

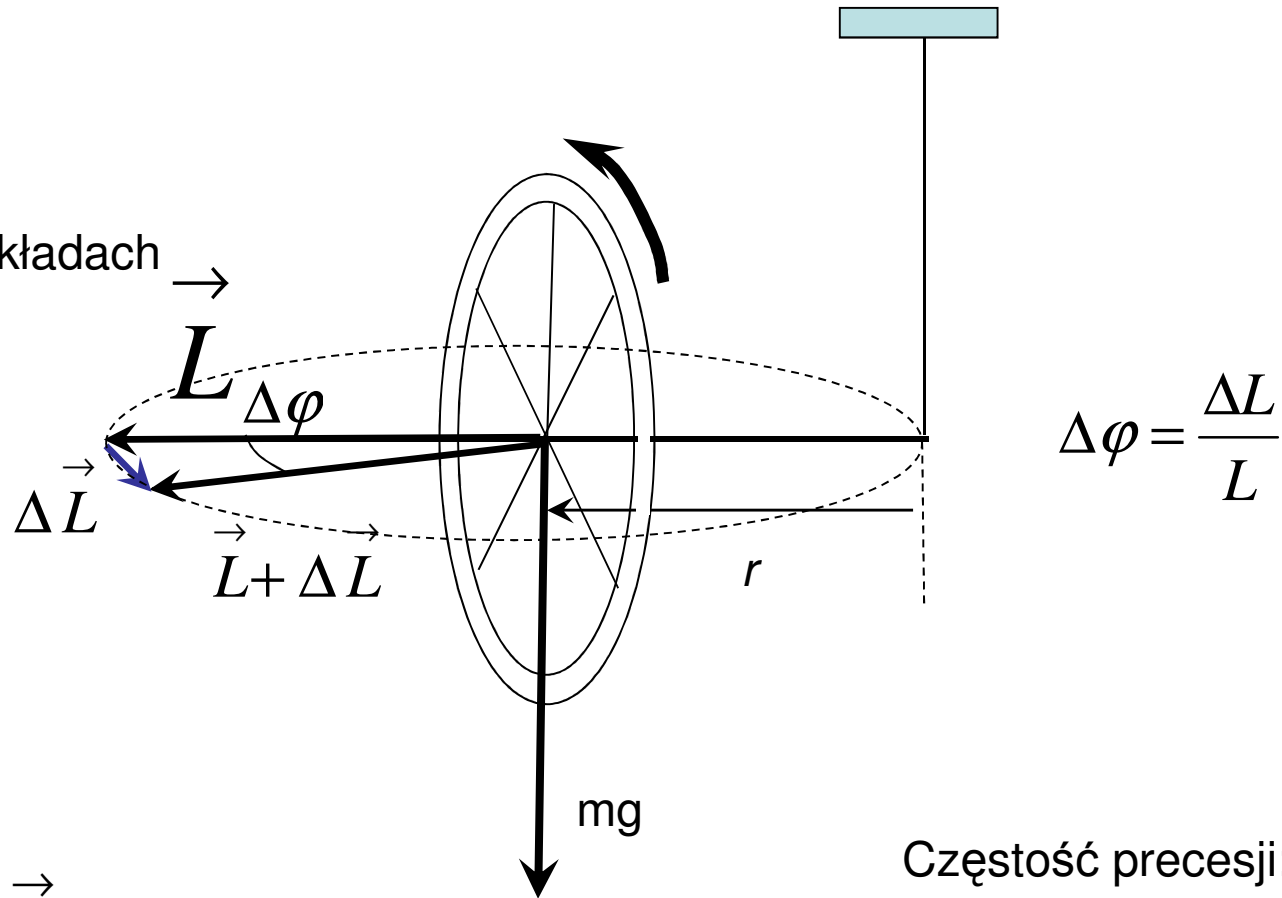
Warunek równowagi bryły sztywnej:

Znikanie sumy sił przyłożonych i sumy momentów sił przyłożonych.

Precesja koła rowerowego

$$\vec{L} \equiv \vec{J}$$

Oznaczenia na
poprzednich wykładach



$$\frac{\Delta \vec{L}}{\Delta t} = \vec{M}$$

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

$$\frac{\Delta \vec{L}}{\Delta t} \perp \vec{r} \perp \vec{F}$$

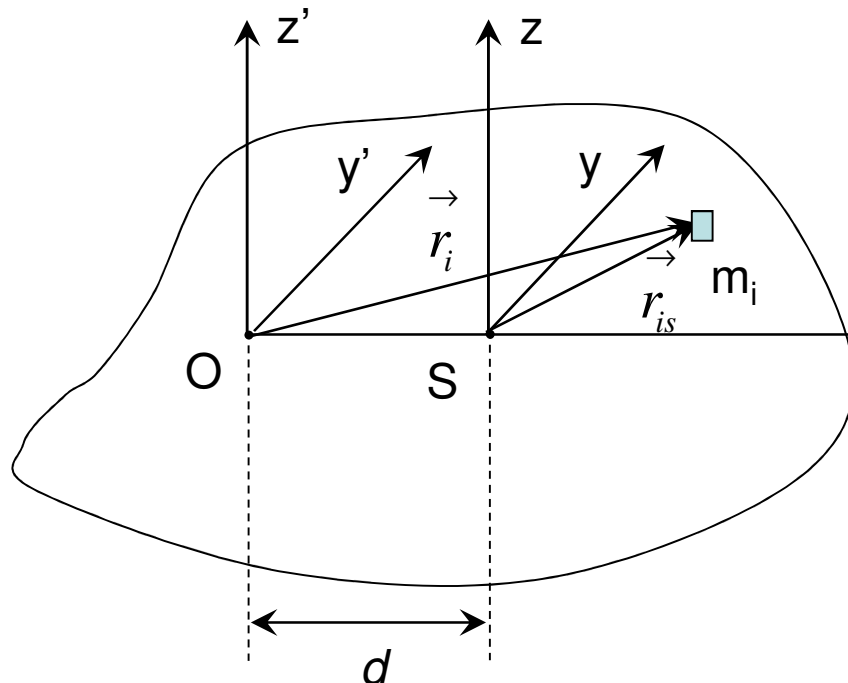
Częstość precesji:

$$\Omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{mgr}{L}$$

Niezwykłe własności żyroskopów

- Kolej jednoszynowa
- Kompas żyroskopowy

Twierdzenie Steinera



I_s - moment bezwładności względem osi równoległej do osi z przechodzącej przez środek masy S

I - moment bezwładności względem osi równoległej do osi przechodzącej przez środek masy i oddalony od niej o d .

$$I = \sum_{x', x} m_i [(x'_i)^2 + (y'_i)^2]$$

Dobieramy osie układów wsp. tak aby:

$$x'_i = x_{is} + d$$

$$y'_i = y_{is}, \quad z'_i = z_{is}$$

$$\begin{aligned} I &= \sum m_i [(x_{is} + d)^2 + y_{is}^2] = \sum m_i (x_{is}^2 + 2x_{is}d + d^2 + y_{is}^2) = \\ &= \sum m_i (x_{is}^2 + y_{is}^2) + 2d \sum m_i x_{is} + d^2 \sum m_i \end{aligned}$$

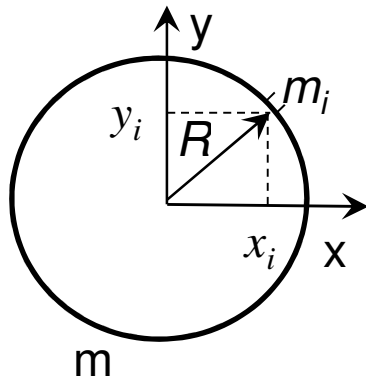
Z definicji układu środka masy: $\sum m_i x_{is} = 0$

Stąd:

$$I = I_s + md^2$$

Obliczanie momentów bezwładności prostych brył

- korzystanie z symetrii
- całkowanie
- skalowanie i tw. Steinera



Obręcz o promieniu R i masie m

Moment bezwładności względem osi przechodzącej przez środek ciężkości, prostopadłej do płaszczyzny obręczy.

Dzielimy obręcz na kawałeczki o masie m_i

$$I = \sum m_i (x_i^2 + y_i^2) = \sum m_i R^2 = mR^2$$

Płaski krążek

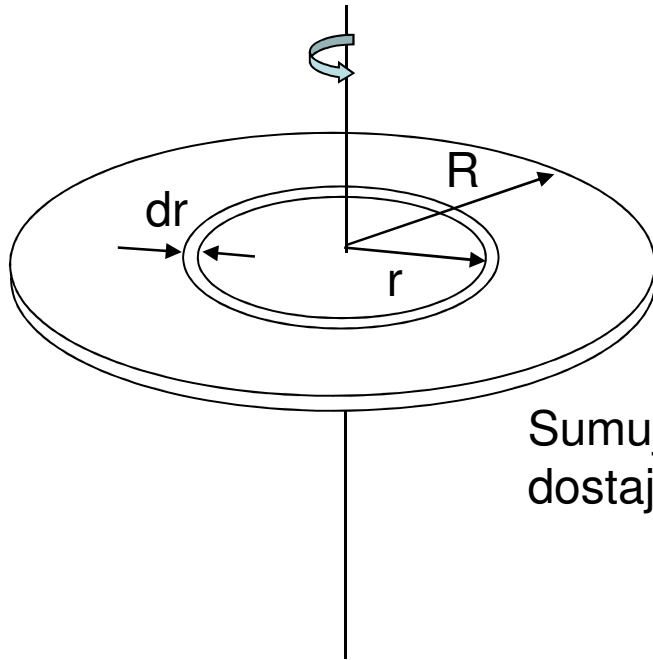
Dzielimy krążek na cienkie obręcze o promieniu r i szerokości dr .

Moment bezwładności takiego pierścienia:

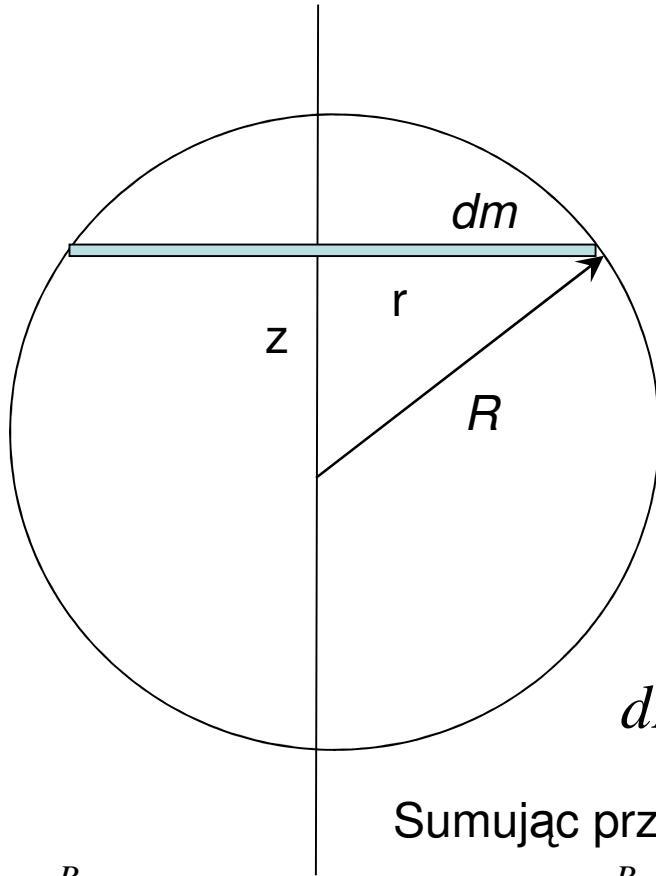
$$dI = dm r^2 = 2\pi r \frac{m}{\pi R^2} dr r^2 = \frac{2m}{R^2} r^3 dr$$

Sumując przyczynki od obręczy dla wszystkich r 0 do R dostajemy:

$$I = \frac{2m}{R^2} \int_0^R r^3 dr = \frac{2m}{R^2} \frac{1}{4} (R^4 - 0^4) = \frac{1}{2} m R^2$$



Moment bezwładności kuli



Dzielimy kulę o masie m na cienkie krążki o promieniu r i wysokości dz każdy.

Masa takiego krążka

$$dm = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi R^3} \pi r^2 dz = \frac{3m}{4R^3} r^2 dz$$

Moment bezwładności krążka:

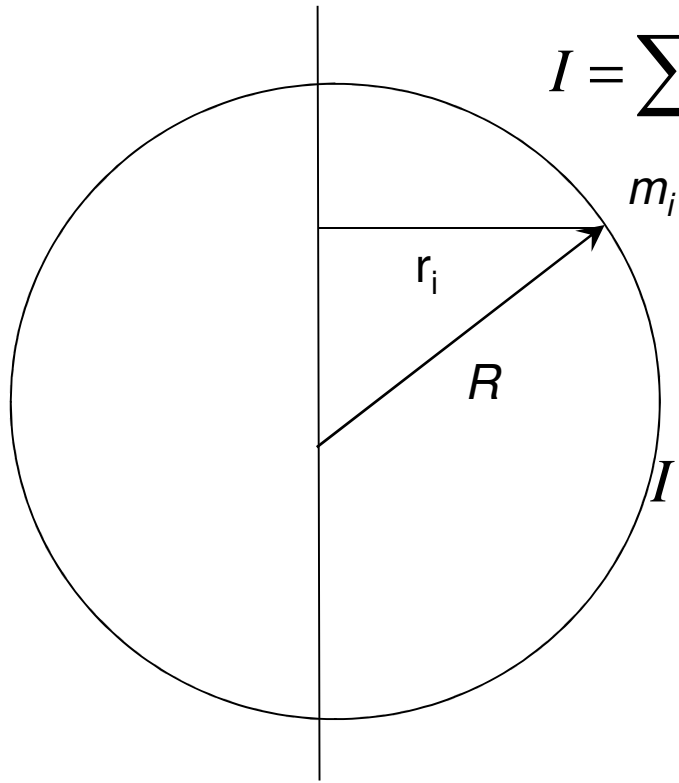
$$dI = \frac{1}{2} \frac{3m}{4R^3} r^4 dz = \frac{3m}{8R^3} (R^2 - z^2)^2 dz$$

Sumując przyczynki od krążków dla różnych z dostajemy :

$$I = \frac{3m}{8R^3} \int_{-R}^R (R^2 - z^2)^2 dz = 2 \frac{3m}{8R^3} \int_0^R (R^2 - z^2)^2 dz = \frac{3m}{4R^3} \int_0^R (R^4 - 2R^2 z^2 + z^4) dz$$

$$I = \frac{3m}{4R^3} (R^4 R - 2R^2 \frac{1}{3} R^3 + \frac{1}{5} R^5) = \frac{3}{4} m R^2 (1 - \frac{2}{3} + \frac{1}{5}) = \frac{2}{5} m R^2$$

Moment bezwładności sfery



$$I = \sum m_i r_i^2 = \sum m_i (x_i^2 + y_i^2) = \sum m_i x_i^2 + \sum m_i y_i^2$$

m_i Z symetrii:

$$\sum m_i x_i^2 = \sum m_i y_i^2 = \sum m_i z_i^2$$

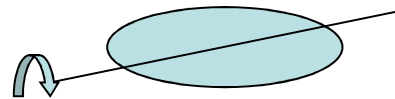
Zatem:

$$I = \sum m_i x_i^2 + \sum m_i y_i^2 = \frac{2}{3} \sum m_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)$$

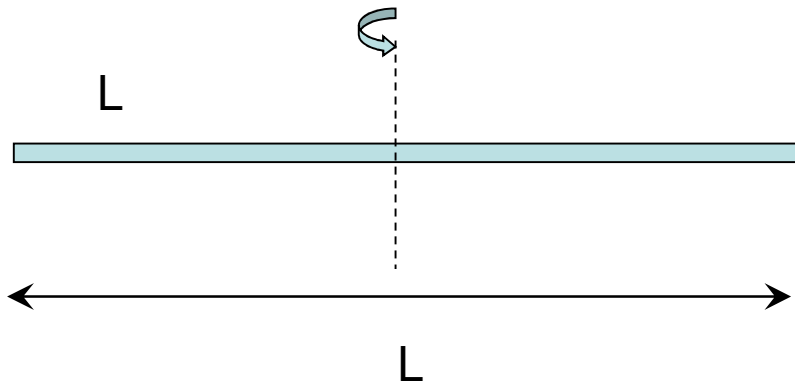
Ponieważ: $x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 = R^2$

$$I = \frac{2}{3} R^2 \sum m_i = \frac{2}{3} m R^2$$

Ten sposób można stosować do obliczania momentów bezwładności innych brył, np.. do obliczenia momentu bezwładności krążka względem osi pokrywającej się z jego średnicą, wykorzystując fakt, że znamy moment bezwładności względem osi prostopadłej do jego powierzchni...



Symetria i skalowanie



Moment bezwładności można często wyznaczyć posługując się argumentami skalowania i tw. Steinera

Obliczmy moment bezwładności pręta o masie m i długości L , względem osi prostopadłej przechodzącej przez jego środek masy

Korzystając z analizy wymiarowej dochodzimy do wniosku, że moment ten powinien mieć postać:

$$I = \alpha mL^2 \quad \alpha - \text{pewien współczynnik bezwymiarowy}$$

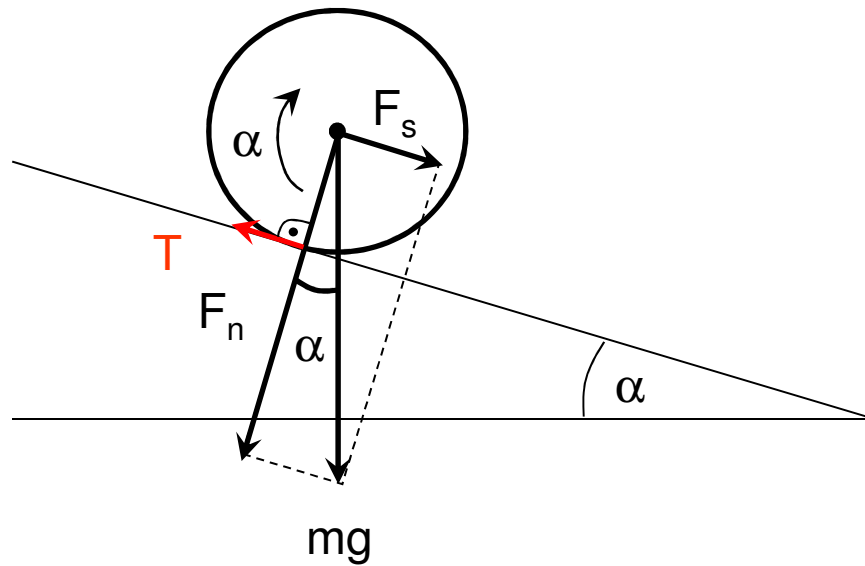
Podzielmy w myśli pręt na dwie równe części i obliczmy (korzystając z tw. Steinera) ich sumaryczny moment bezwładności względem środka pręta:

$$I_1 = 2 \left[\alpha \frac{m}{2} \left(\frac{L}{2} \right)^2 + \frac{m}{2} \left(\frac{L}{4} \right)^2 \right] = \alpha \frac{mL^2}{4} + \frac{mL^2}{16}$$

$$\text{Ale } I = I_1 \implies \alpha mL^2 = \alpha \frac{mL^2}{4} + \frac{mL^2}{16} \implies \alpha = \frac{1}{12} \implies I = \frac{1}{12} mL^2$$

Toczenie bez poślizgu...

...jako obrót względem chwilowej osi obrotu



$$I \frac{d\omega}{dt} = M \quad \omega = \frac{d\alpha}{dt}$$

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M \quad I\varepsilon = M$$

ε - przyspieszenie kątowe

$$M = R_{\perp} F = R F_{\perp} = mgR \sin(\alpha)$$



$$\varepsilon = \frac{mgR \sin(\alpha)}{I}$$

toczenie bez poślizgu to $\omega = \frac{v}{R}$

$$\varepsilon = \frac{a}{R} \quad \Rightarrow \quad a = \frac{mR^2}{I} g \sin(\alpha)$$

I – moment bezwładności względem chwilowej osi obrotu

Z tw. Steinera

$$I = I_s + mR^2$$

I_s – moment bezwładności
Względem środka masy



$$I = \frac{3}{2} mR^2$$

dla walca

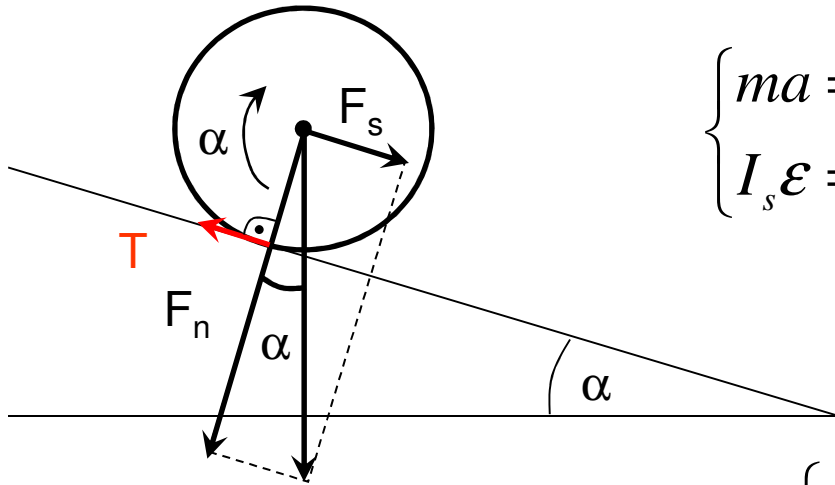
$$I = 2mR^2$$

dla obręczy

Obręcz toczy się wolniej!

Jeśli chcemy znać wartość siły tarcia...

Toczenie jako złożenie ruchu obrotowego i postępowego...



$$\begin{cases} ma = mg \sin(\alpha) - T & \leftarrow \text{ruch postępowy} \\ I_s \varepsilon = TR & \leftarrow \text{ruch obrotowy} \end{cases}$$

względem środka masy

toczenie bez
poślizgu

$$\varepsilon = \frac{a}{R}$$

$$\begin{cases} ma = mg \sin(\alpha) - T \\ T = \frac{I_s}{R^2} a \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = \frac{mR^2}{I_s + mR^2} g \sin(\alpha) \\ T = \frac{I_s}{R^2} a \end{cases}$$

Walec

$$\begin{cases} a = \frac{2}{3} g \sin(\alpha) \\ T = \frac{1}{3} mg \sin(\alpha) \end{cases}$$

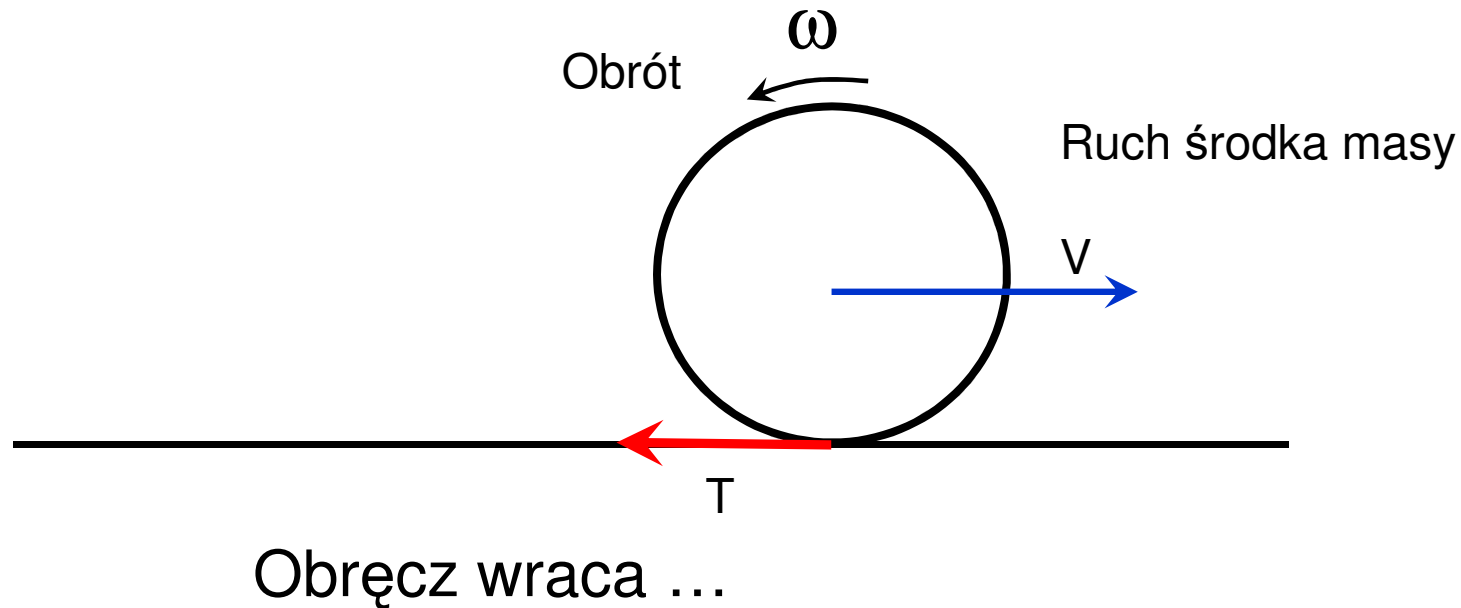
Obręcz

$$\begin{cases} a = \frac{1}{2} g \sin(\alpha) \\ T = \frac{1}{2} mg \sin(\alpha) \end{cases}$$

Toczenie bez poślizgu gdy $T < T_{\max}$!!!

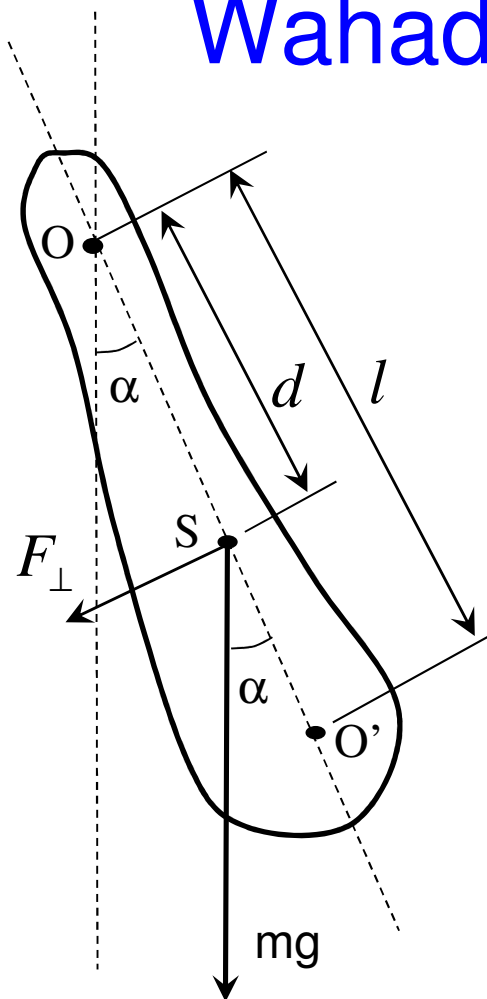
Żeby toczenie odbywało się bez poślizgu, siła tarcia musi mieć odpowiednią wartość! Zwiększając kąt α przy danym współczynniku tarcia f można doprowadzić do poślizgu... (sprawdzamy eksperymentalnie dla walca i obręczy) Wtedy siła tarcia przyjmuje maks. wartość $T_{\max} = fmg \cos(\alpha)$

Ruch obręczy – przykład połączenia ruchu postępowego i obrotowego



- ruch z poślizgiem ($T=T_{\max}$)
- ruch bez poślizgu (wartość siły tarcia dostosowuje się do sytuacji....)

Wahadło fizyczne



O – punkt zawieszenia wahadła

d - odległość od punktu zawieszenia do środka masy

I – moment bezwładności względem O

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = M \quad M = -F_{\perp} d$$

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -\frac{mgd}{I} \sin(\alpha)$$

Dla małych kątów α :

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{mgd}{I} \alpha = 0$$

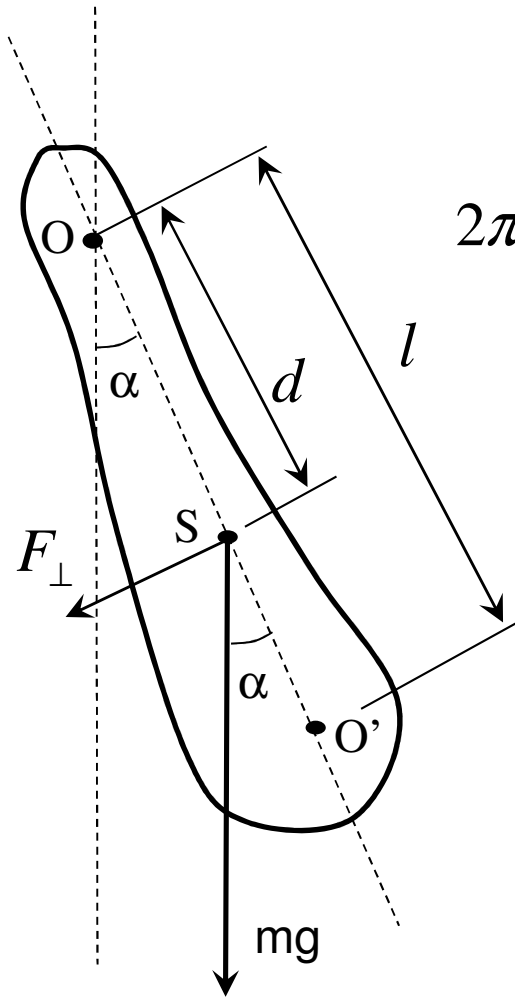
Równanie oscylatora harmonicznego

Częstość drgań $\omega = \sqrt{\frac{mgd}{I}}$

Okres drgań $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}}$

Wahadło rewersyjne

Jaką długość l musi mieć wahadło matematyczne, aby miało okres T identyczny z wahadłem fizycznym?



$$2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \Rightarrow \boxed{l = \frac{I}{md}} \quad \text{długość zredukowana wahadła fizycznego}$$

Jaki okres będzie miało wahadło fizyczne jeśli zawiesimy je w punkcie O' odległym o l od punktu O ?

$$T' = 2\pi \sqrt{\frac{I'}{mg(l-d)}}$$

I' – moment bezwładności względem O'
z twierdzenia Steinera:

$$I' = I_s + m(l-d)^2 \quad I = I_s + md^2$$

Czyli: $I_s = I - md^2 = lmd - md^2 = md(l-d)$

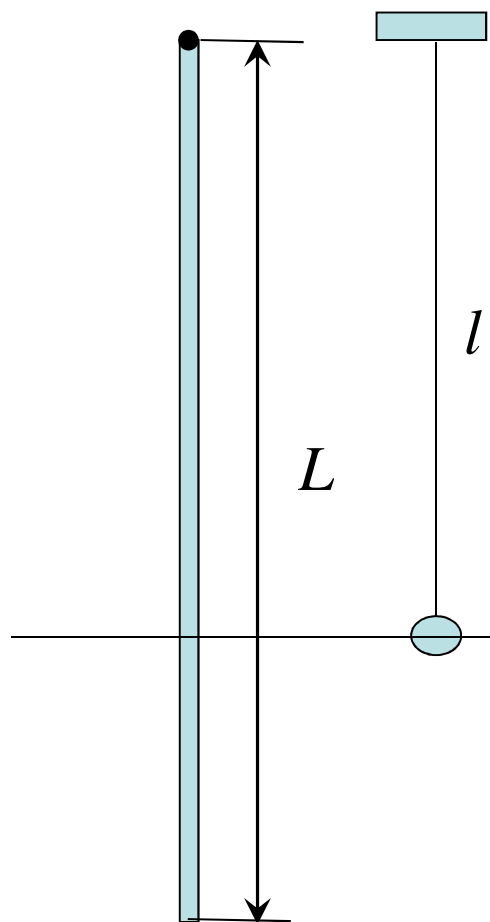
$$I' = md(l-d) + m(l-d)^2 = m(l-d)l$$

Zatem: $T' = 2\pi \sqrt{\frac{m(l-d)l}{mg(l-d)}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = T$

$$\boxed{T=T'}$$

Przy zawieszeniu w punktach O i O' okresy są równe!

Długość zredukowana dla pręta zawieszonego na jednym z końców



$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}}$$

$$I = \frac{1}{3}mL^2 \quad d = \frac{L}{2}$$

$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{2L}{3g}}$$

okres wahań pręta

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

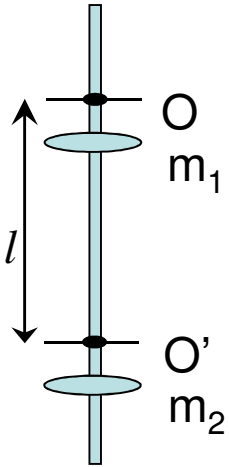
okres wahadła
matematycznego



$$l = \frac{2}{3}L$$

Zawieszając obok siebie pręt i kulkę na nitce o długości $\frac{2}{3}L$ można się przekonać, że okresy ich drgań są równe...

Wahadło rewersyjne



Wahadło składa się z pręta zaopatrzonego w dwie stałe osie pryzmatyczne O i O'

(**osie pryzmatów zwrócone do środka**)

Przesuwając masy m_1 oraz m_2 można zmienić położenie środka ciężkości wahadła. Masy przesuwamy dopóty, dopóki okresy wahań wokół osi O i O' nie zrównają się, wtedy Odległość OO' będzie odpowiadała długości zredukowanej wahadła fizycznego l . Znając odległość $OO' = l$ oraz okres drgań T można wyznaczyć przyspieszenie ziemskie, tak jak zrobił to H. Kater w 1818 r...

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}}$$

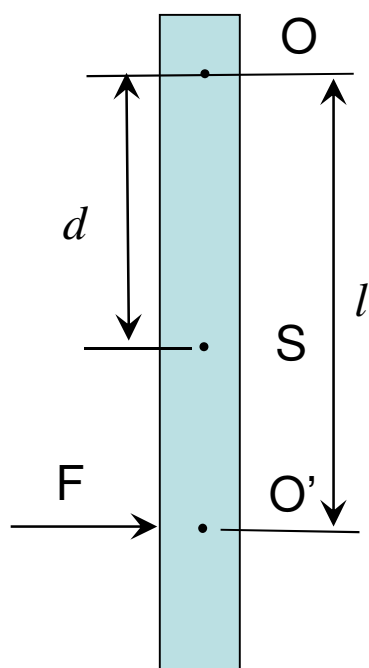
Grawimetria – badanie zmian siły ciężkości w terenie (na jednakowym poziomie lub zależności od wysokości)

(poszukiwanie kopalin, badanie wyrobisk i innych form wewnątrz ziemi...)

Dokładność współczesnych grawimetrów – $10^{-8} g = 0.01 \text{ mGal}$ ($1 \text{ Gal} = 0.01 \text{ N/kg}$)

Uderzenie bryły

W jakiej odległości od punktu O należy uderzyć bryłę, aby bryła podczas uderzenia dokonała obrotu wokół punktu O?



Ruch postępowy środka masy:

$$F = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad Fl = ml \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Aby ruch środka masy można było opisać jako obrót wokół punktu O to powinien być spełniony związek:

$$\Delta v = d \Delta \omega$$

d – odległość środka masy od punktu O
 $\Delta \omega$ - przyrost prędkości obrotowej bryły

$$Fl = mld \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

Fl – moment siły F względem punktu O, więc powinno być spełnione dla ruchu obrotowego bryły...

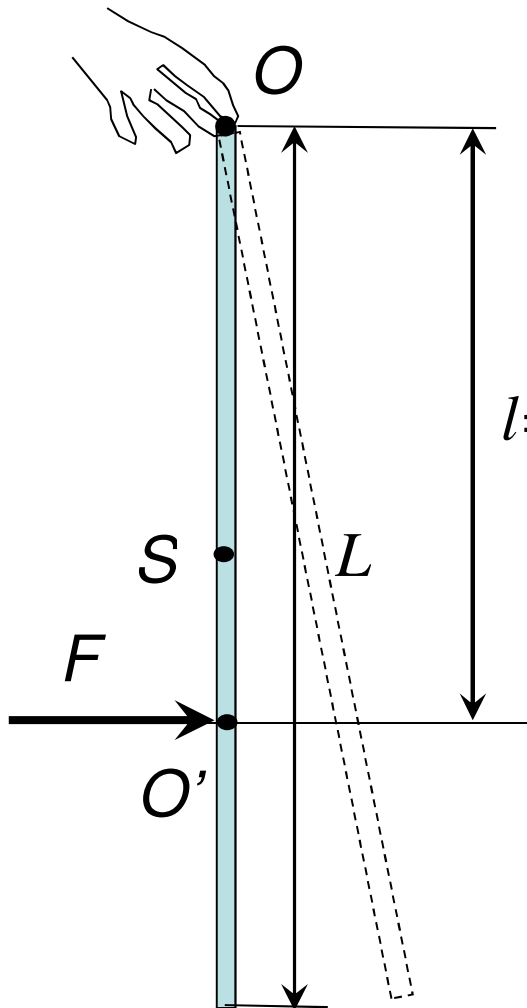
$$Fl = I \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

Zatem:

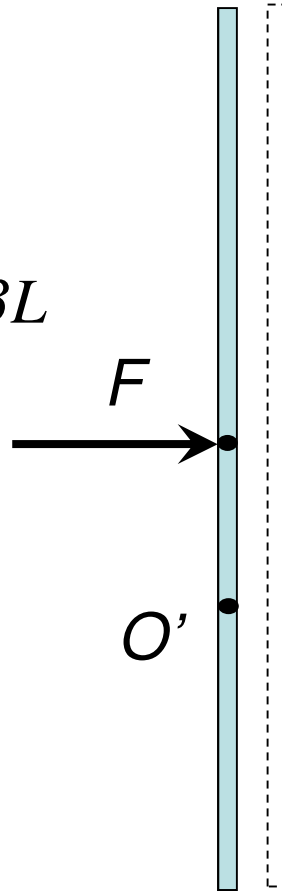
$$l = \frac{I}{md}$$

Czyli bryłę należy uderzyć dokładnie w odległości równej długości zredukowanej wahadła fizycznego...

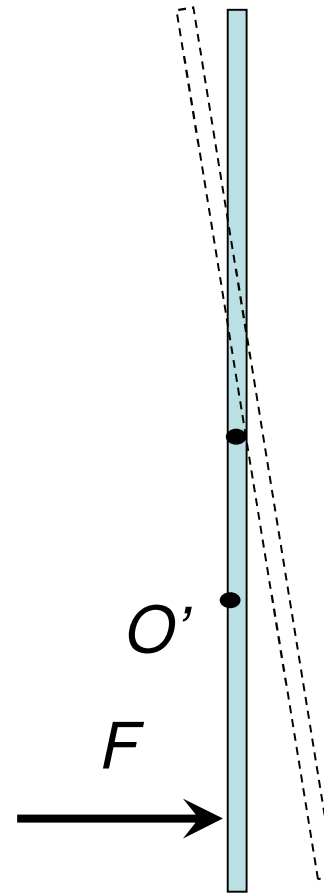
Uderzenie pręta



obrót wokół końca



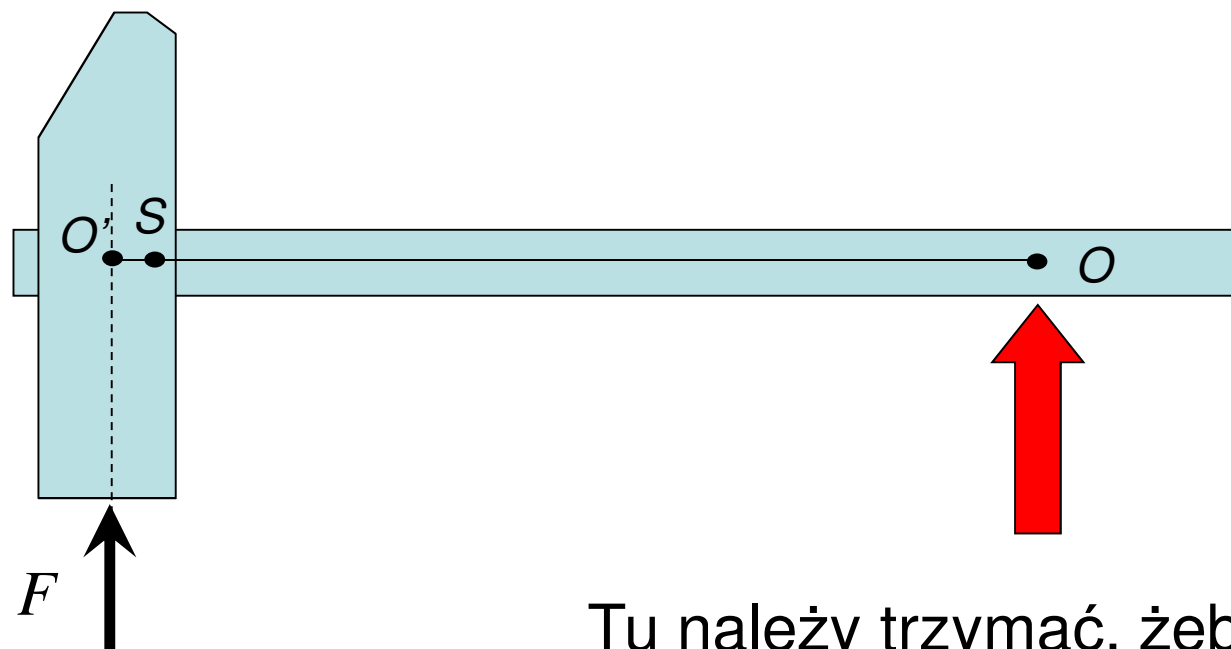
ruch postępowy



koniec pręta się cofa...

O' – środek uderzenia pręta (trzymanego na końcu)

Trzeba uważać gdzie się trzyma
młotek...



Tu należy trzymać, żeby nie bolało!