jakby na niego działała siła o kierunku przeciwnym do kierunku przyspieszenia układu, której źródła nie jesteśmy w stanie wskazać; nie mająca fizycznego pochodzenia (jest spowodowana bezwładnością wózka, a nie fizyczną przyczyną).

Wózek A porusza się z przyspieszeniem, pomimo, że nie działa na niego żadna siła

SIŁA BEZWŁADNOŚCI (w ruchu prostoliniowym)



Rys. źródło: Fizyka I ,M. A.Karpierz

Na każde ciało znajdujące się w układzie nieinercjalnym działa siła bezwładności:

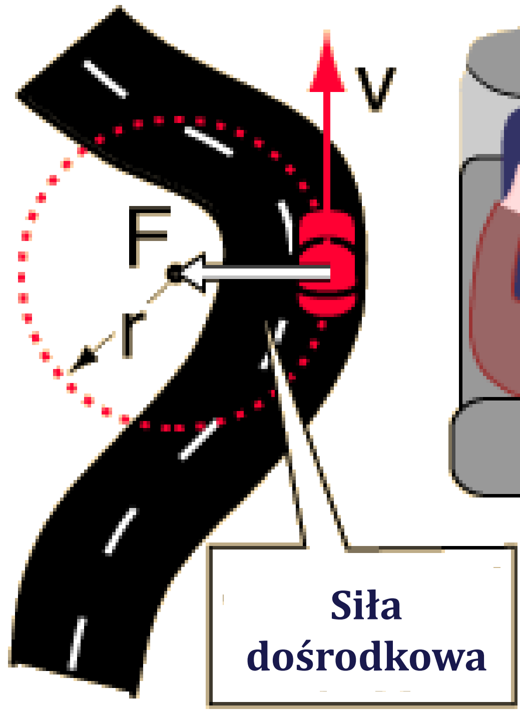
$$\boxed{\vec{F}_{bezw} = -m \cdot \vec{a}_{ukadu}}$$

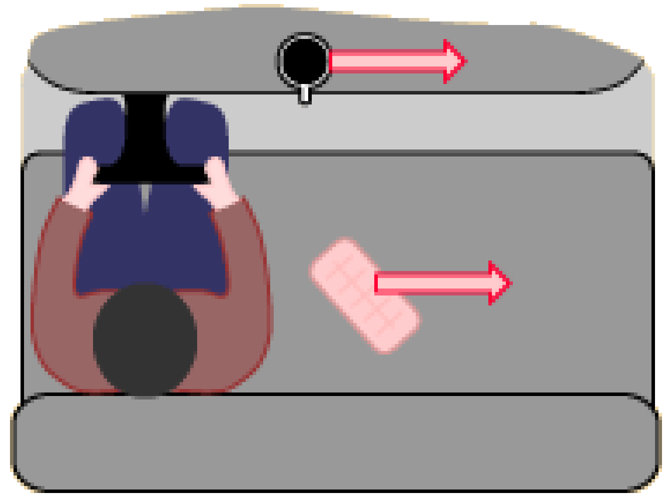
gdzie: $\vec{F}_{bezw} \equiv \vec{F}_0$, to siła bezwładności, bo jej wartość zależy od masy (m) bezwładnej ciała. Siła ta występuje tylko w układzie przyspieszającym (układzie związanym z wózkiem B).

Siła bezwładności (lub tzw. siła pozorna):

- **nie ma związku z oddziaływaniami;**
- **pojawia się jako skutek nieinercjalności układu odniesienia;**
- **może wywierać skutki analogiczne, jak siły rzeczywiste.**

Siła bezwładności - przykłady



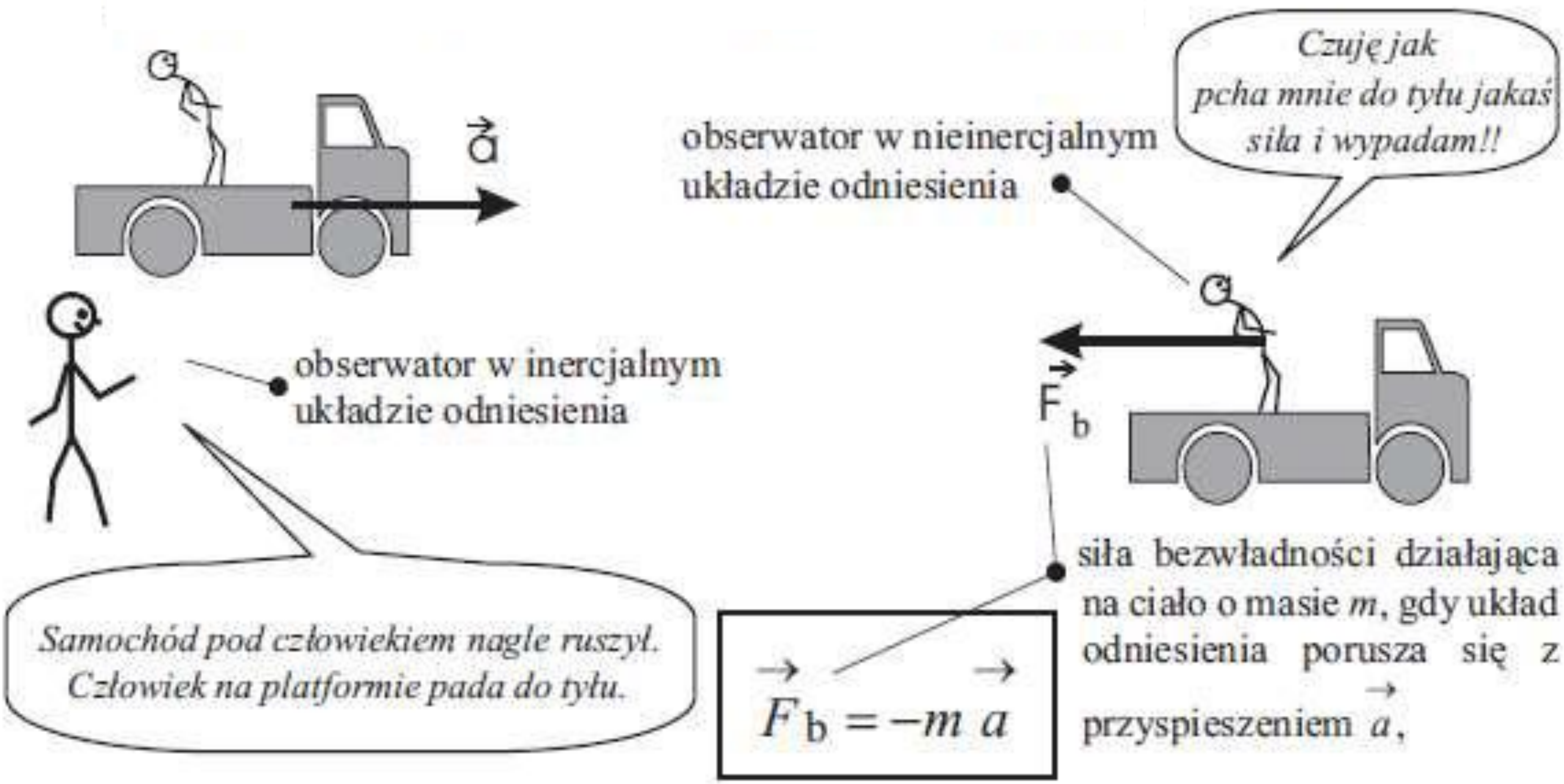


Siła „bezwładności”

Rys. źródło; https://www.quora.com

Rys. Kiedy poruszasz się po zakrzywionej drodze. (a) Kierowca samochodu czuje, że jest pchany w prawo, kiedy wykonuje skręt w lewą stronę. Jest to siła bezwładności wynikająca z wybrania samochodu jako układu odniesienia.
(b) W układzie odniesienia związanym z Ziemią, kierowca porusza się po linii prostej, przestrzegając pierwszej zasady dynamiki Newtona, zaś samochód porusza się w lewo. Nie występuje siła działająca na kierowcę, skierowana w prawo w stosunku do Ziemi. Pojawia się za to siła dośrodkowa, skierowana w lewo, która powoduje, że samochód skręca.

Siła bezwładności w ruchu prostoliniowym



Rys. źródło: http://www.if.pwr.edu.pl

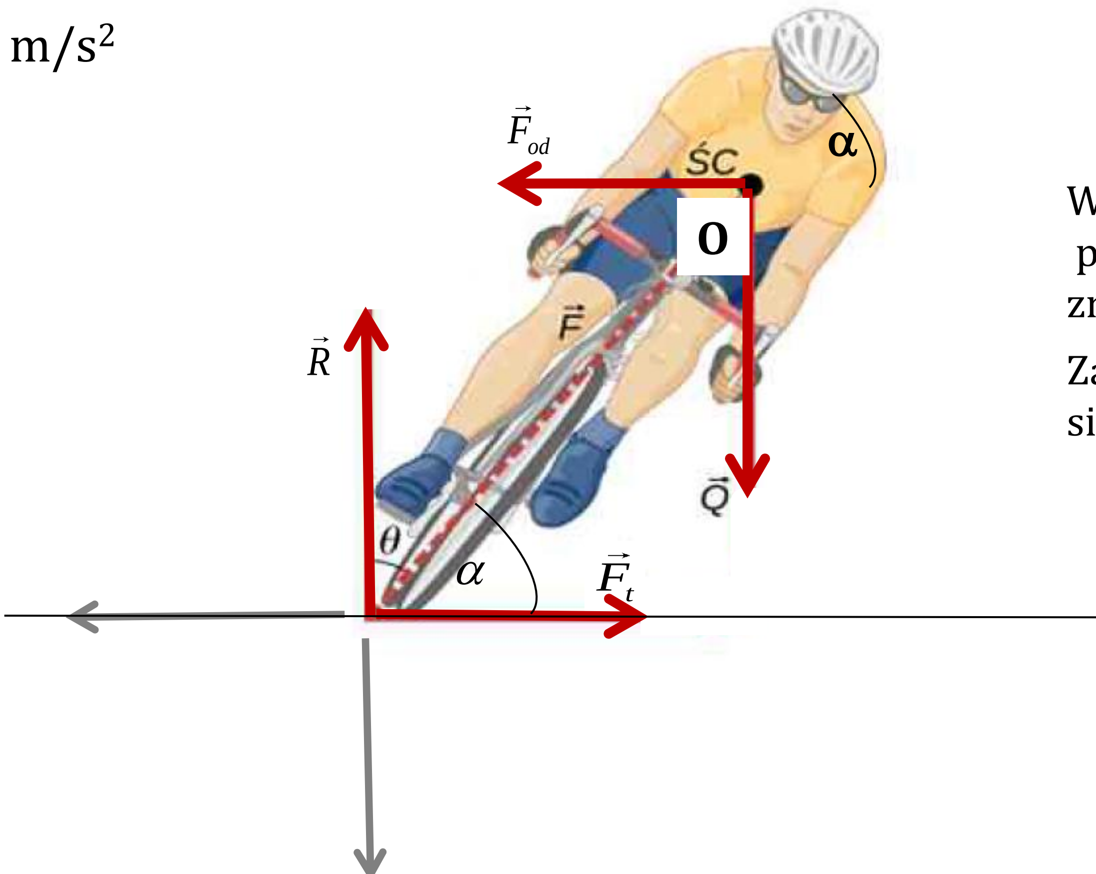
Przykład 2* - kolarz (II sposób)

Kolarz, poruszający się po okręgu o promieniu r jest nachylony ku środkowi okręgu, tworząc z powierzchnią toru kąt α. Współczynnik tarcia opon roweru o nawierzchnie drogi wynosi μ. Z jaką szybkością porusza się kolarz?

II sp. Rozpatrujemy działanie sił na kolarza w układzie ruchomym (obserwator bierze udział w ruchu)

Dane:
μ, r, α
g= 9,81 m/s^2

Szukane:
(a) v=?

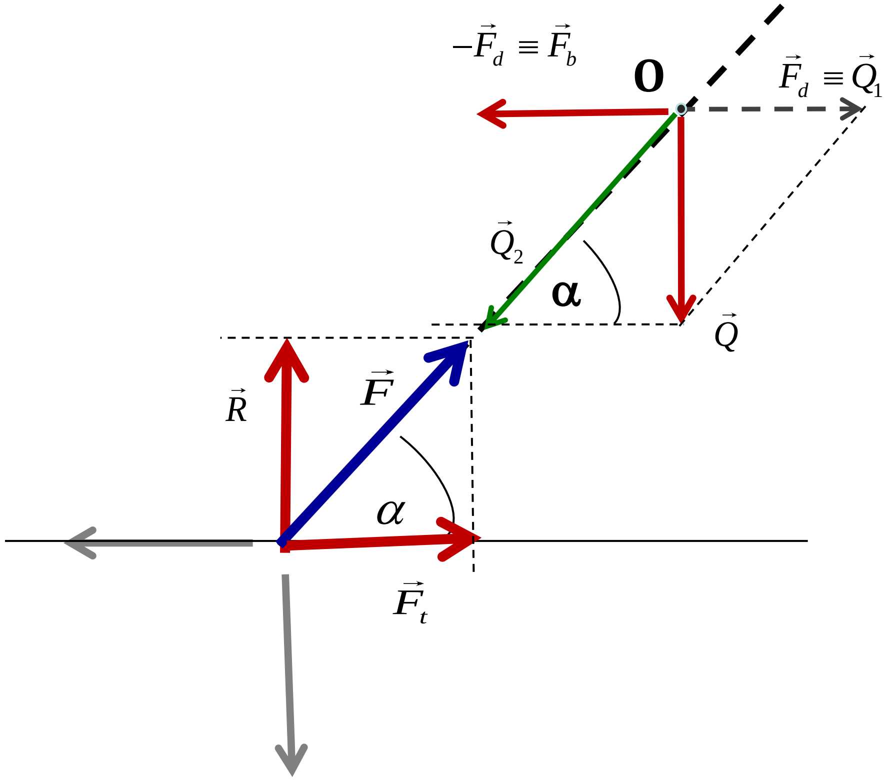


W układzie ruchomym kolarz pochyla rower tak, aby układ znajdował się w spoczynku.

Zatem suma geometryczna sił oraz ich momentów wynosi zero.

Przykład 2* – (układ nieinercjalny)

Na kolarza(wraz z rowerem) oprócz tych samych sił co w układzie nieruchomym (Q, R, T) działa jeszcze siła F_b równoważąca siłę dośrodkową:



w. : $\vec{F}_w = \vec{Q} + \vec{R} + \vec{F}_t + \vec{F}_b$

Warunkiem równowagi roweru w układzie nieinercjalnym jest to, aby wypadkowa sił: ciężkości i odśrodkowej przechodziła przez punkt styku opon roweru z podłożem.

Zatem wartość składowej poziomej siły ciężkości musi być równa sile dośrodkowej:

$$\left|\vec{Q}_1\right| \equiv \left|\vec{F}_{od}\right| = \frac{mv^2}{r} \qquad (1)$$

z rys.:

$$ctg\alpha = \frac{\left|\vec{Q}_1\right|}{\left|\vec{Q}\right|} \Rightarrow Q_1 = mgctg\alpha \qquad (2)$$

Porównując (1) i (2) mamy: $m\frac{v^2}{r} = mgctg\alpha \Rightarrow$ $\boxed{v = \sqrt{rg \cdot ctg\alpha}.}$

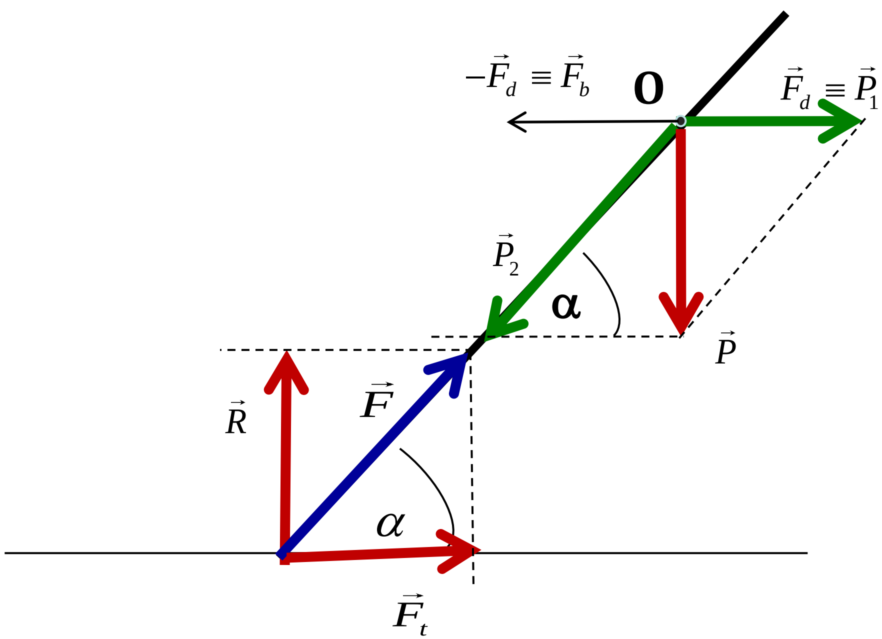
W związku z tym rozważania (w układach inercjalnym- P2 oraz nieinercjalnym -P2*) prowadzą do tych samych wzorów.

Przykład 3 – rowerzysta ☺

Rowerzysta porusza się po okręgu o promieniu 24 m ze stałą prędkością 9m/s. Obliczyć wartość siły odśrodkowej działającej na rowerzystę oraz kąt nachylenia roweru niezbędny do utrzymania równowagi, jeżeli suma ciężarów rowerzysty i roweru wynosi 870 N.

I sp. Rozpatrujemy sytuację w układzie nieruchomym (związanym z drogą).

Dane:
R=24 m
v=9 m/s
P=870 N
g= 9,81 m/s^2



Szukane:
(a) *F=?*
(b) α =?

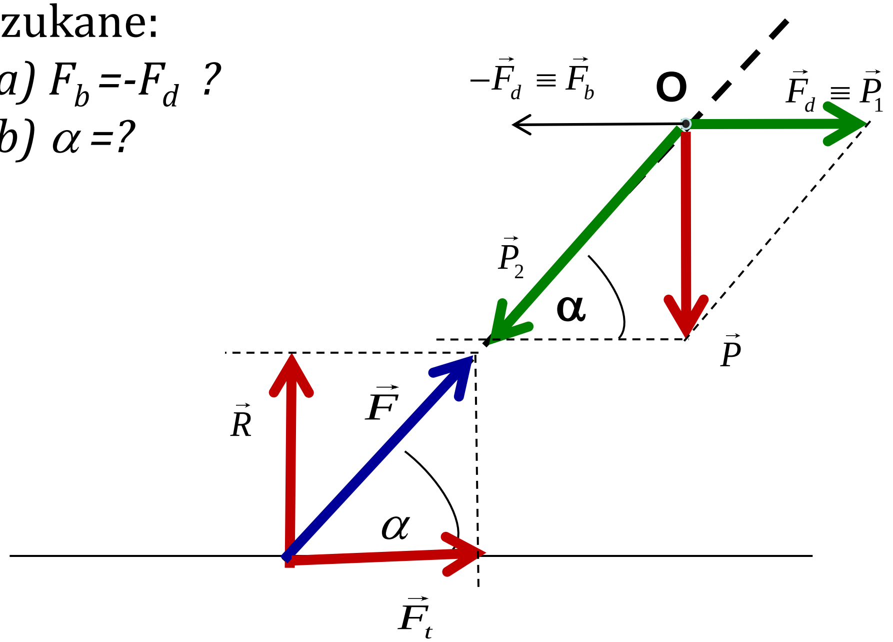
Aby rowerzysta mógł poruszać się po okręgu, musi działać na niego siła dośrodkowa. Siłę tę uzyskuje rowerzysta przez nachylenie roweru, a jej wielkość to składowa pozioma siły ciężkości zaczepiona w środku ciężkości (w środku masy układu).

Przykład 3 – rowerzysta c.d.

Szukane:

(a) $F_b = -F_d$?

(b) α =?



Składowa pozioma siły ciężkości:

$$P_1 \equiv F_d = \frac{mv^2}{r} \quad , \quad m = \frac{P}{g}$$

gdzie m- suma mas rowerzysty i roweru.

zatem
$$F_d = \frac{Pv^2}{r \cdot g}$$

Składowa P_2 ciężkości jest równoważona przez reakcję podłoża.

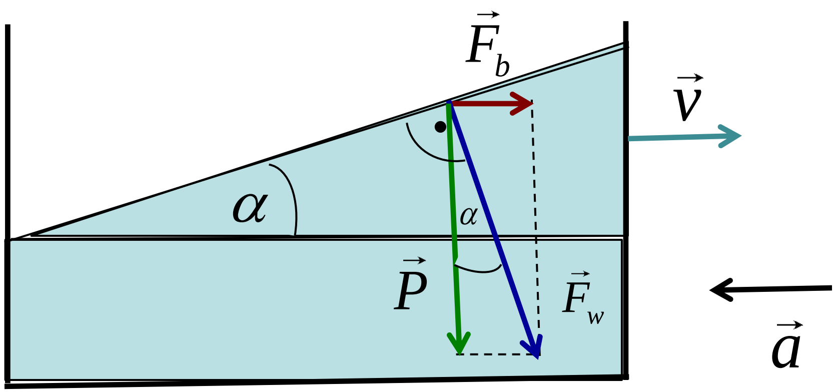
Z rys. $\frac{|\vec{P}_1|}{|\vec{P}|} = ctg\alpha \Rightarrow ctg\alpha = \frac{v^2}{r \cdot g}$, *skąd* $\alpha = arcctg\left(\frac{v^2}{r \cdot g}\right)$

Podstawiając dane liczbowe otrzymujemy: $F_b \approx 299 \ N \ ; \ ctg\alpha \approx 0{,}342 \Rightarrow \alpha \approx 71^0 10'$

O jaki kąt odchyli się poziom cieczy przewożonej w samochodzie cysternie, gdy samochód hamuje z opóźnieniem 5 m/s² ?

Rozważmy siły działające na element powierzchni cieczy o masie Δm podczas hamowania:

α=?



$\vec{P} = \Delta m\vec{g}$ - siła ciężkości

$\vec{F}_b = -\Delta m\vec{a}$ - Siła bezwładności

Zakładamy, że ta wypadkowa siła zewnętrzna (jak też siła reakcji cieczy) jest prostopadła do powierzchni cieczy. *

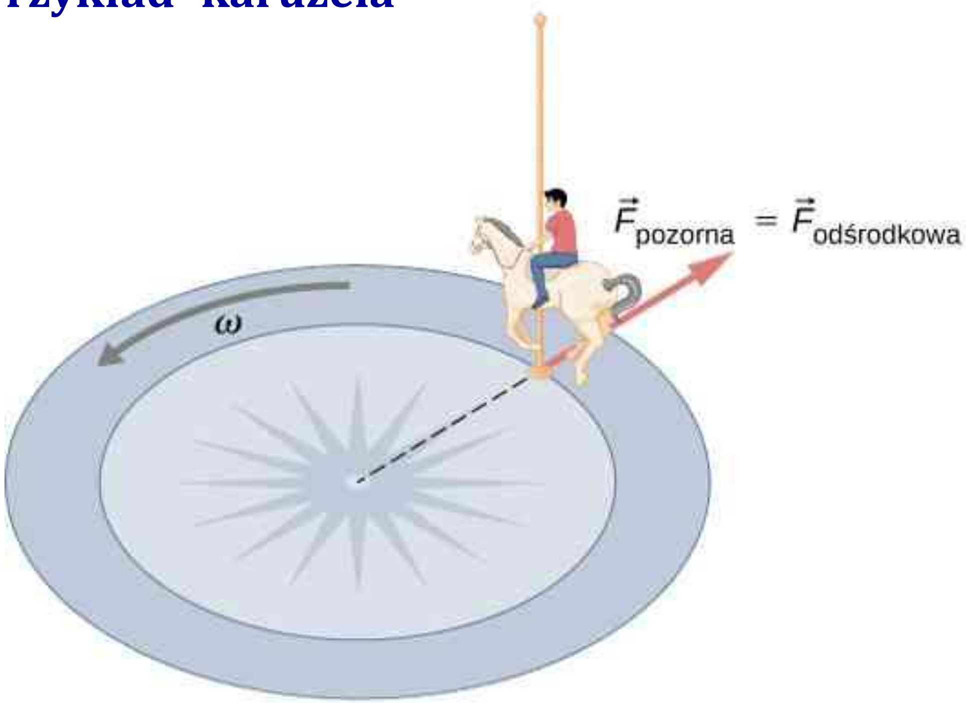
Warunek prostopadłości do powierzchni cieczy będzie spełniony, gdy:

$$tg\alpha = \frac{F_b}{P} \Rightarrow tg\alpha = \frac{a}{g} = 0{,}5$$

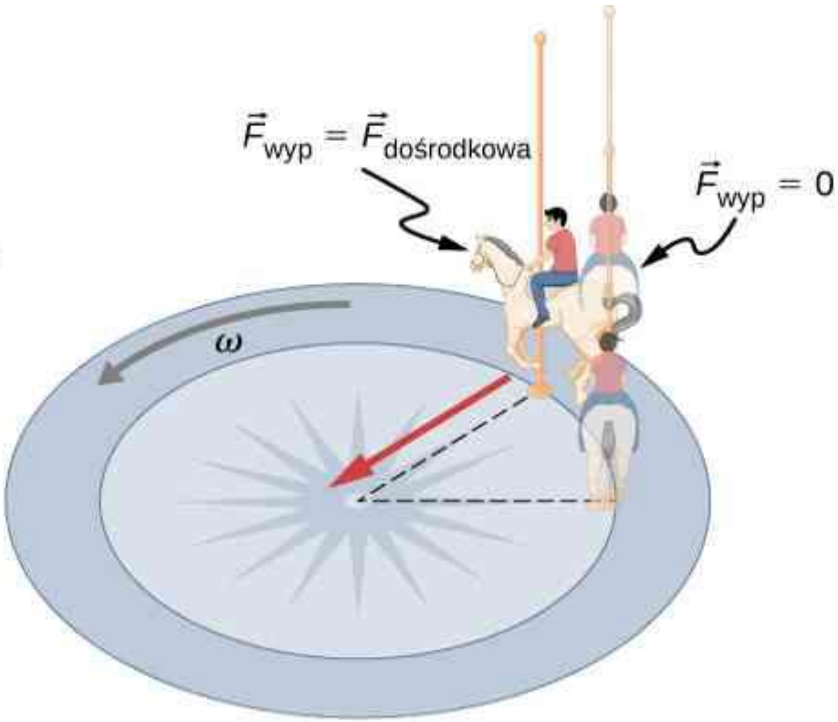
$$\alpha = arctg(0{,}5) = \underline{26^0}$$

*Jeśli ten warunek nie jest spełniony, to powierzchnia cieczy nadal będzie ulegała zmianie, aż składowa styczna zmaleje do zera.

Przykład- karuzela



(a) układ odniesienia związany z karuzelą



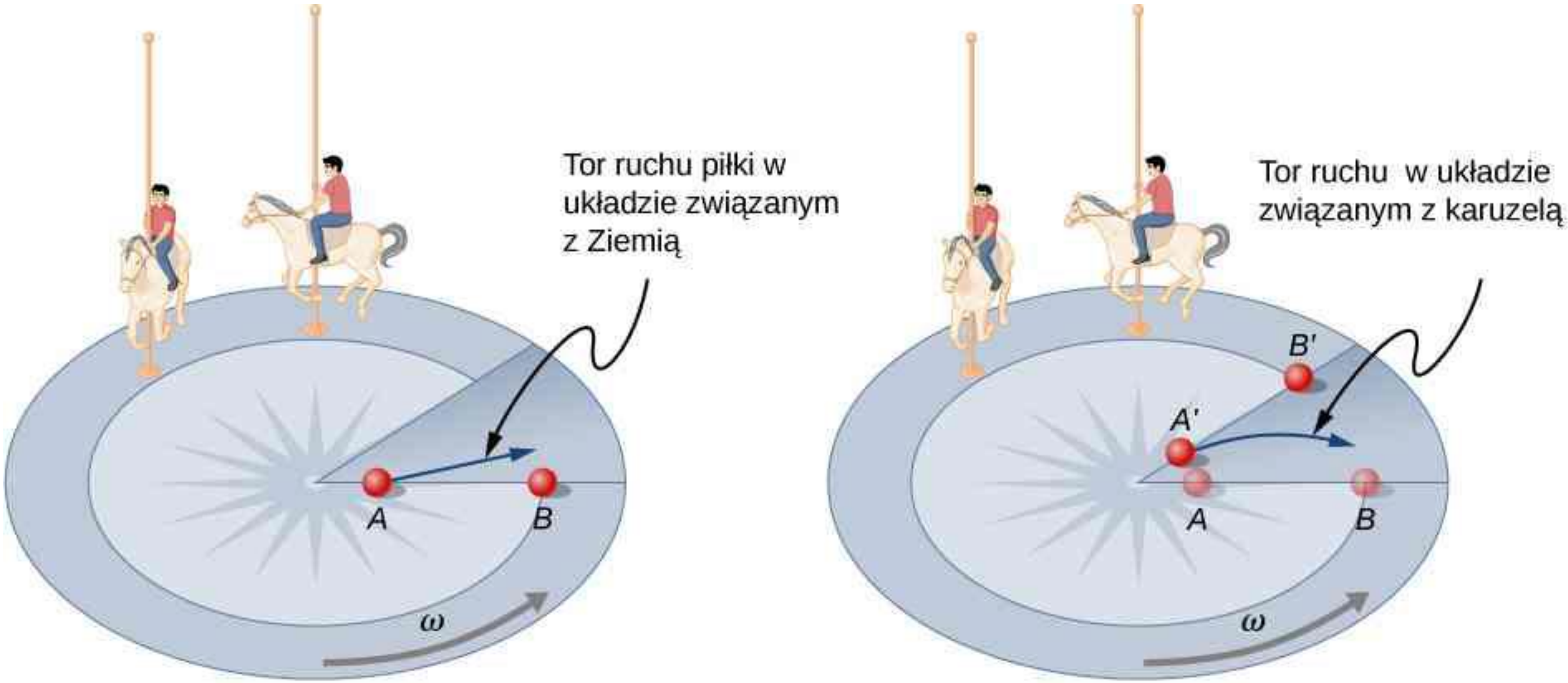
(b) inercjalny układ odniesienia (związany z Ziemią)

Rys. źródło: „*Fizyka dla szkół wyższych* S. Ling, , J.Sanny, W. Moebs

Rys. (a) W tym nieinercjalnym układzie odniesienia czujemy działanie siły bezwładności, która wyrzuca nas na zewnątrz.
(b) W układzie odniesienia związanym z Ziemią nie ma siły, która chciałaby cię wyrzucić na zewnątrz, gdyż siła odśrodkowa to twór czysto umowny. Owszem, musisz kurczowo trzymać się karuzeli, ale po to, by poruszać się po okręgu i nie wypaść z niego po linii prostej wprzód

Przykład- puszczamy piłkę bezpośrednio ze środka karuzeli

Co się stanie, gdy ciało się porusza w obracającym się układzie odniesienia?



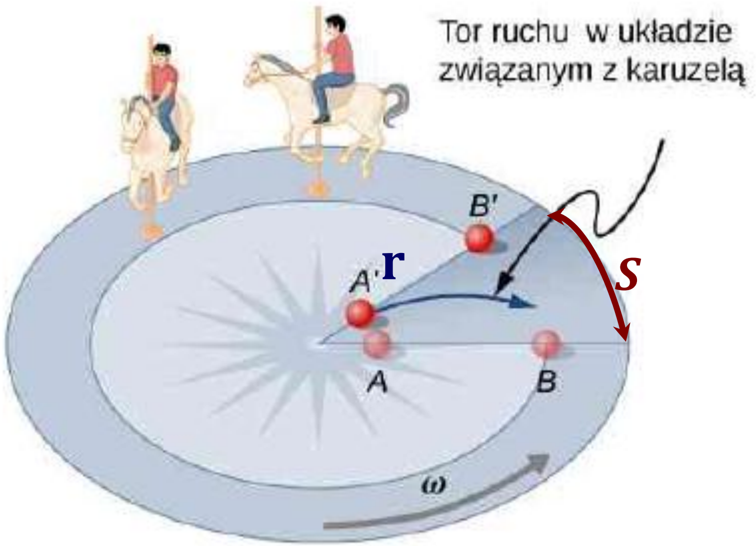
(a) (b)

Rys. źródło: „*Fizyka dla szkół wyższych* S. Ling, , J.Sanny, W. Moebs

(a) Osoba stojąca obok karuzeli widzi piłkę poruszającą się prosto, zaś pod nią kręcącą się karuzelę.

(b) W układzie odniesienia związanym z karuzelą piłka porusza się po torze zakrzywionym w prawo, gdyż działa na nią siła bezwładności zwaną Coriolisa.

Co się stanie, gdy ciało się porusza w obracającym się układzie odniesienia



Siła Coriolisa

W czasie gdy ciało przebywa wzdłuż promienia drogę r : $r = v \cdot t$

Punkt układu odległy o ***r*** od osi obrotu przebywa drogę ***S*:**

$$S = r \cdot \omega \cdot t$$

ω - prędkość kątowa układu

v - stała prędkość radialna

A zatem **:** $S = vt \cdot \omega t = v\omega t^2$ (*)

$$S \sim t^2$$

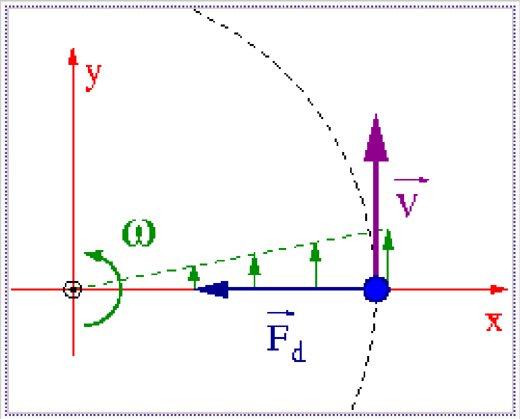
Z powyższego wynika, że jest to ruch jednostajnie przyspieszony: $S = \frac{1}{2} a t^2$ (**)

Porównując wyrażenia (*) i (**) otrzymujemy: $v\omega t^2 = \frac{1}{2} a t^2$

A zatem wartość przyspieszenia: $\boxed{a_c = 2\omega v}$

Siła Coriolisa (wartość): $\boxed{F_c = 2m\omega v \quad \left[1N = kg \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{m}{s}\right]}$

W UKŁADZIE WIRUJĄCYM WYSTĘPUJE SIŁA CORIOLISA



Rys.1. Układ O

Ruch po okręgu - w układzie inercjalnym O (Rys.1)

Do utrzymania ciała w tym ruchu :

$$F_d = \frac{mv^2}{r}$$

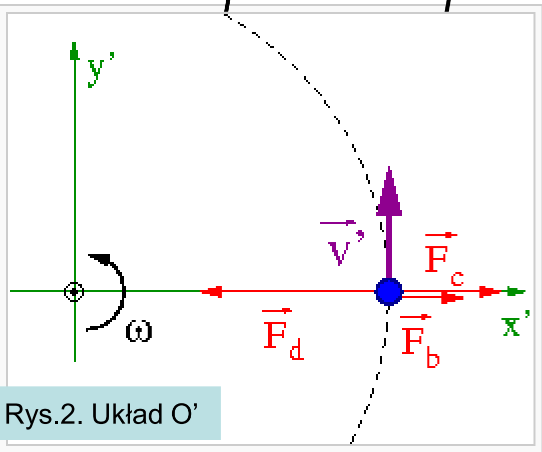
Ruch po okręgu - w układzie obracającym się O' (Rys. 2)

Związek między prędkościami :

$$\boxed{v' = v - \omega r}$$

Siła wypadkowa w układzie O' :

$$F'_{od} = m\frac{V'^2}{r} = m\frac{(v-\omega r)^2}{r} = m\frac{(v^2 - 2\cdot v\omega r + \omega^2 r^2)}{r} = m\frac{v^2}{r} - 2mwv + m\omega^2 r = F_d - F_c - F_b$$



Rys.2. Układ O'

Rys. źródło: http://brain.fuw.edu.pl

Siła Coriolisa

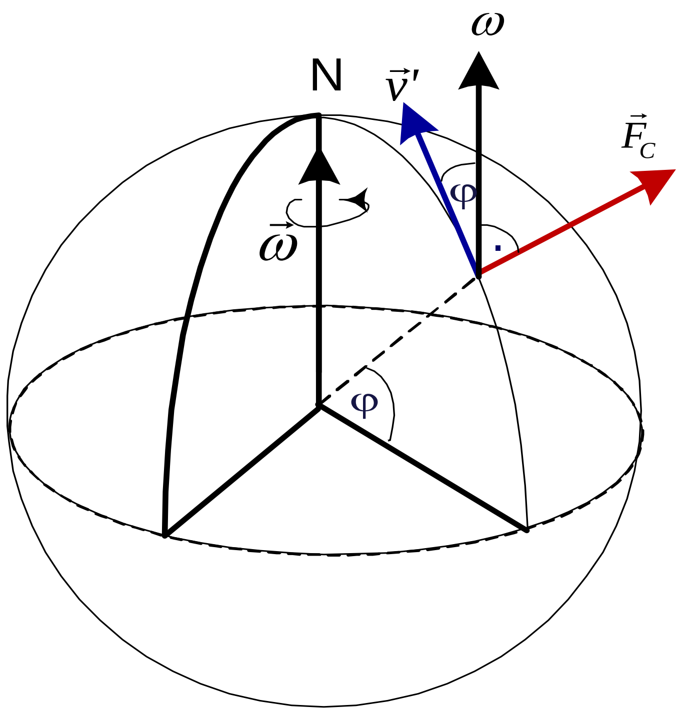
gdzie:

$$\boxed{\vec{F}_C = -2m(\vec{\omega}\times\vec{v}') = 2m(\vec{v}'\times\vec{\omega})}$$

W układzie O' dodatkowa **siła pozorna tzw. siła Coriolisa** konieczna jest do poprawnego opisania ruchu po okręgu.

SIŁY W NIEINERCJALNYCH UKŁADACH ODNIESIENIA

Siła Coriolisa : $$\vec{F}_C = -2m(\vec{\omega}\times\vec{v}') = 2m(\vec{v}'\times\vec{\omega})$$, gdzie **ω= const.**



Rys. Kierunek i zwrot siły Coriolisa.

- Kierunek działania siły Coriolisa (rys.) jest zawsze prostopadły do kierunku wektora prędkości poruszającego się ciała oraz wektora ω, tak więc siła ta powoduje odchylenie toru ruchu ciała od linii prostej.

- Ruch ciała wzdłuż południka na północ powoduje odchylenie na wschód na półkuli północnej (z punktu widzenia poruszającego się obiektu).

- Działa wyłącznie na obiekty znajdujące się w układzie wirującym i zależy od prędkości kątowej (ω) wirującego układu oraz od masy (m) i prędkości liniowej poruszającego się obiektu.

Przykład- pocisk

Dwaj myśliwi polowali na dziki. Jeden strzelał do dzika znajdującego się na zachód, drugi do dzika znajdującego się na w kierunku południowym. Obydwaj spudłowali i tłumaczyli Swoje niepowodzenie występowaniem siły Coriolisa. Który z nich miał prawo tak się tłumaczyć? Jaka jest wielkość odchylenia toru pocisku, jeżeli średnia prędkość pocisku v= 300 m/s, czas lotu t=1s, a szerokość geograficzna $\varphi=49^0$.

Rozwiązanie:

Dane:

v'= 300 m/s

t=1s

$\varphi=49^0$

ω- prędkość kątowa Ziemi

$$\boxed{\vec{F}_C = -2m(\vec{\omega}\times\vec{v}') = 2m(\vec{v}'\times\vec{\omega})}$$

Szukane:

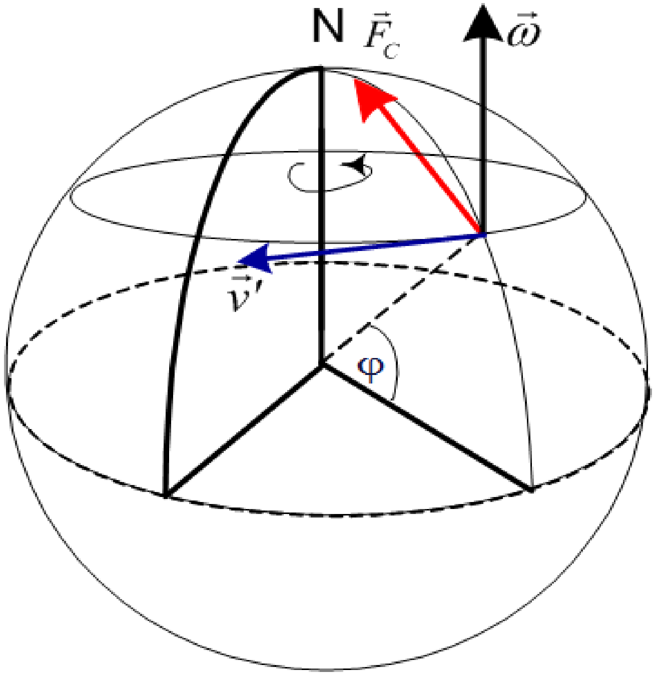
(a) F_{c1}=?

Δx_{c1} =?

(b) F_{c2}=?

Δx_{c2} =?

ad. a)



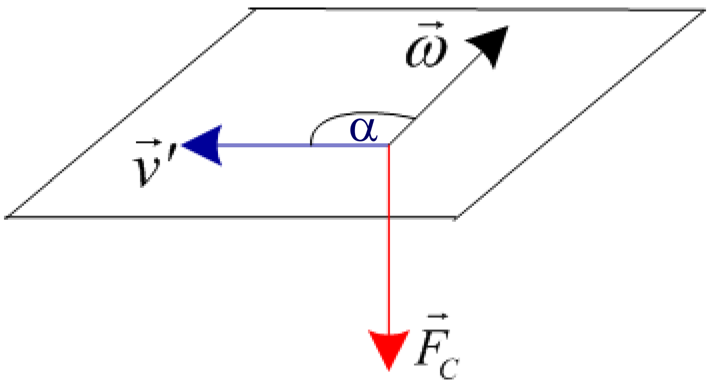
Zastosuję wzór na Siłę Coriolisa:

w.: $\vec{F}_C = 2m(\vec{v}'\times\vec{\omega})$

s.: $F_C = 2m|\vec{v}'||\vec{\omega}|\sin\alpha$

Przykład- pocisk ad. (a)

W przypadku gdy myśliwy strzela w kierunku zachodnim siła Coriolisa jest skierowana prostopadle do osi Ziemi (rys.) , a ponieważ wektory v’ ⊥ ω , zatem:



$$F_{C1} = 2mv'\omega$$

Siła ta nadaje pociskowi (o masie m) przyspieszenie:

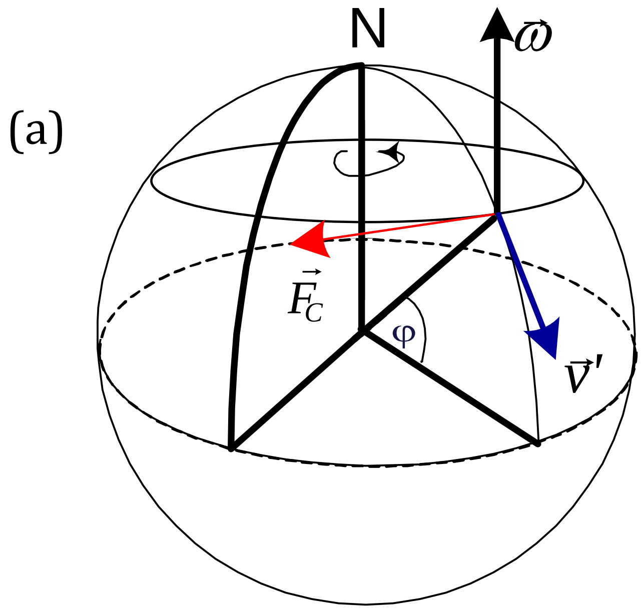
$$a_1 = \frac{F_{C1}}{m},$$

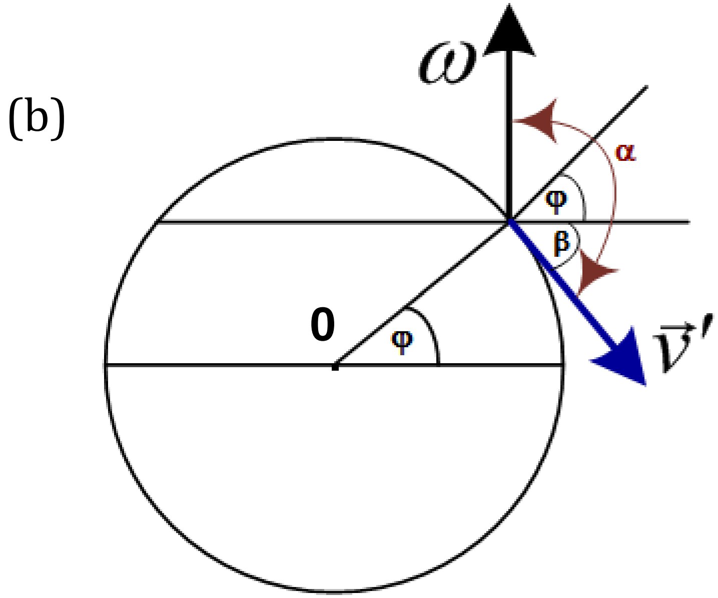
dlatego pocisk ulega odchyleniu :

$$\Delta x_1 = \frac{1}{2} a_1 t^2 = v' \cdot \omega t^2$$

$$\Delta x_1 \approx 2{,}2cm$$

Przykład- pocisk ad. (b)- rozwiązanie:





ad. b)

W przypadku gdy myśliwy strzela na południe siła Coriolisa jest skierowana na zachód (rys. a), wartość:

$$F_{C2} = 2mv'\omega \sin\alpha$$

Kąt α między wektorami v' i ω (rys. b), wynosi:

$$\alpha = 180^0 - \varphi$$

A zatem: $$F_{C2} = 2mv'\omega \sin\varphi$$

skąd $$a_2 = \frac{F_{C2}}{m} = \frac{2mv'\omega \sin\varphi}{m} = 2v'\omega \sin\varphi.$$

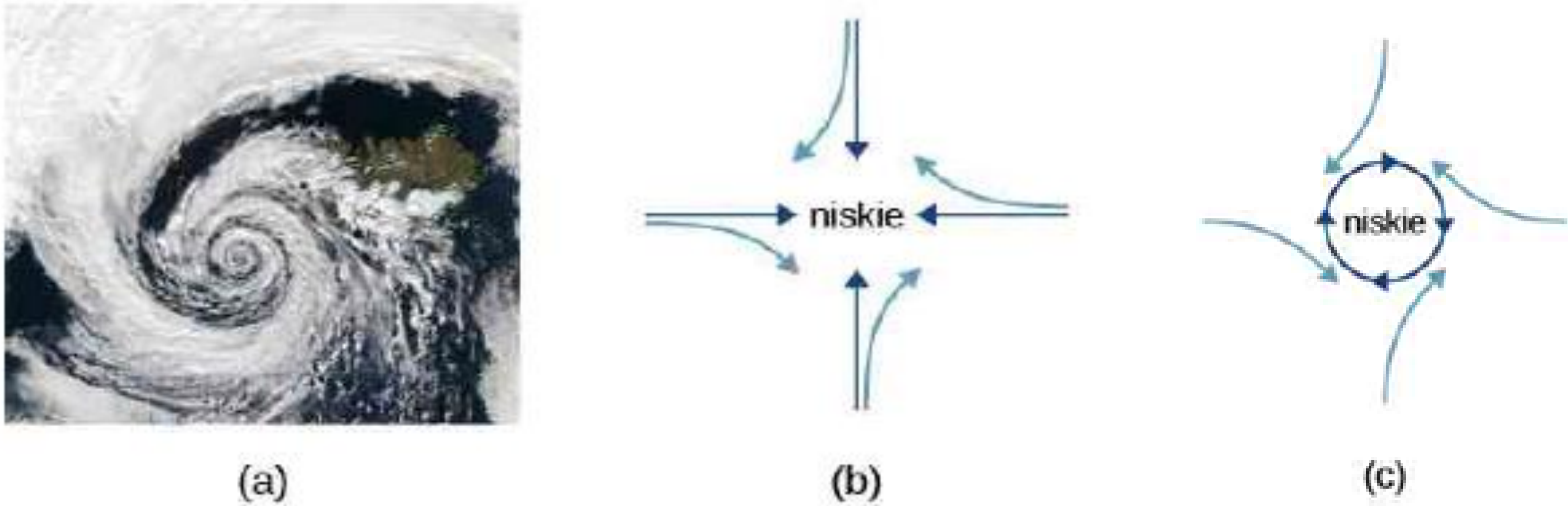
A odchylenie pocisku wynosi: $$\Delta x_2 = \frac{1}{2} a_2 t^2 = v'\omega t^2 \sin\varphi$$

$$\underline{\Delta x_1 \approx 1{,}7 cm}$$

Odp. Żaden z myśliwych nie miał prawa tłumaczyć swego niepowodzenia siłą Coriolisa. ☺

Link do demonstracji siły Coriolisa:
https://www.youtube.com/watch?v=OGHPo9nzL6E&feature=youtu.be

Przykład – Siła Coriolisa a kierunek wiatrów



Rys. źródło: „*Fizyka dla szkół wyższych* S. Ling, , J.Sanny, W. Moebs

Rys. (a) Obrót w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara huraganu na półkuli północnej jest główną konsekwencją siły Coriolisa.

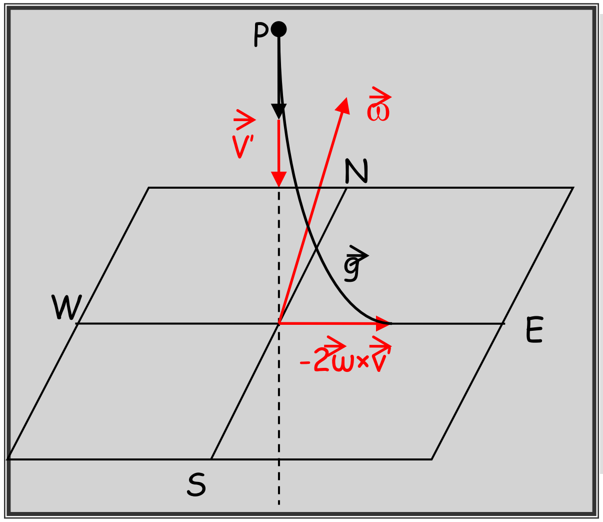
(b) Bez siły Coriolisa powietrze wpłynęłoby prosto do strefy niskiego ciśnienia

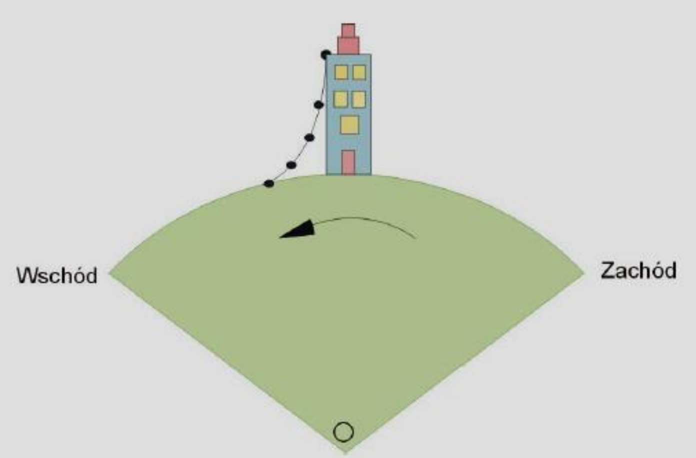
(c) Siła Coriolisa zakrzywia kierunek wiatru w prawo, powodując obrót w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.

- Pasaty – wiatry wiejące od zwrotników do równika na skutek siły Coriolisa odchylają się na półkuli północnej w prawo (skręcają na zachód) , a na półkuli południowej w lewo. W rezultacie wiatry te wieją odpowiednio z północnego i z południowego wschodu.

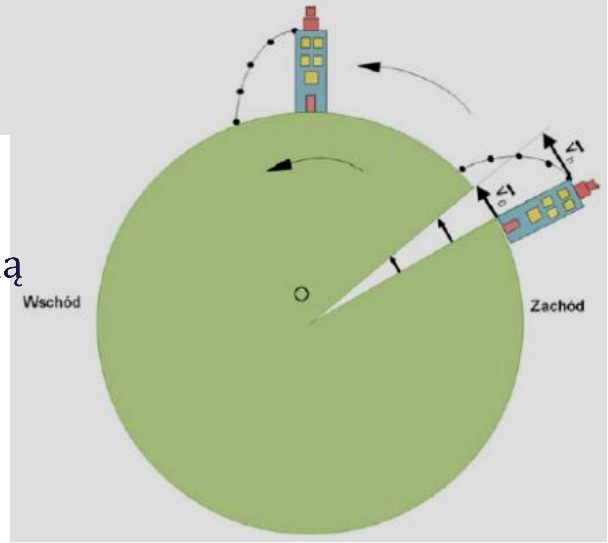
Przykład- kamień rzucony z wieży

Swobodny spadek ciała z wieży (np. 100m, $\varphi=32^0$): następuje przesunięcie miejsca upadku względem pionu, wyznaczonego przez siły grawitacji, o pewną wielkość Δ (np. 1,9 cm), największą na równiku, a zerową na biegunie. (Nie uwzględniając innych sił.)





Swobodny spadek kamienia obserwowany przez obserwatora związanego z obracającą się Ziemią (układ nieinercjalny).



Przesunięcie określa wzór:

$$\Delta = \frac{\omega \cos\varphi}{3}\sqrt{\frac{8h^3}{g}}$$

φ- szerokość geograficzna

Rys. **Ciało spadające swobodnie doznaje odchylenia na wschód.**

Rys. Źródło: https://slideplayer.pl/slide/413623/

Ten sam kamień obserwowany przez obserwatora będącego w kosmosie (w układzie inercjalnym).

II ZASADA DYNAMIKI NEWTONA W UKŁADZIE NIEINERCJALNYM

W układzie nieinercjalnym II zasada dynamiki Newtona przyjmuje postać:

$$\boxed{\vec{F} = m\left(\vec{a}\,' + \vec{a}_0\right)}$$

gdzie: a_0 – przyspieszenie układu nieinercjalnego względem inercjalnego
a' - przyspieszenie mierzone w układzie nieinercjalnym

W układzie nieinercjalnym wygodniej jest wprowadzić wielkość $\vec{F}_0$, wówczas powyższe równanie ma zapis:

$$\vec{F} + \vec{F}_0 = m\vec{a}\,'$$

gdzie: $\vec{F}_0 = -m\vec{a}_0$ nazywamy siłą pozorną.

Przy obrocie **ω = const.**, zapisujemy: $\vec{F}_0 = -2m\vec{\omega}\times\vec{v}\,' - m\vec{\omega}\times\left(\vec{\omega}\times\vec{r}\,'\right)$

siła Coriolisa siła dośrodkowa

➢**W nieinercjalnych układach odniesienia nie mają zastosowania zasady zachowania pędu, momentu pędu i energii.**

NIEINERCJALNE UKŁADY ODNIESIENIA- RZYKŁADY

▪ Wahadło Foucaulta

(fot. PAP/Jerzy Undro)

Mikołaj Kopernik pozbawił Ziemię jej centralnego położenia we Wszechświecie, natomiast francuski fizyk **Jean Foucault** dowiódł przy pomocy eksperymentu z wahadłem, że Ziemia rotuje wokół własnej osi i można to wyraźnie zaobserwować. Jean Foucault zaprezentował swoje 67-metrowe wahadło w paryskim Panteonie w 1851roku.

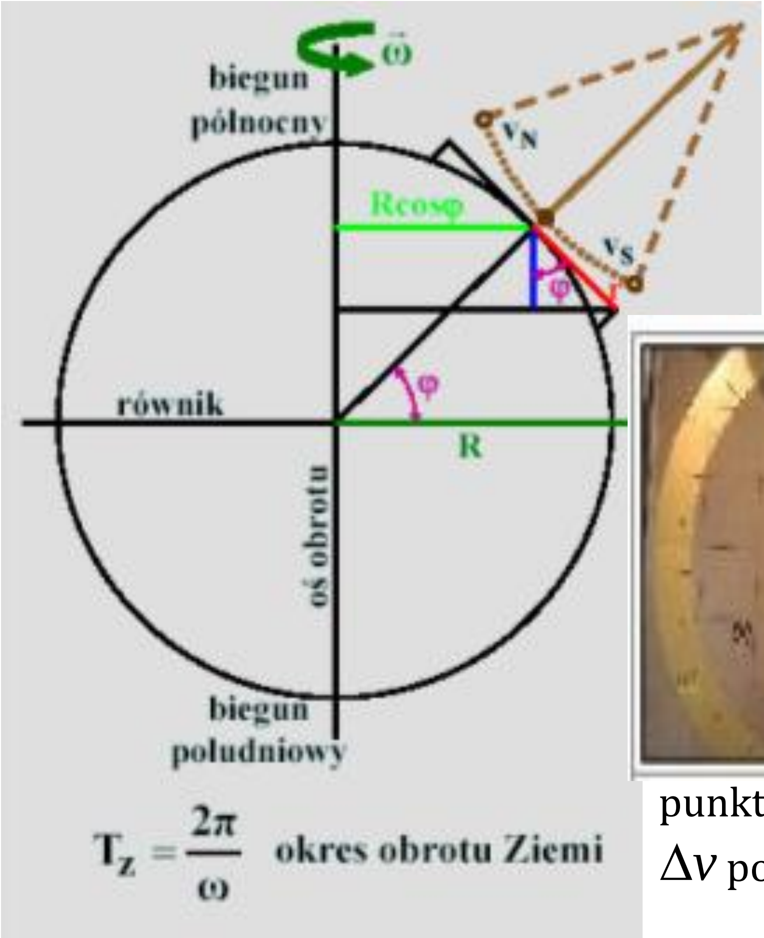
Wybrane duże wahadła

Miejsce	Kraj	L (m)	M (kg)
Oregon Convention Center In Portland	USA	**27**	**408**
University of Colorado	USA	**40**	**300**
Museum of Science and Industry, Chicago	USA	**20**	**300**
Pantheon, Paryż	Francja	**67**	**28**
Wieża Dzwonów na Zamku Książąt Pomorskich, Szczecin	Polska	**28,5**	**76**
Dziedziniec Politechniki Gdańskiej, Gdańsk	Polska	**26**	**64**
Instytut Fizyki UMK, Toruń	Polska	**16**	**29**

Rys. Wahadło Foucaulta można zobaczyć także w wieży Zamku Książąt Pomorskich w Szczecinie.

ZASADA DZIAŁANIA

Wahadło Foucaulta jest przyrządem, za pomocą którego można wykazać, że Ziemia obraca się dookoła osi oraz, że **nie** jest układem inercjalnym.



- Szybkość obrotu punktu środkowego wahadła:

$$v_0 = \omega R \cos\varphi$$

- Szybkość obrotu punktu północnego i południowego:

$$v_N = \omega R \cos\varphi - \omega r \sin\varphi$$

$$v_S = \omega R \cos\varphi + \omega r \sin\varphi$$

Różnica każdej z tych prędkości względem środka wahadła wynosi:

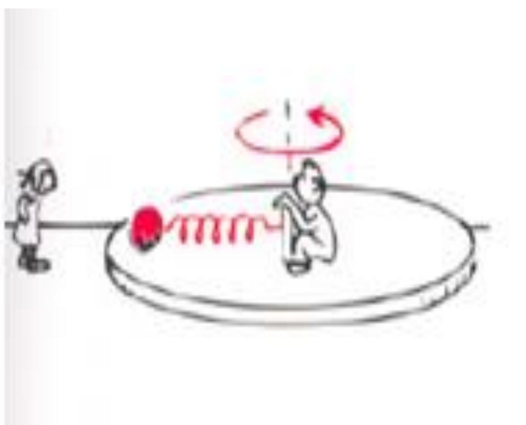
$$\Delta v = \omega r \sin\varphi$$

Wahadło puszczamy w płaszczyźnie N-S. Wtedy składowa prędkości E-W wszystkic punktów jest taka sama jak punktu środkowego. Różnica prędkośc Δv powoduje obracanie się płaszczyzny wahań z okresem

$$T_F = \frac{2\pi r}{\Delta v} = \frac{2\pi r}{\omega r \sin\varphi} = \frac{2\pi}{\omega \sin\varphi} = \frac{T_Z}{\sin\varphi}$$

❖**WNIOSKI :**

- **Siły bezwładności rzeczywiście działają na ciało w układzie nieinercjalnym;**
- **M<u>ożna je mierzyć</u>** (np. wagą sprężynową);
- **Nie sposób związać je z żadnymi ciałami, od których mogłyby pochodzić, a ich istnienie jest spowodowane wyborem <u>nieinercjalnego układu odniesienia.</u>**
- **Siły bezwładności są więc dla każdego ciała siłami zewnętrznymi.**
- **W nieinercjalnych układach odniesienia nie mają zastosowania zasady zachowania pędu, momentu pędu i energii.**
- **Wybór układu odniesienia ma istotny wpływ na obraz ruchu**



Pytanie Ciężka kula metalowa przyczepiona jest do końca sprężyny, której drugi koniec zamocowany jest w środku obracającej się tarczy (patrz rysunek). Jej ruch obserwują dwaj obserwatorzy: jeden znajduje się na tarczy i wiruje razem z nią, drugi stoi nieruchomo na ziemi. Który z nich widzi siłę odśrodkową, napinającą sprężynę? Który z nich widzi, jak sprężyna przyciąga kulę, powodując jej ruch po okręgu?

Rys., źródło: P. Hewitt „Fizyka wokół nas”

Dziękuję za uwagę !