

Zamiast wagarów, czyli... jeszcze jeden eksperyment! 😊

10 najpiękniejszych eksperymentów z fizyki ([ang. *The Prism and the Pendulum: The Ten Most Beautiful Experiments in Science*](#)) – książka [historyka nauki Roberta P. Crease](#) wydana w 2003 roku. Została sporządzona na podstawie ankiety przeprowadzonej wśród [fizyków](#) z całego świata^[1]. Prezentuje najsłynniejsze i [najpiękniejsze](#) eksperymenty z fizyki:

- 1. Pomiar [Eratostenesa](#) (ok. roku 230 p.n.e.) – pomiar obwodu [Ziemi](#)
- 2. Eksperyment [Galileusza](#) (rok 1600) – [spadek swobodny](#) ciał o różnej [masie](#)
- 3. Eksperyment [Galileusza](#) (rok 1600) – obserwacja ruchu [ciał](#) staczających się z [równi pochyłej](#)
- 4. Eksperyment [Newtona](#) (lata 1665–1666) – [rozszczepienie światła](#) za pomocą [pryzmatu](#)
- 5. Eksperyment [Cavendisha](#) (rok 1798) – wyznaczenie [stałej grawitacji](#) G za pomocą [wagi skręceń](#)
- 6. [Doświadczenie Younga](#) (rok 1801) – [interferencja](#) światła na dwóch szczelinach
- 7. [Wahadło Foucaulta](#) (rok 1851) – doświadczalne potwierdzenie [ruchu obrotowego Ziemi](#)
- 8. Eksperyment [Millikana](#) (rok 1909) – wyznaczenie ładunku [elektronu](#) za pomocą spadającej w [polu elektrycznym](#) kropli oleju
- 9. Eksperyment [Rutherforda](#) (rok 1911) – odkrycie [jądra atomowego](#)
- 10. [Doświadczenie Davissona i Germera](#) (rok 1927) – [dyfrakcja](#) elektronów na kryształach niklu

Inne brane pod uwagę doświadczenia to:

- 11. Eksperyment [Archimedesesa](#) z [hydrostatyki](#) – [wyporność](#) ciała stałego przez ciecz (III w. p.n.e.) – [prawo Archimedesesa](#)
- 12. Obserwacje [Rømera](#) dotyczące [prędkości światła](#) (rok 1676)
- 13. Eksperymenty [Joule’a](#) z aparatem do pomiaru mechanicznego odpowiednika ciepła (rok 1843) – [zasada zachowania energii](#)
- 14. Eksperyment [Reynoldesa](#) – przepływ cieczy przez rurki ([hydrodynamika](#)) – podobieństwo dynamicznego przepływu płynów

Eksperyment Eratostenesa



**ERATOSTHENES
EXPERIMENT**

THE EXPERIMENT

LIVE EVENT

GALLERY

LESSON PLANS

CONTESTS

WELCOME TO
ERATOSTHENES EXPERIMENT
20.03.2025

REGISTRATION NOW IS OPEN

REGISTER HERE!

An IAU100 endorsed project

IAU 100 YEARS: UNDER ONE SKY

INTERNATIONAL
ASTRONOMICAL
UNION
1919 - 2019

ZPE – Jak Eratostenes wyznaczył rozmiar Ziemi?

Jak dziś możemy oszacować rozmiar Ziemi?



- Lokalizacja GPS podaje współrzędne geogr.: np. szerokości

$53^{\circ},02146/53^{\circ},02156$.

- Ta różnica (zmierzona!) to np. 11 metrów, stąd $1^{\circ}=110$ km, więc

$$2\pi R = 360 \cdot 110 = 39600 \text{ km}$$



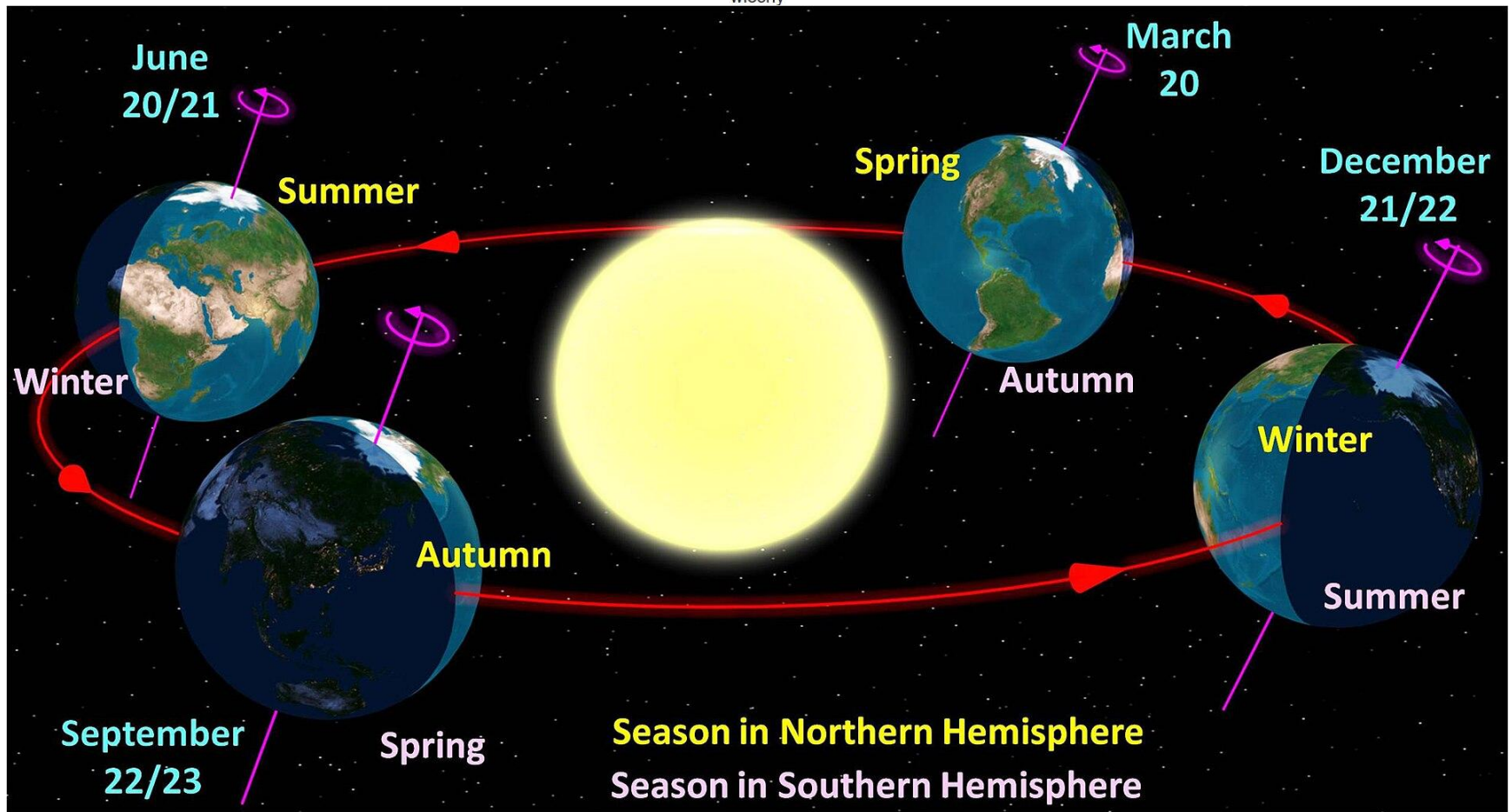
Jak Kopernik obserwował równonoc?



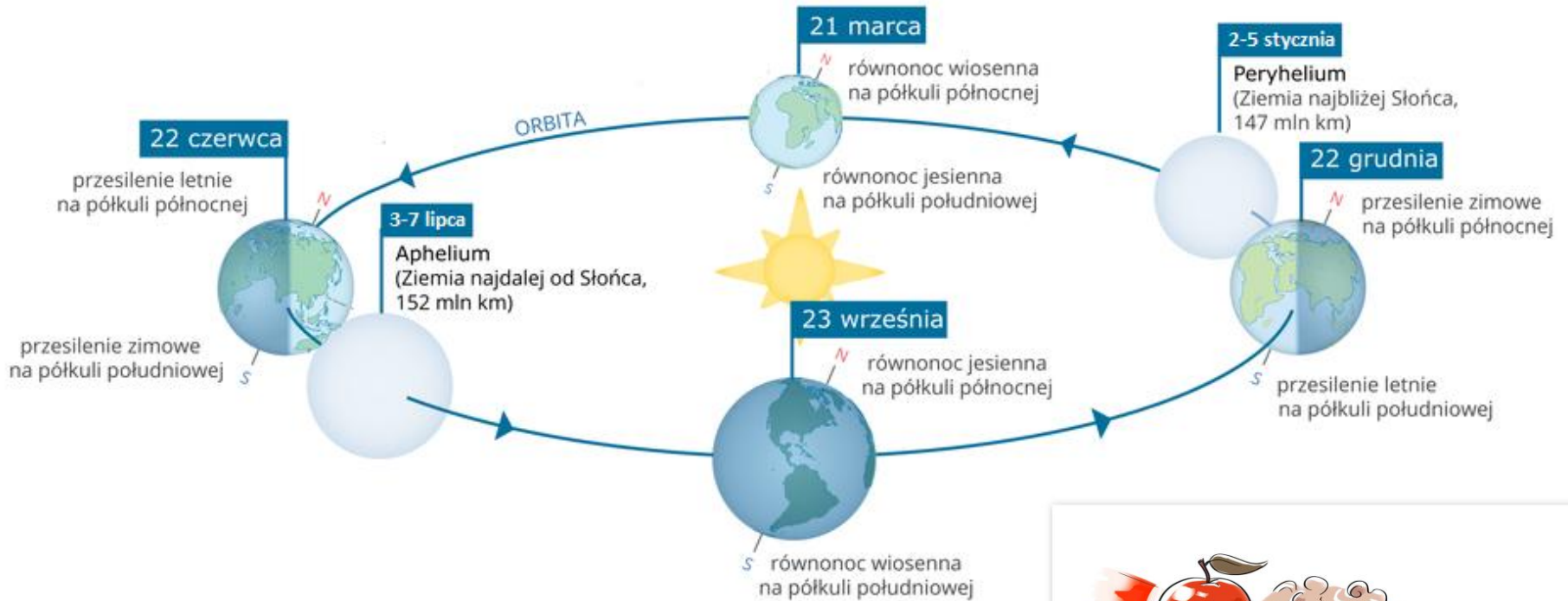
Orbita Ziemi

Podział na pory roku pod względem astronomicznym odbywa się w następujący sposób (dla północnej półkuli Ziemi):

- Wiosna (92–93 dni) zaczyna się 20 marca (rzadziej 21 marca) (**równonoc wiosenna**) i trwa do początku lata
- Lato (92–93 dni) zaczyna się 21 czerwca (rzadziej 20 czerwca) (**przesilenie letnie**) i trwa do początku jesieni
- Jesień (89–90 dni) zaczyna się 22 lub 23 września (**równonoc jesienna**) i trwa do początku zimy
- Zima (88–89 dni) zaczyna się 21 lub 22 grudnia (**przesilenie zimowe**) i trwa do początku wiosny

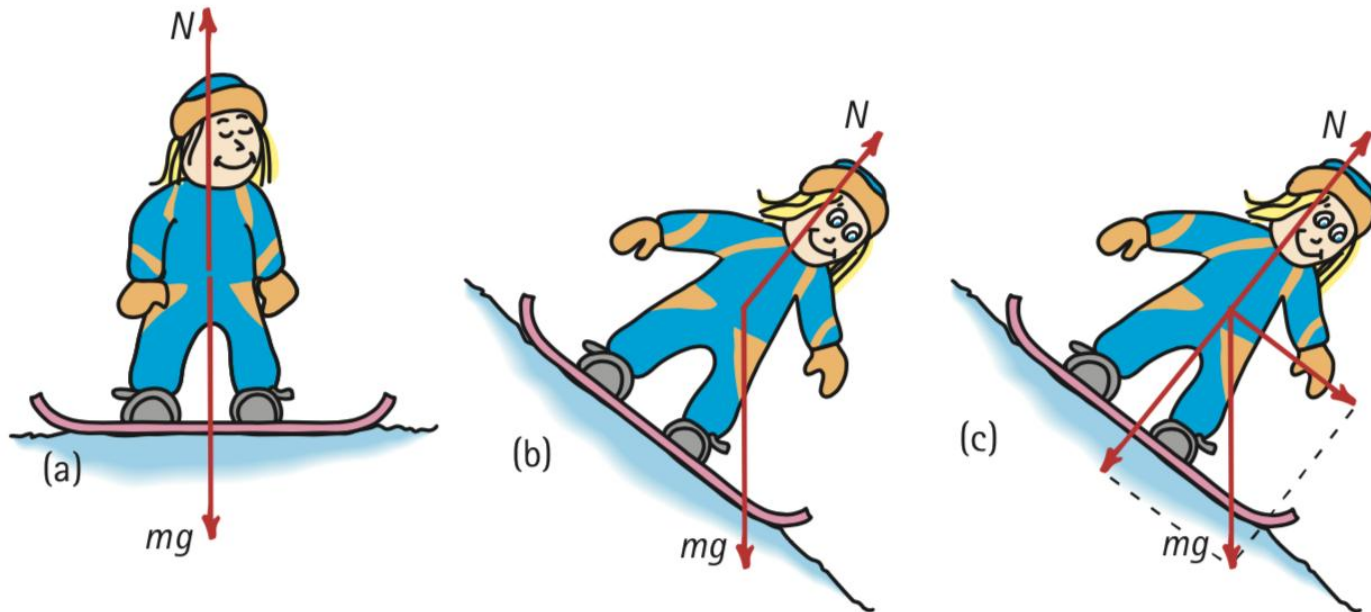


II prawo Keplera! (bliżej = szybciej)



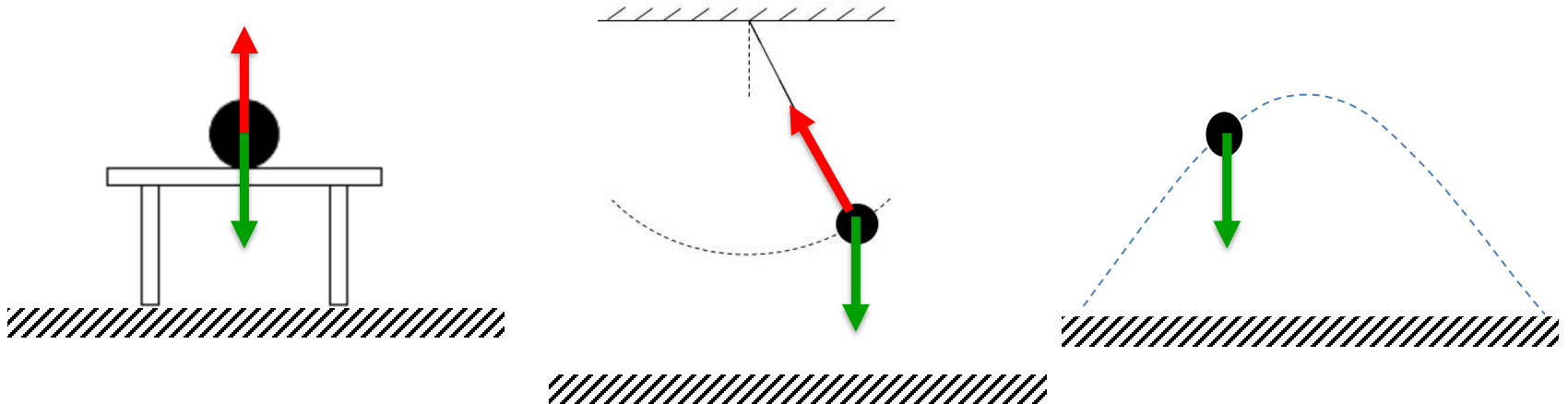
Wykład 3

Siły. Zasady dynamiki Newtona



Co to jest siła?

- Siła jest miarą oddziaływań pomiędzy ciałami. Siła jest wielkością wektorową.
- Aby znaleźć siły działające na dane ciało, należy określić z jakimi innymi ciałami znajduje się ono w bezpośrednim kontakcie. Wszystkie siły wymagające bezpośredniego kontaktu nazywamy siłami kontaktowymi. Gdy ciała utracą kontakt, wtedy nie oddziałują już ze sobą (siła nie jest magazynowana).
- Istnieją siły specjalne, które nie wymagają bezpośredniego kontaktu: grawitacja, siły elektryczne, siły magnetyczne.



- Siła nie jest źródłem ruchu; siła odpowiada za zmianę ruchu - o czym mówi Pierwsza Zasada Dynamiki Newtona ...



ISAAC NEWTON (1642–1727)

I zasada dynamiki Newtona

Każde ciało pozostaje w spoczynku lub porusza się ze stałą prędkością po linii prostej dopóki nie zadziała na nie niezrównoważona siła z zewnątrz.



Galileusz 1564 - 1642

Jeśli $\sum_i \vec{F}_i = \vec{0} \quad \longrightarrow \quad v = 0 \text{ lub } \vec{v} = \text{const}$

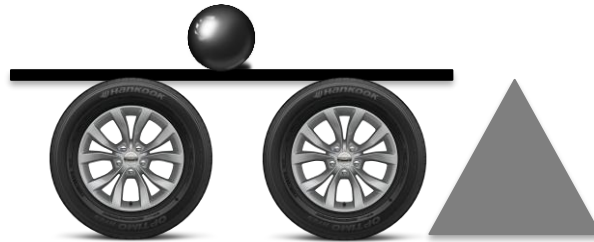


Skrócony zapis sumy

$$\sum_{i=1}^3 \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

Układy inercjalne i nieinercjalne

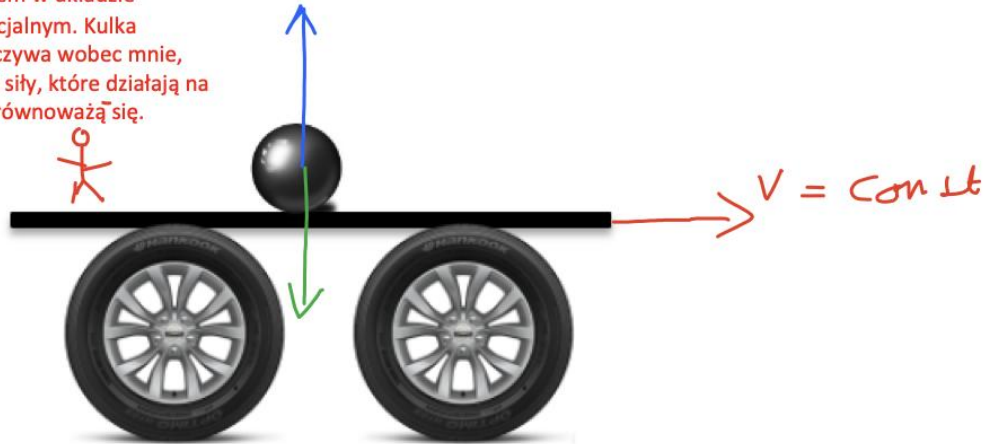
- Prawo Newtona obowiązuje tylko w specjalnych układach odniesienia – tzw. układach inercjalnych!
- Prawa Newtona nie obowiązuje w układach odniesienia, które są przyspieszane! – są to układy nieinercjalne.



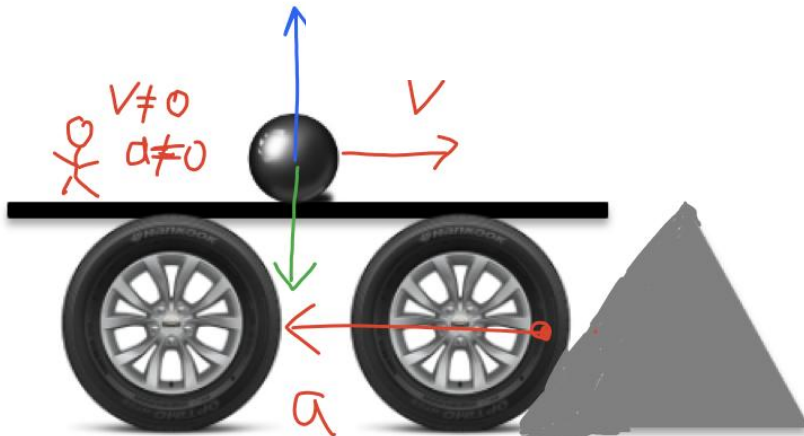
Rozpędzony wózek i spoczywająca na nim kulka zderzają się z przeszkodą. Wózek zatrzymuje, kulka kontynuuje jednak ruch. W układzie związanym z wózkiem nie można jednak zdefiniować siły, która przyspieszyła kulkę, bo nie można zdefiniować ciała, które by takie oddziaływanie wywołało. Wózek w czasie hamowania jest nieinercyjnym układem odniesienia!

Układy inercjalne i nieinercjalne

Jestem w układzie inercjalnym. Kulka spoczywa wobec mnie, czyli siły, które działają na nią równoważą się.



Jestem w układzie inercjalnym. Kulka porusza się wobec mnie ze stałą prędkością po linii prostej, czyli siły, które działają na nią równoważą się.



Nie wiem dlaczego kulka poruszyła się? Nagle przyspieszyła. Na kulkę wciąż działają te same siły, które się równoważą - dlaczego więc przyspieszyła? Nie potrafię zdefiniować ciała i siły, które nadały przyspieszenie tej kulce. Pierwsza zasada dynamiki nie obowiązuje. Muszę być w układzie nieinercjalnym.

Jestem w układzie inercjalnym. Kulka kontynuuje swój ruch po linii prostej ze stałą prędkością, siły nadal się równoważą, wszystko jest OK.

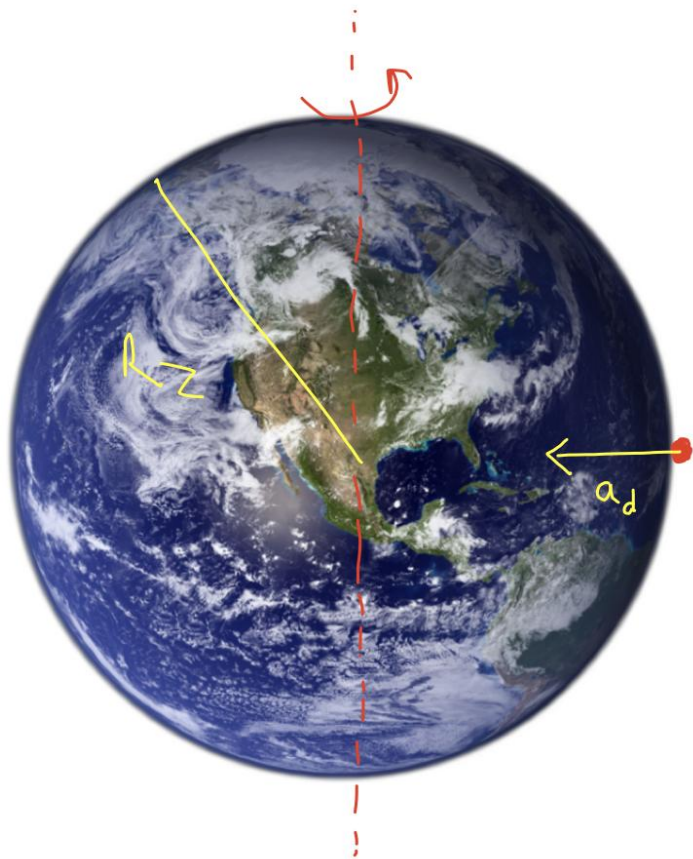


Czy Ziemia jest inercjalnym układem odniesienia?



Nie, bo występują przyspieszenia dośrodkowe związane z ruchem obrotowym Ziemi wokół własnej osi, z ruchem obiegowym wokół Słońca, z ruchem wokół środka galaktyki... - ale efekty związane z tymi przyspieszeniami są bardzo małe na powierzchni Ziemi, wobec czego można Ziemię z dobrym przybliżeniem traktować jak inercjalny układ odniesienia dla wielu zjawisk zachodzących na jej powierzchni.

Czy Ziemia jest inercyjnym układem odniesienia?



$$T = 24h = 24 \cdot 3600s = 86400s$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{86400} \frac{1}{s}$$

$$R_z = 6400 \text{ km} = 6400000 \text{ m}$$

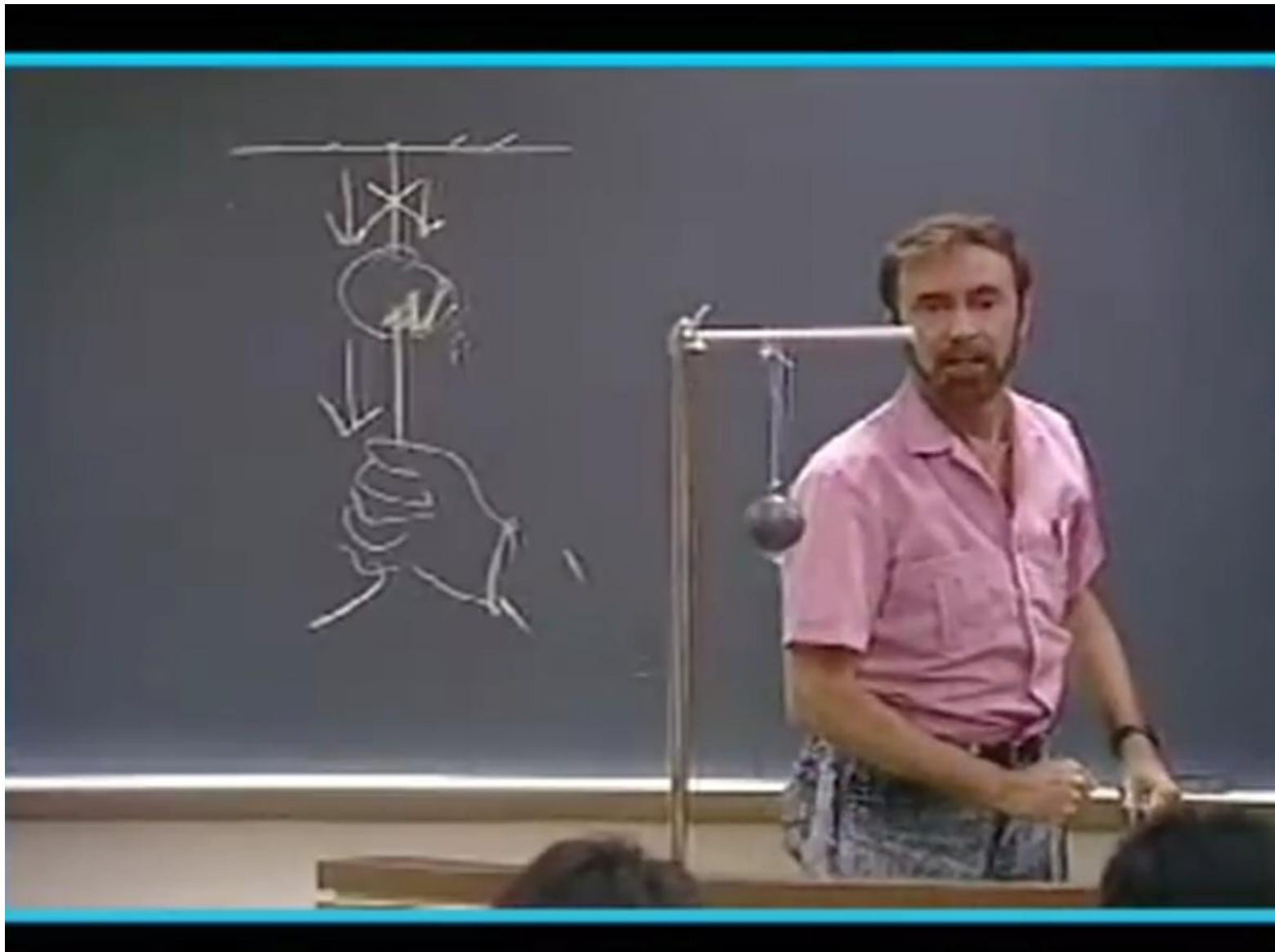
$$a_d = \omega^2 R_z \approx \underline{\underline{0.034 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \ll g \approx 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Bezwładność

- Bezwładność (ang. *inertia*) to tendencja ciała do zachowania aktualnego stanu swojego ruchu (pozostania w spoczynku lub poruszania się po linii prostej ze stałą prędkością). Bezwładność można również interpretować jako opór na zmianę stanu ruchu wywołany siłą – miarą bezwładności jest masa ciała. Im większa masa tym ciało stawia większe opór czynnikom (siłom) dążącym do zmiany stanu ruchu.



Bezwładność w akcji



<https://www.youtube.com/watch?v=aCqQzrPCcFM>

Bezwładność w akcji

Gazeta = 4000 cm^2 , ciśnienie atmosferyczne na każdy cm^2 jest równoważne naciskowi 1 kg powietrza, czyli ciśnienie na całą gazetę jest równoważne naciskowi 4 ton



<https://www.youtube.com/watch?v=Za3DGUEpW2U>

II zasada dynamiki Newtona

Siła wypadkowa działająca na ciało nadaje mu przyspieszenie w kierunku tej siły o wartości wprost proporcjonalnej do wartości tej siły i odwrotnie proporcjonalnej do masy ciała.

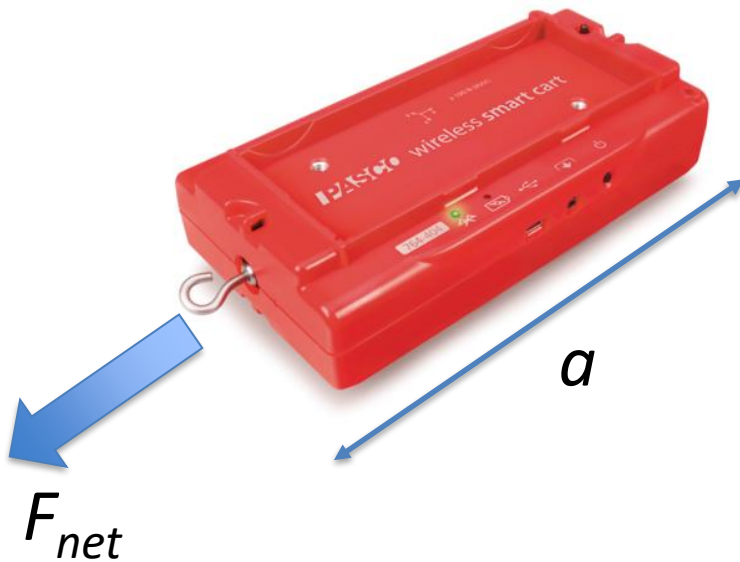
$$\vec{a} = \frac{\sum_i \vec{F}_i}{m}$$

Prawo słuszne tylko w układach inercjalnych, ale nie zawsze! Gdy prędkość ciała jest bliska prędkości światła w próżni to II zasada dynamiki w podanej formie przestaje być słuszna (trzeba stosować teorię względności Einsteina).

II zasada dynamiki Newtona

Eksperymentalna weryfikacja

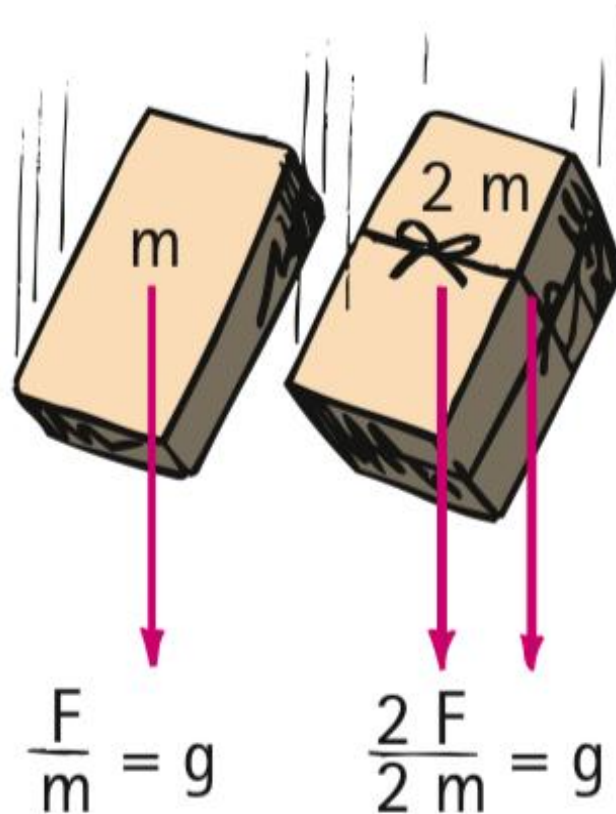
$$F_{net} = ma$$



II zasada dynamiki Newtona

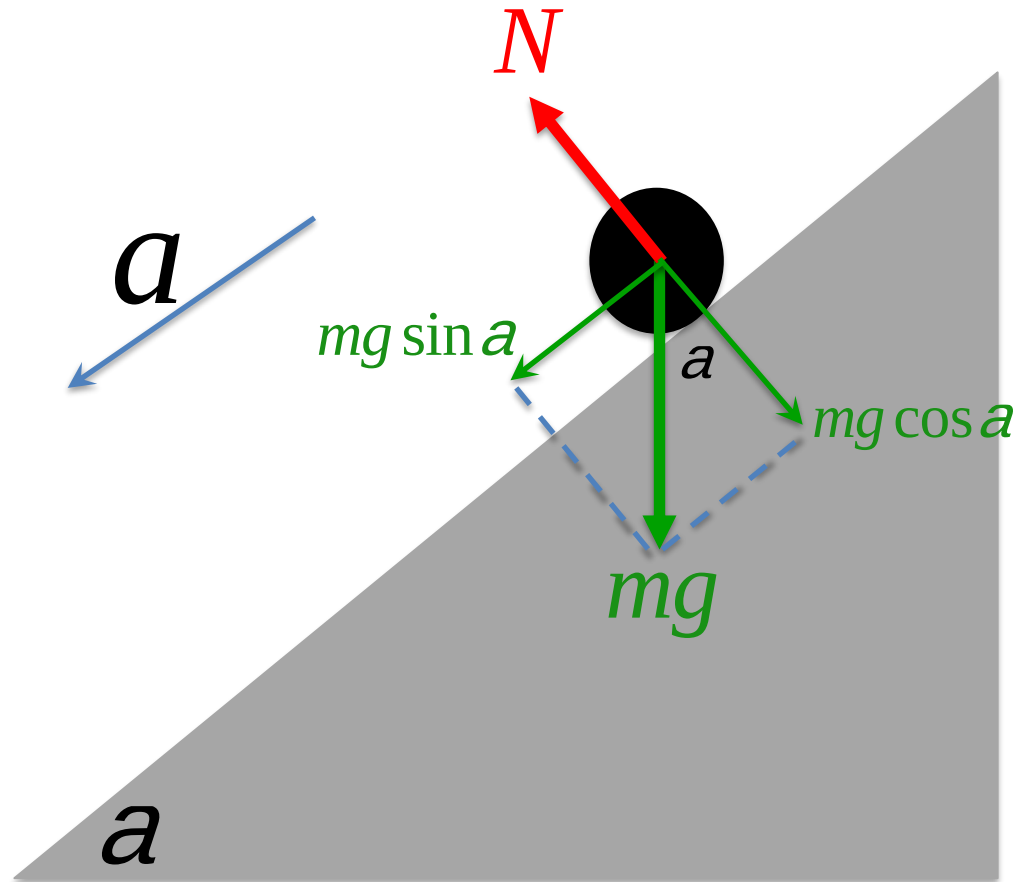
- prosty przykłady zastosowania

Spadek swobodny lub rzuty ukośne – działa tylko jedna siła - grawitacja (zaniedbując opory powietrza)



II zasada dynamiki Newtona - przykłady zastosowania

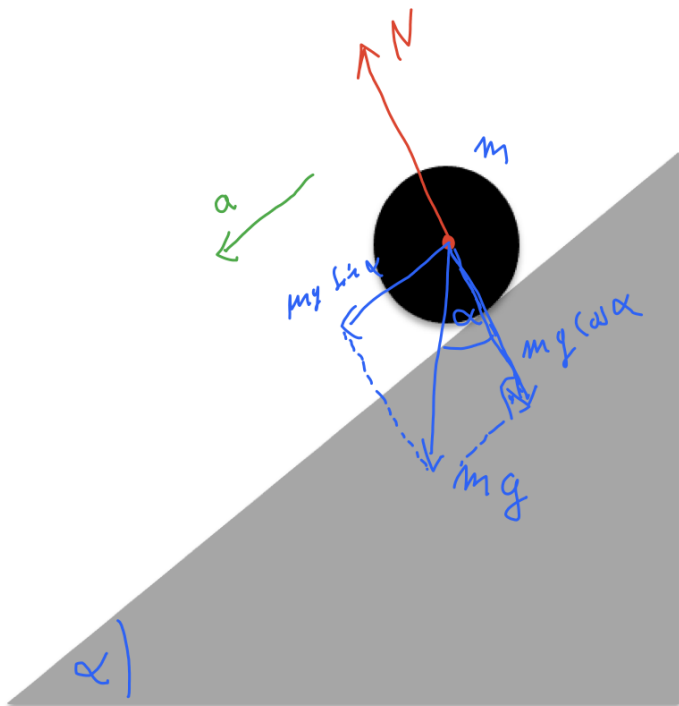
Napisz wektorową i algebraiczną postać II zasady dynamiki Newtona dla ciała zjeżdżającego w dół po równi pochyłej:



Napisz wektorową i algebraiczną postać II zasady dynamiki Newtona dla ciała zjeżdżającego w dół po równi pochyłej:

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = m \vec{a}$$

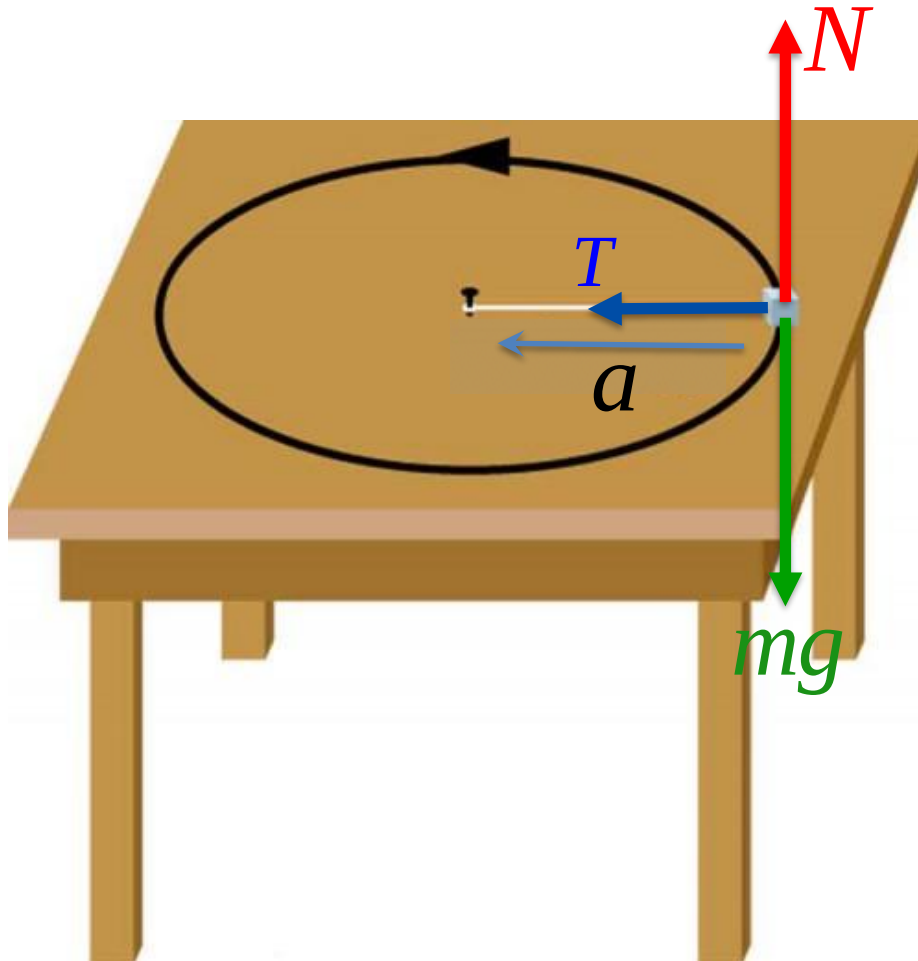
$$\vec{N} + m \vec{g} = m \vec{a} \quad (\text{II ZASADA DYN.})$$



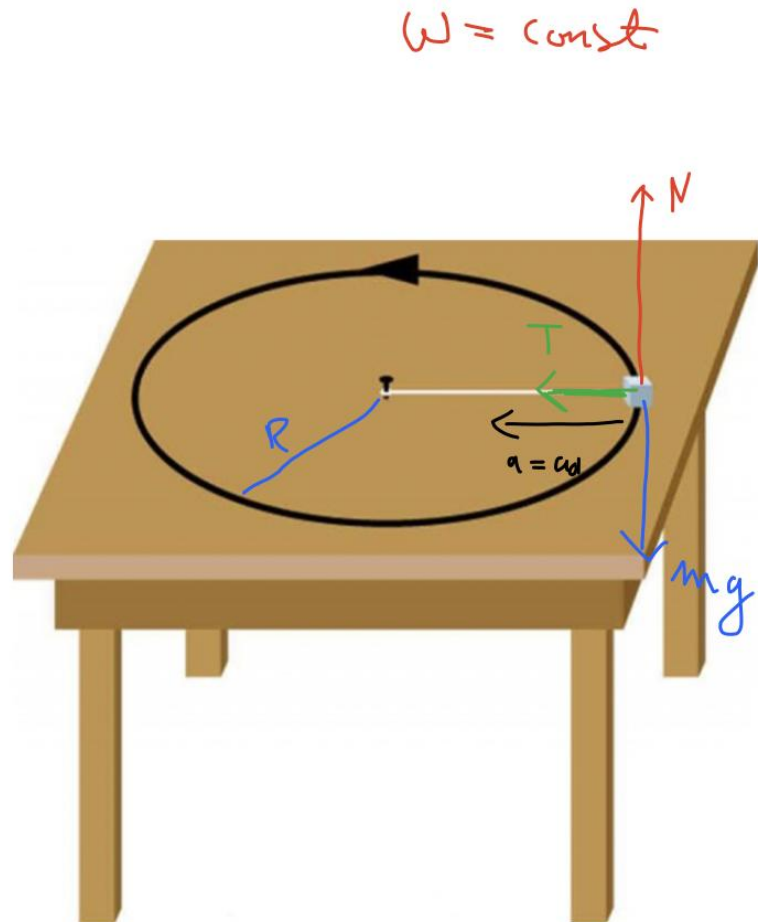
$$\begin{cases} N - mg \cos \alpha = 0 \\ mg \sin \alpha = m a \end{cases}$$

II zasada dynamiki Newtona - przykłady zastosowania

Napisz algebraiczną postać II zasady dynamiki Newtona dla poruszającego się po okręgu ze stałą prędkością kątową ω po idealnie gładkim stole:



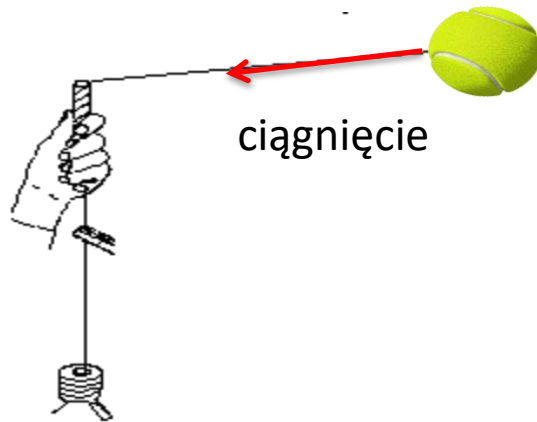
Napisz wektorową i algebraiczną postać II zasady dynamiki Newtona dla ciała zjeżdżającego w dół po równi pochyłej:



$$\vec{N} + m\vec{g} + \vec{T} = m\vec{a} = m\vec{a}_d$$
$$\vec{N} \perp \vec{a}, \quad m\vec{g} \perp \vec{a}, \quad \vec{T} \parallel \vec{a}$$

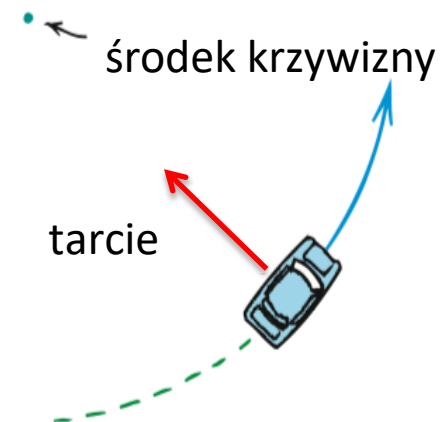
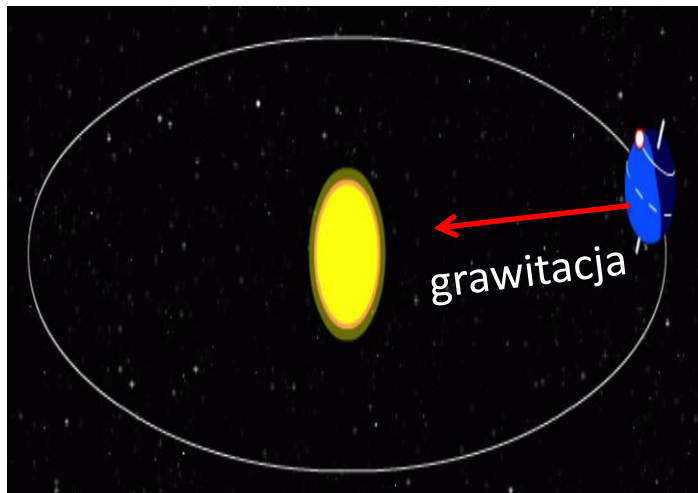
$$\begin{cases} N - mg = 0 \\ T = ma = m\omega^2 R \end{cases}$$

Co zmusza ciała do ruchu po okręgu?



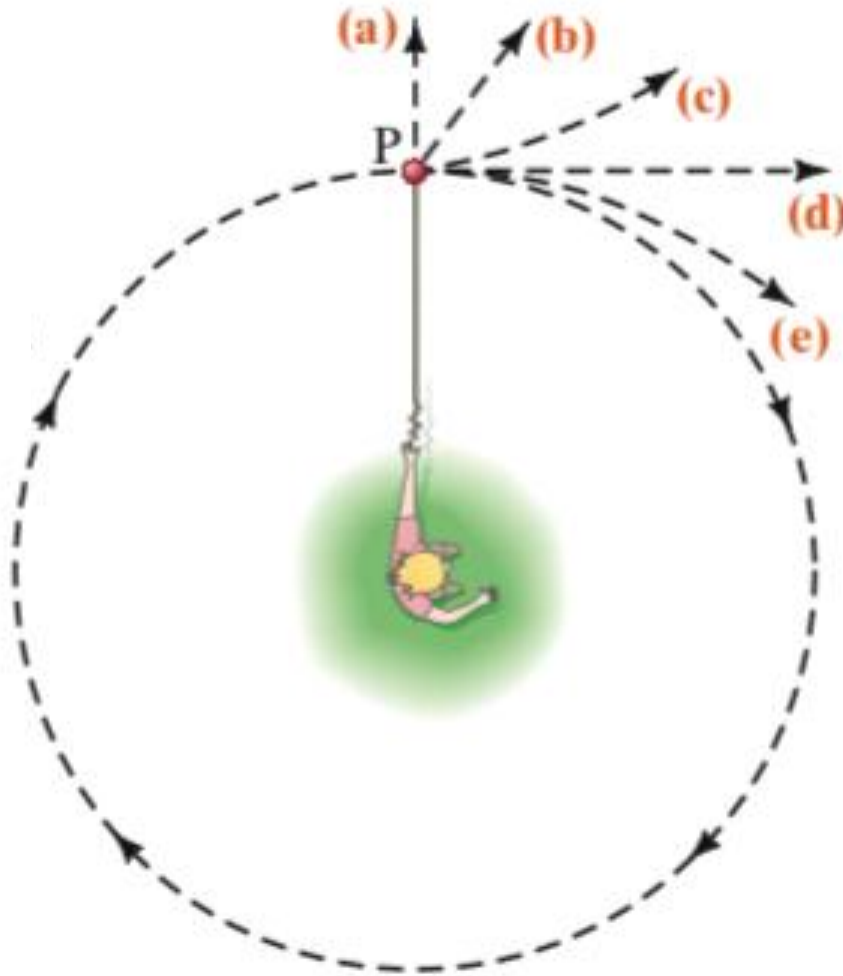
SIŁY DOŚRODKOWE - ZAWSZE SKIEROWANE DO ŚRODKA OKRĘGU!

SIŁY DOŚRODKOWE TO RELANE SIŁY MIĘDZY CIAŁAMI – ZAWSZE WYSTĘPUJĄ GDY CIAŁO PORUSZA SIĘ PO OKRĘGU !

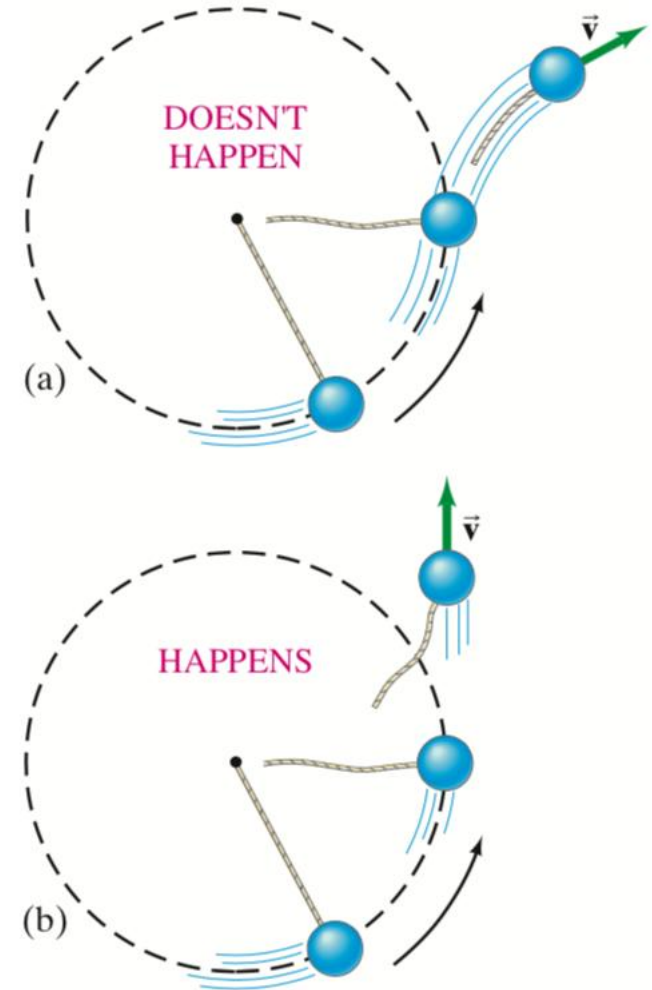


Jaką ścieżką podaży ciało w momencie, gdy linka pęknie?

Każde ciało zawsze „chce” poruszać się po linii prostej ze stałą prędkością (zasada bezwładności)
– tylko oddziaływanie z innym ciałem może zmienić prędkość ciała (kierunek i wartość).



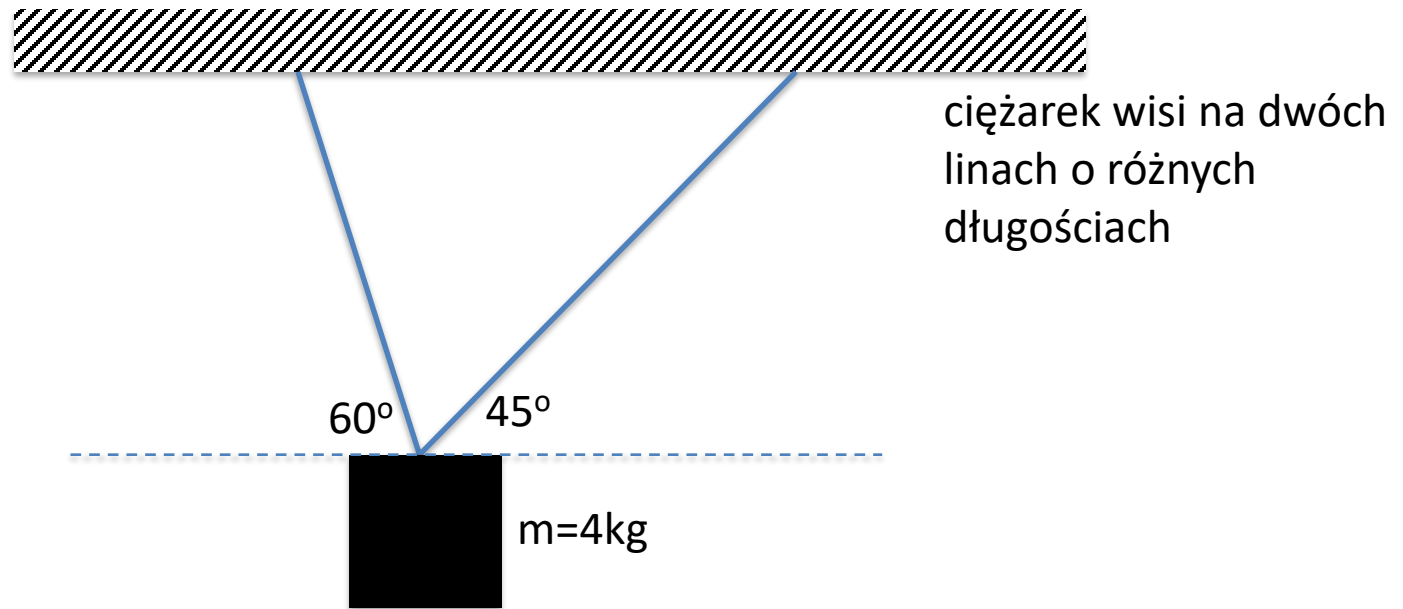
Odp: ***d***



II zasada dynamiki Newtona

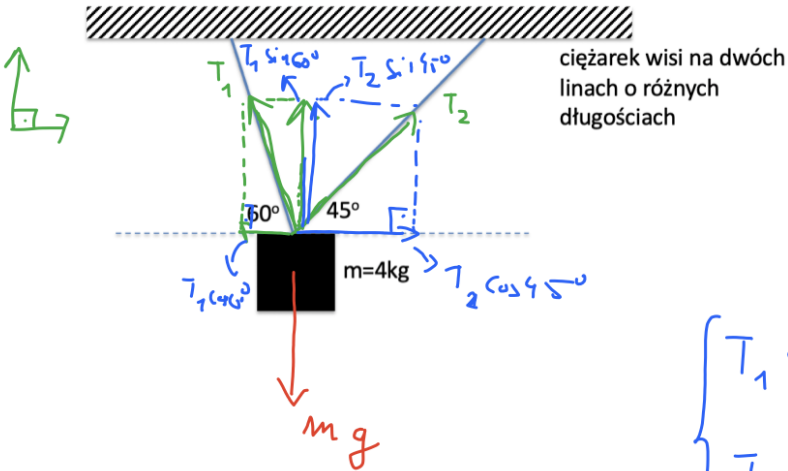
- przykłady zastosowania

Wyznaczyć naprężenie lin



Wyznaczyć naprężenie lin

$$g \approx 10 \frac{m}{s^2}$$



$$T_1, T_2 = ?$$

$$\vec{T}_1 + \vec{T}_2 + m\vec{g} = m\vec{a} = \vec{0}$$

$$\begin{cases} T_1 \sin 60^\circ + T_2 \sin 45^\circ - mg = 0 \\ T_1 \cos 60^\circ - T_2 \cos 45^\circ = 0 \end{cases}$$

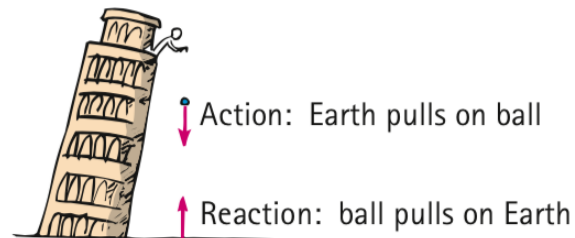
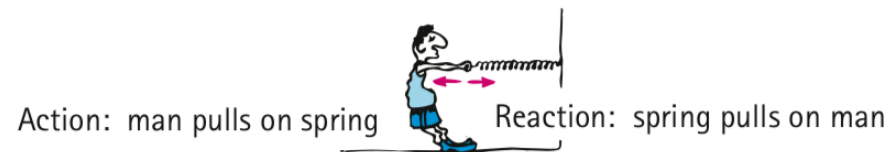
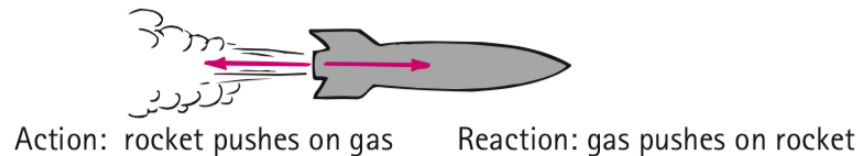
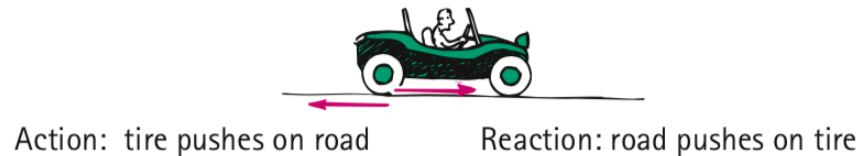
$$T_1 = \frac{2mg}{\sqrt{3} + 1} = 29.28 \text{ N}$$

$$T_2 = 20.71 \text{ N}$$

III zasada dynamiki Newtona

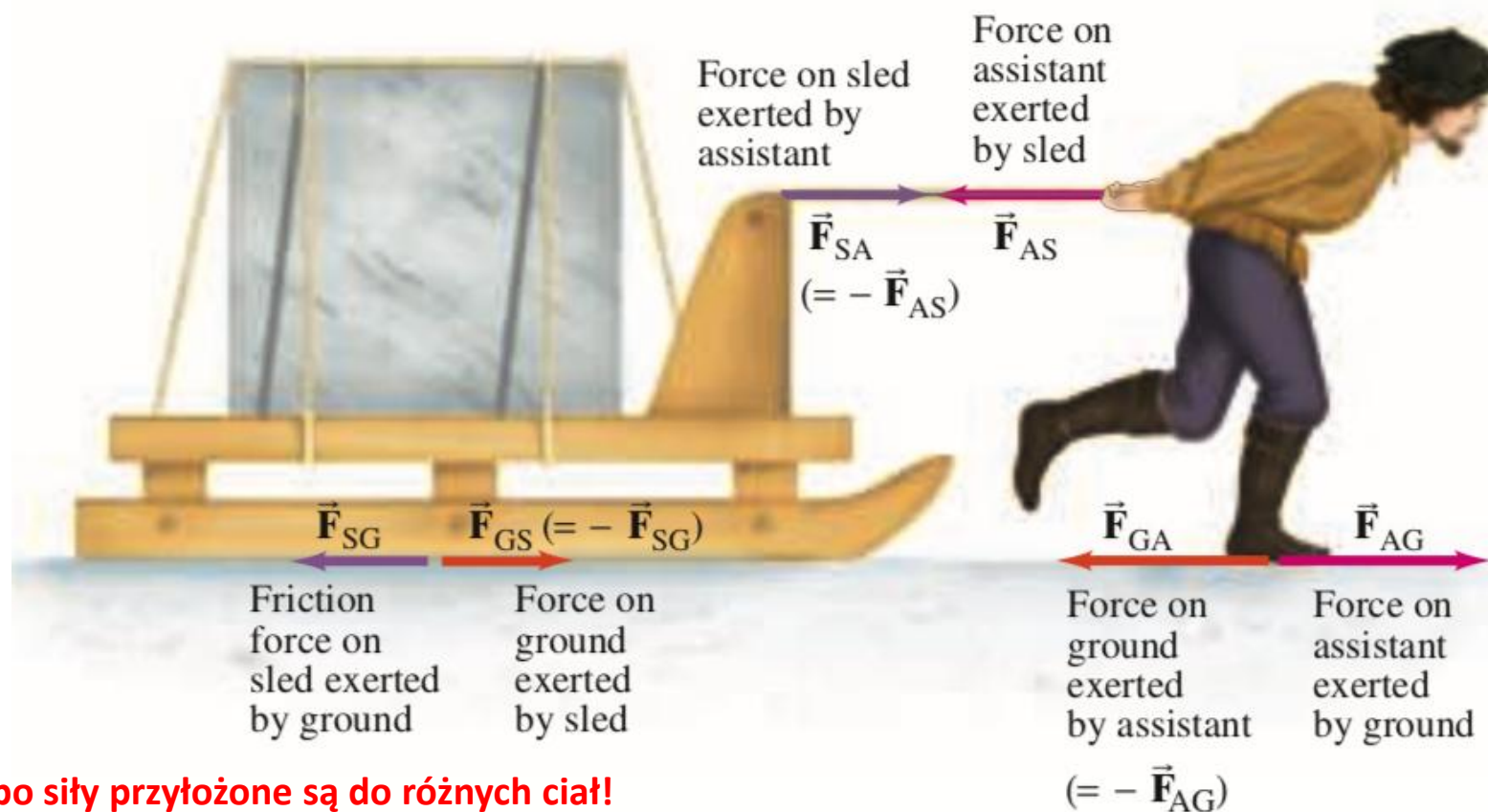
Jeśli ciało A działa jakąś siłą na ciało B, to ciało B wywiera na ciało A siłę równą co do wielkości i przeciwnie skierowaną.

Każda akcja spotyka się z równą jej (i przeciwnie skierowaną) reakcją.



Asystentowi artyści przydzielono zadanie przemieszczenia bryły marmuru za pomocą sań. Asystent chcąc uniknąć pracy stwierdził: "Kiedy wywieram siłę na sanie, sanki wywierają równą i przeciwną siłę na mnie. W jaki więc sposób mogę poruszyć sanie? Bez względu na to, jak mocno będę ciągnął linę, siła reakcji sań zawsze będzie równa mojej sile, a więc siła wypadkowa musi wynosić zero. Nigdy nie będę w stanie przenieść tego ładunku."

Czy jest to poprawny tok rozumowania?

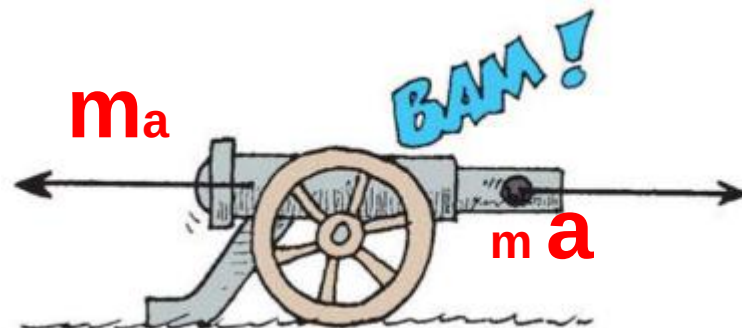


**Nie – bo siły przyłożone są do różnych ciał!
Rozpatrując ruch ciała, uwzględniam tylko siły
przyłożone do tego ciała.**

III zasada dynamiki



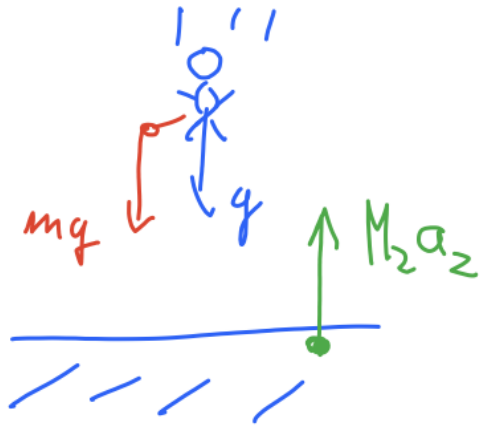
Podczas zderzenia samochodu z ciężarówką siły ich wzajemnego oddziaływania są jednakowe. Czy uszkodzenia są takie same? @ P.G. Hewitt, *Fizyka wśród nas*



Siła odrzutu armaty jest taka sama jak siła wywierana na pocisk. Dlaczego zatem pocisk ma większe przyspieszenie? @ P.G. Hewitt, *Fizyka wśród nas*

$$m_a = m a$$

duża masa x małe przyspieszenie = mała masa x duże przyspieszenie



$$mg = M_2 a_2$$

$$m = 100 \text{ kg}$$

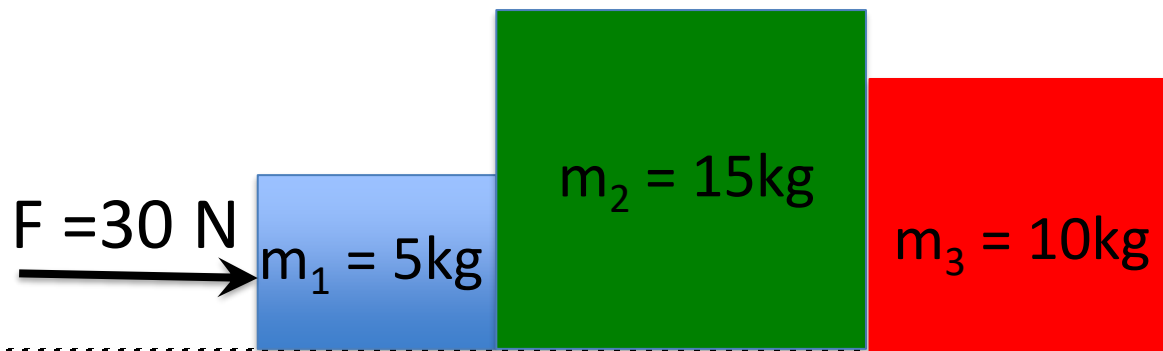
$$g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$M_2 = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$$

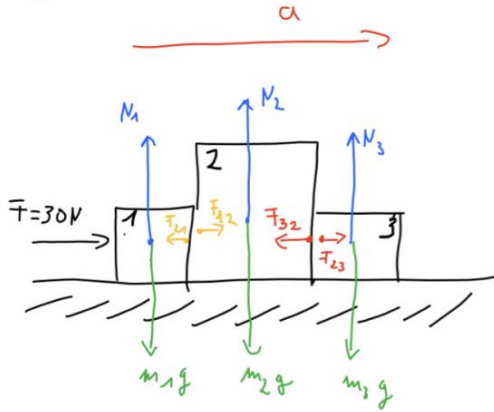
$$a_2 = \frac{1}{6} \times 10^{-21} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

III zasada dynamiki - przykład zastosowania

Z jaką siłą klocek 3 działa na 2?



$$\vec{F}_{32} = ?$$



$$\begin{aligned} N_1 &= m_1 g \\ N_2 &= m_2 g \\ N_3 &= m_3 g \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_1 &= 5 \text{ kg} \\ m_2 &= 15 \text{ kg} \\ m_3 &= 10 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\vec{F}_{32} = ?$$

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad \vec{F}_1 + m_1 \vec{g} + \vec{F} + \vec{F}_{21} &= m_1 \vec{a} \\ \textcircled{2} \quad \vec{N}_2 + m_2 \vec{g} + \vec{F}_{12} + \vec{F}_{32} &= m_2 \vec{a} \\ \textcircled{3} \quad \vec{N}_3 + m_3 \vec{g} + \vec{F}_{23} &= m_3 \vec{a} \end{aligned}$$

III ZASADA DYM. NEWT.

$$\begin{cases} F - F_{21} = m_1 a \\ F_{12} - F_{32} = m_2 a \\ F_{23} = m_3 a \end{cases}$$

$$\begin{aligned} F_{21} &= F_{12} \\ F_{32} &= F_{23} \end{aligned}$$

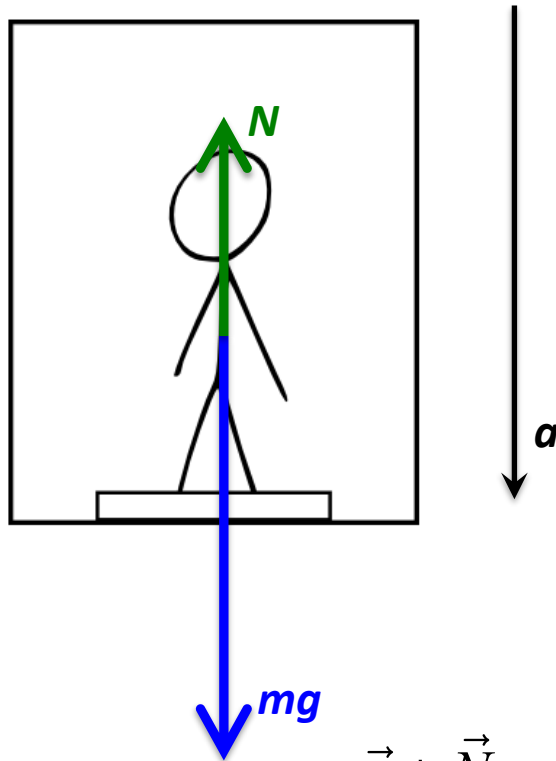
$$\begin{aligned} F &= (m_1 + m_3 + m_2) a \\ a &= \frac{F}{m_1 + m_2 + m_3} = \frac{30 \text{ N}}{30 \text{ kg}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{aligned}$$

$$\vec{F}_{23} = m_3 a = 10 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 10 \text{ N} = \vec{F}_{32}$$

Siły bezwładności (pozorne)

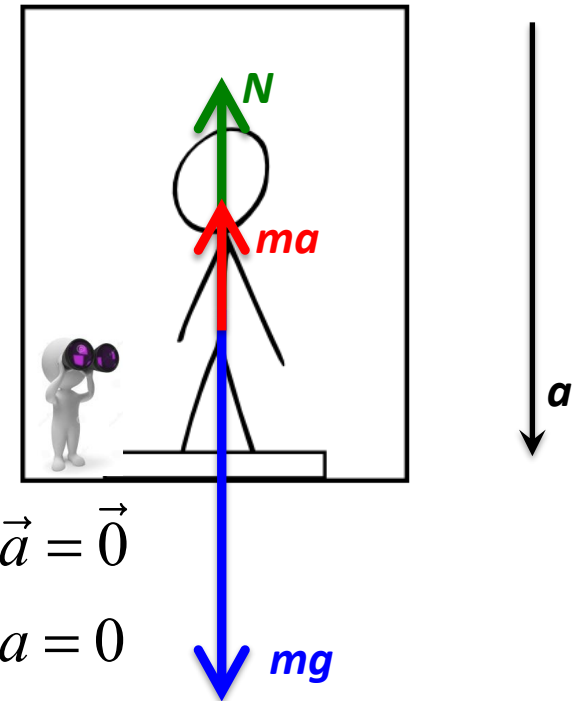
Zasady dynamiki Newtona można stosować w układach nieinercjalnych stosując siły pozorne (bezwładności).

Opis sił w układzie inercyjnym



$$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$$
$$mg - N = ma$$

Opis sił w układzie nieinercyjnym



$$m\vec{g} + \vec{N} + m\vec{a} = \vec{0}$$

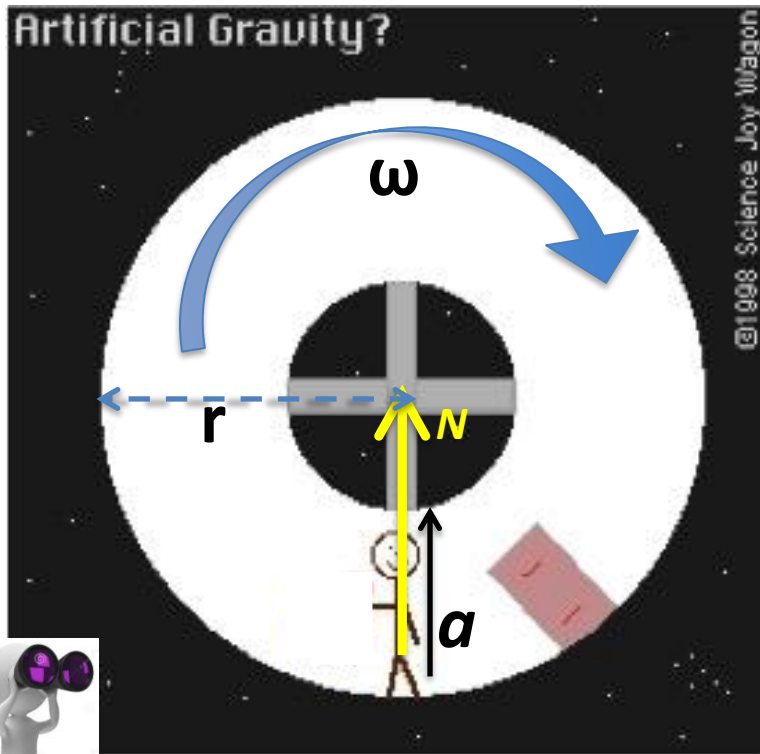
$$mg - N - ma = 0$$

Wartość siły bezwładności równa jest sile jaką nadawałaby ciału przyspieszenie nieinercyjnego układu odniesienia, w którym to ciało się znajduje. Siła bezwładności ma zwrot przeciwny do przyspieszenia układu nieinercyjnego.

Siły bezwładności (pozorne)

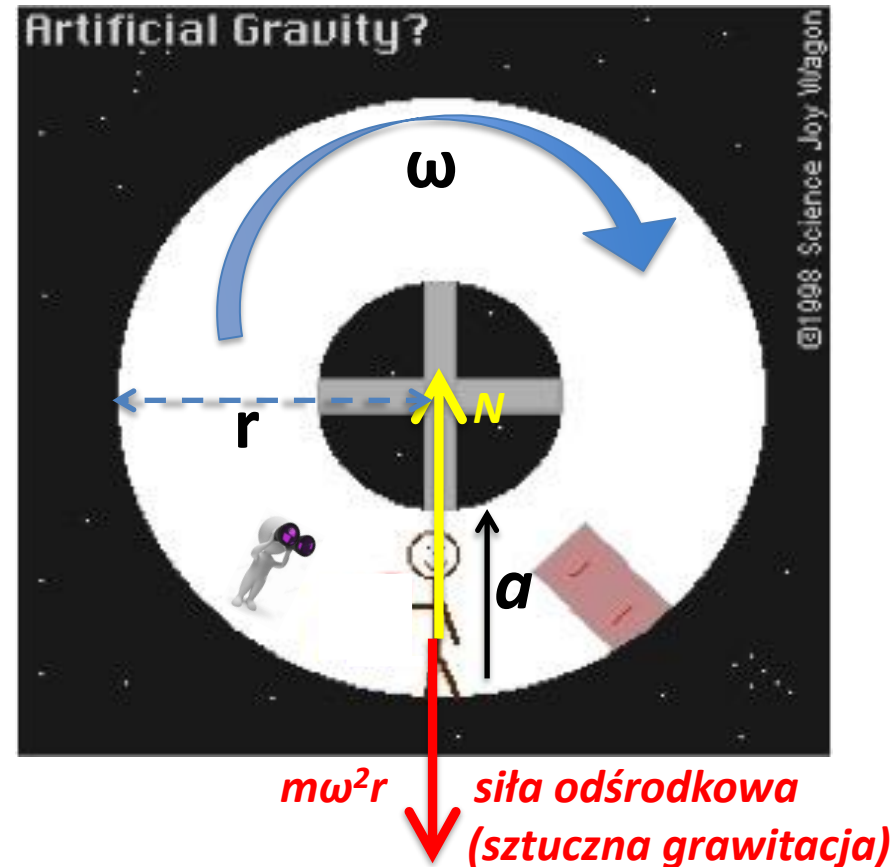
- np. tzw. siła odśrodkowa
(zwana czasami sztuczną / odczuwalną grawitacją)

Opis sił w układzie inercyjnym



$$N = ma = m\omega^2 r$$

Opis sił w układzie nieinercyjnym



$$N - m\omega^2 r = 0$$

Inercjalne i nieinercjalne układy odniesienia - rozwiązywanie problemów

Przy rozwiązywaniu zagadnień mechanicznych mamy dwie drogi do wyboru:

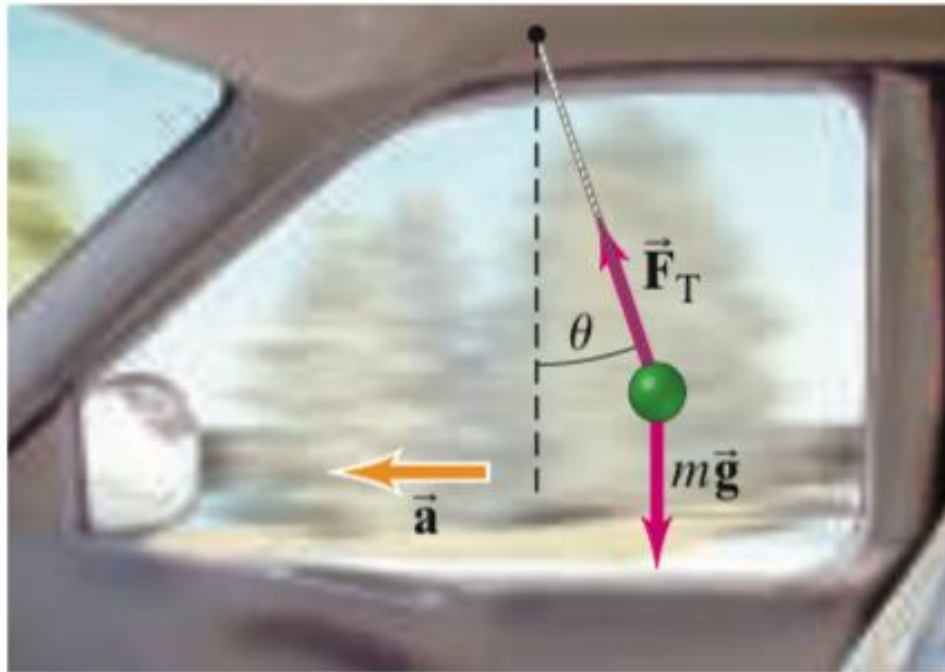
1. możemy wybrać *układ inercjalny* jako układ odniesienia i rozważyć jedynie siły rzeczywiste działające na ciało, tzn. siły wywierane przez konkretne ciała znajdujące się w otoczeniu ciała badanego
2. możemy wybrać *nieinercjalny układ* odniesienia i rozważyć nie tylko siły rzeczywiste, lecz również odpowiednio zdefiniowane siły bezwładności

Wybór jednej z tych możliwości jest kwestią wygody.

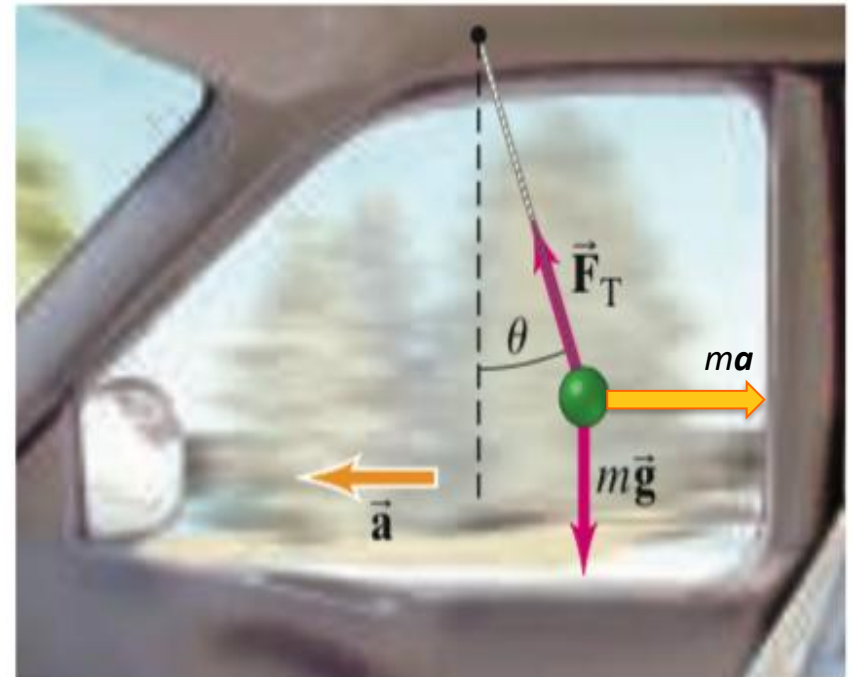
Rozwiązywanie problemów dynamiki w układach inercjalnych i nieinercjalnych

O jaki kąt θ wychyli się kulka zawieszona na lince wewnątrz samochodu, który porusza się z przyspieszeniem $a = 1.20 \text{ m/s}^2$?

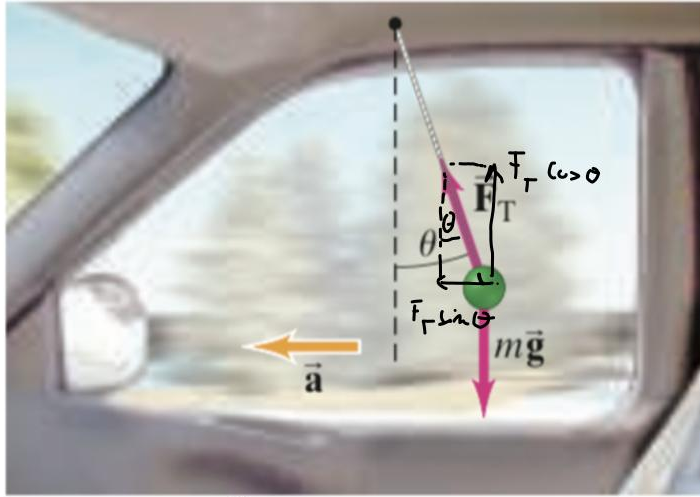
Opis sił w układzie inercjalnym



Opis sił w układzie nieinercyjnym



Opis sił w układzie inercyjnym

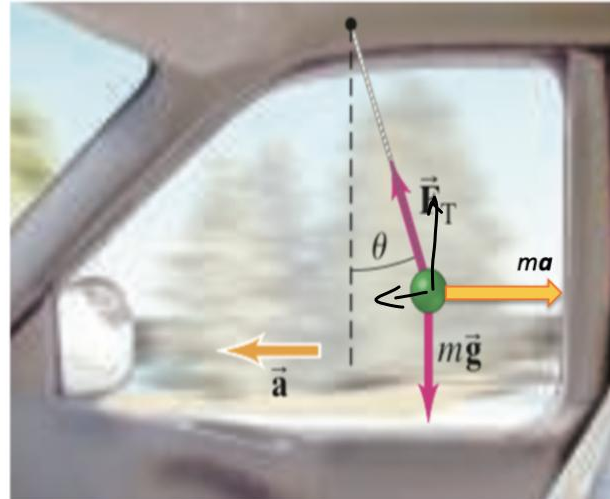


$$\vec{F}_T + m\vec{g} = m\vec{a}$$

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

$$F_T \sin \theta = ma$$

Opis sił w układzie nieinercyjnym



$$\vec{F}_T + m\vec{g} + m\vec{a} = \vec{0}$$

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

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



$$\begin{cases} F_T \cos \theta = mg \\ F_T \sin \theta = ma \end{cases}$$

$$\frac{F_T \sin \theta}{F_T \cos \theta} = \frac{ma}{mg} \Rightarrow \tan \theta = \frac{a}{g}$$

ZPE - ćwiczenia

- Badanie zachowania ciał pod wpływem przyłożonych sił
- Wyznaczanie wartości sił działających na ciało na podstawie pomiaru parametrów ruchu j.p.
- II zasada dynamiki
- Pomiar parametrów ruchu jednostajnie przyspieszonego
- Pomiar parametrów ruchu jednostajnie opóźnionego