

# Podstawy fizyki – sezon 1

## **II. DYNAMIKA**

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,  
D11, pok. 111  
amucha@agh.edu.pl  
<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

# Kinematyka a dynamika

- ▶ Kinematyka – odpowiedź na pytanie „Jak ciało się porusza?”
- ▶ Dynamika – **Dlaczego ciało się porusza?”**
- ▶ W dynamice szukamy związków pomiędzy oddziaływaniem ciał a ich ruchem.
- ▶ Newton 1687 – „Początki matematyczne filozofii przyrody”
- ▶ Wprowadzone pojęcie: **SIŁA**
- ▶ **Przyspieszenie** charakteryzuje zmianę prędkości (co do wartości lub kierunku)
- ▶ Przyczyną występowania przyspieszenia jest siła (bezpośrednia lub pośrednia-pole).

DYNAMIKA jest podstawowym działem mechaniki.

# I Zasada Dynamiki (punktu materialnego)

Jeżeli na ciało nie działała żadna siła lub siły działające się równoważą, ciało znajduje się w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Bezwładność – własność ciała, która powoduje, że ciało zachowuje swój obecny stan (spoczynku lub poruszania się po linii prostej), w przypadku, gdy nie działają inne ciała.

Pierwsza zasada dynamiki stwierdza, że jeżeli na ciało nie działa żadna siła (lub gdy siła wypadkowa jest równa zero) to istnieje taki układ odniesienia, w którym to ciało spoczywa lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Jest to **UKŁAD INERCJALNY**



# Układy inercjalne

- Każdy układ poruszający się ze stałą prędkością względem ukł. inercjalnego jest także układem inercjalnym,
- Transformacja Galileusza – (1564):
- Prawa mechaniki są jednakowe we wszystkich układach inercjalnych.

Dowód:

Nowy układ ( $y'$ ) porusza się ze stałą prędkością  $u$ .

położenie punktu  $m$  w nowym układzie:

$$x'(t) = x(t) - x_0$$

prędkość w nowym układzie:

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - \frac{dx_0}{dt}$$
$$v'(t) = v(t) - u$$

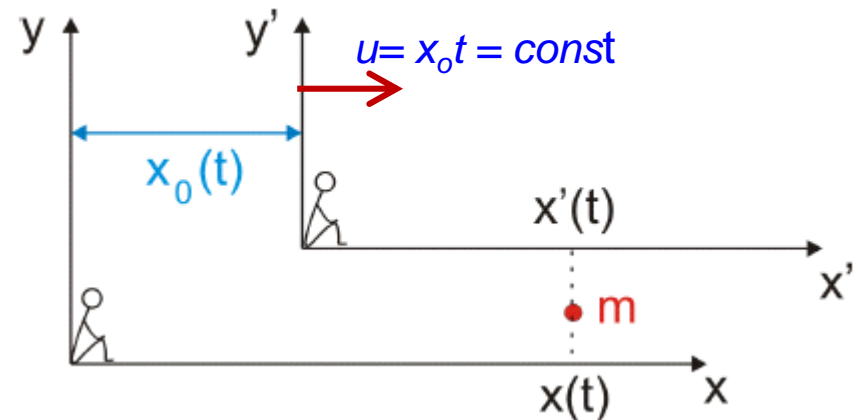
przyspieszenie w nowym układzie:

$$\frac{dv'}{dt} = \frac{dv}{dt} - \frac{du}{dt}$$

czyli:  $a' = a - 0$

siły:  $F' = F$

(tak samo w 3D)

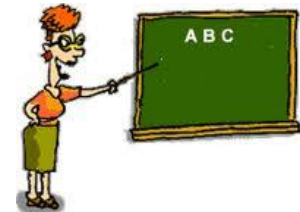
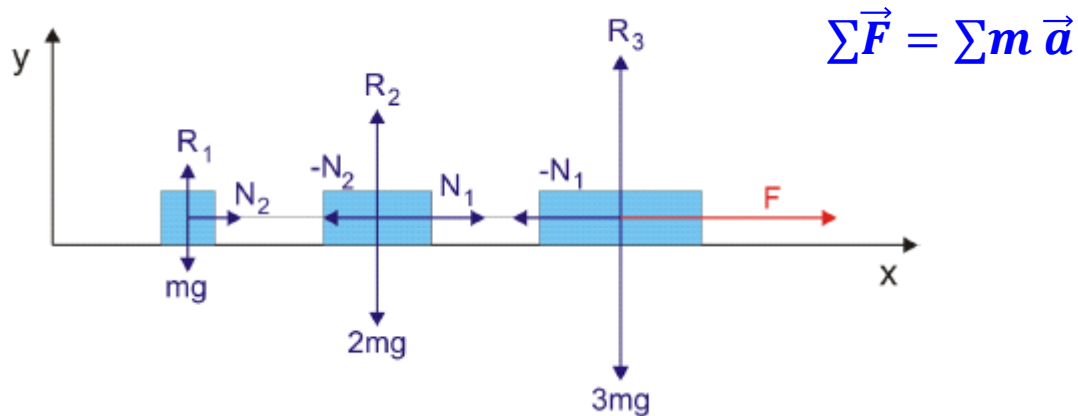


## II Zasada Dynamiki

Siła wypadkowa działająca na ciało jest równa iloczynowi masy tego ciała i jego przyspieszenia:

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

Przykład: do układu trzech ciał o masach  $m$ ,  $2m$  i  $3m$  przyłożona została siła zewnętrzna  $F$ . Opisać ruch ciała.



### III Zasada Dynamiki

Gdy dwa ciała oddziałują wzajemnie, to siła wywierana przez ciało drugie na ciało pierwsze jest równa i przeciwnie skierowana do siły, jaką ciało pierwsze działa na drugie..

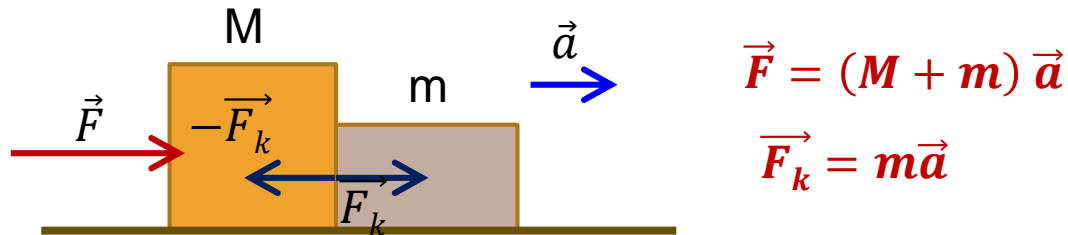
$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$$



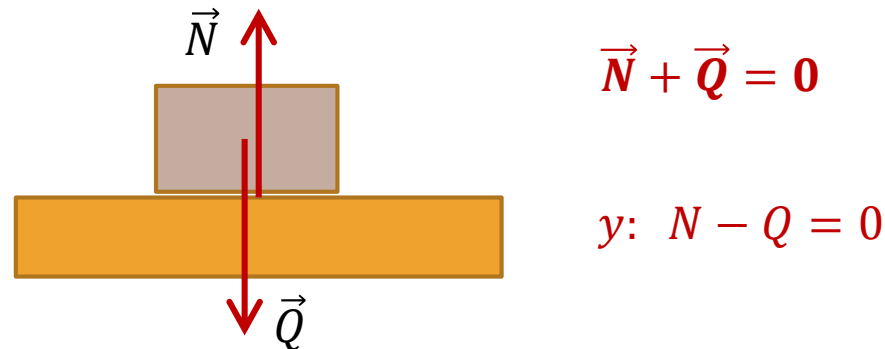
# Siły kontaktowe

- Gdy dwa ciała są dociskane do siebie - siły kontaktowe.

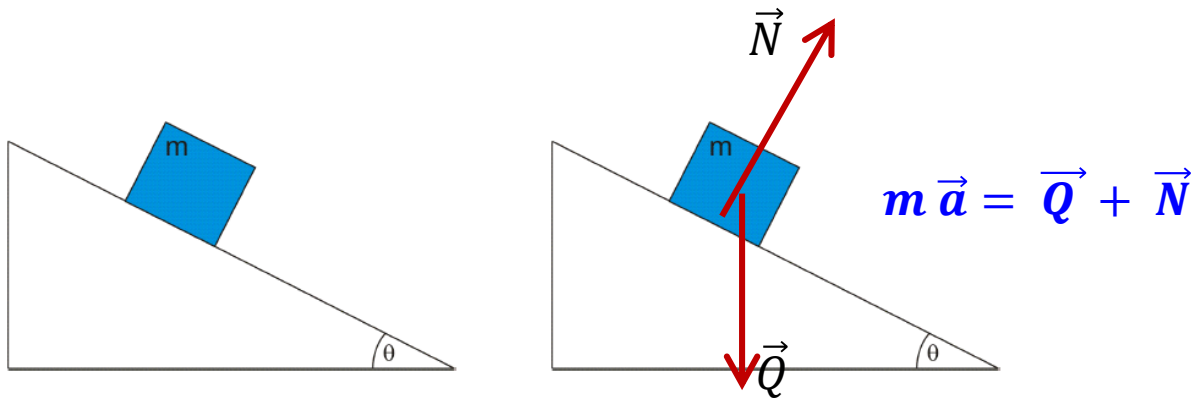
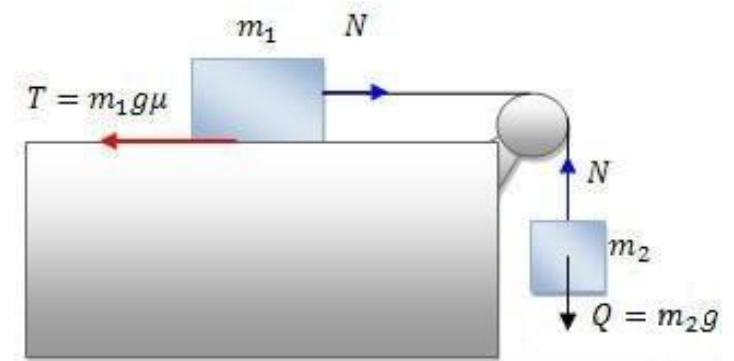
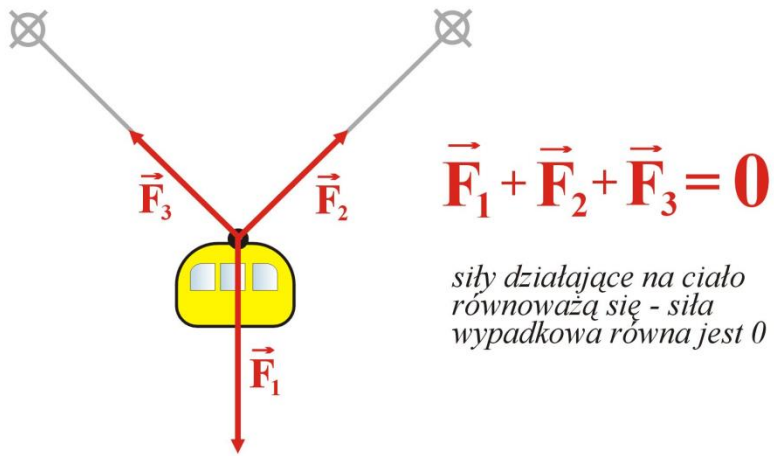
Źródłem tych sił jest odpychanie pomiędzy atomami – siły elektromagnetyczne.



- Siły kontaktowe są tu normalne do powierzchni ciał.
- Siły normalne: gdy jedno ciało naciska na inne, odkształca go i działa siłą normalną (prostopadłą) do powierzchni



# Zasady dynamiki - przykłady





# Siły

- Jednostka siły w SI – niuton (N) –  
Niuton jest to siła, która masie 1kg nadaje przyspieszenie  $1\text{m/s}^2$

- Siły:

- grawitacyjne,

- W polu grawitacyjnym Ziemi – prawo powszechnego ciążenia:

$$F = G \frac{M m}{r^2}$$

- elektryczne,

- działają pomiędzy atomami, cząsteczkami, siły utrzymujące elektrony na orbitach, siły tarcia

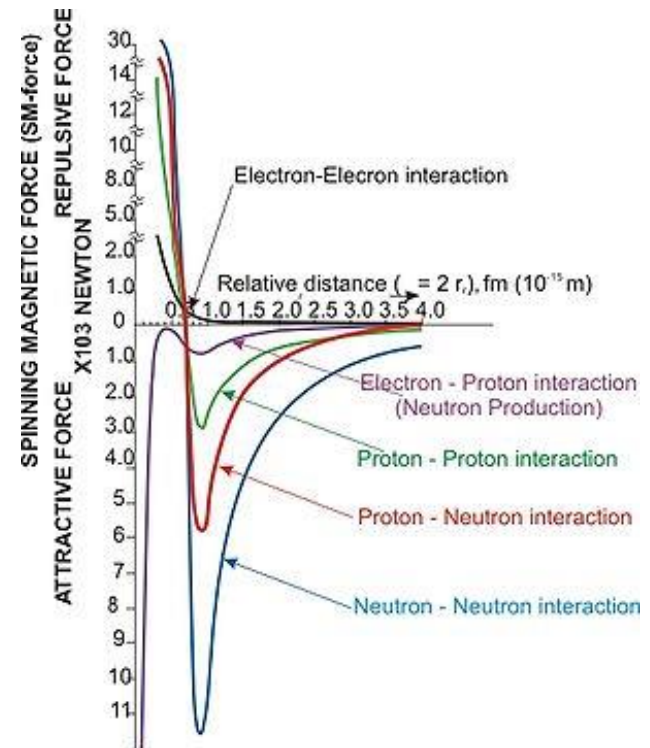
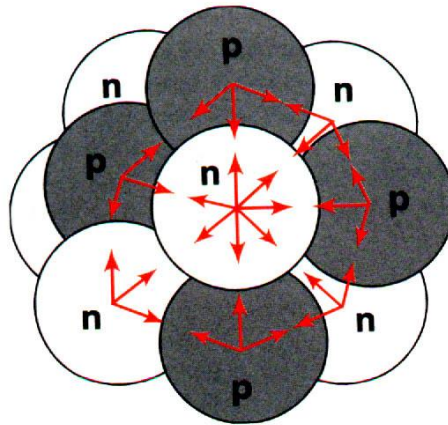
$$F = k \frac{Q q}{r^2}$$

- jądrowe

- siły utrzymujące protony i neutrony w jądrze atomu, mikroświat – mechanika kwantowa

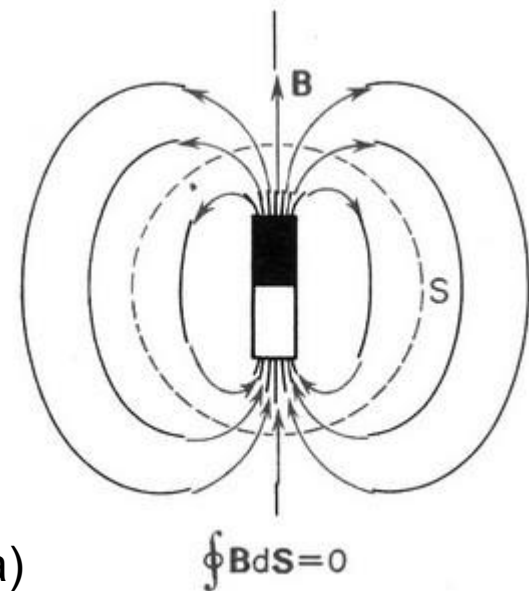
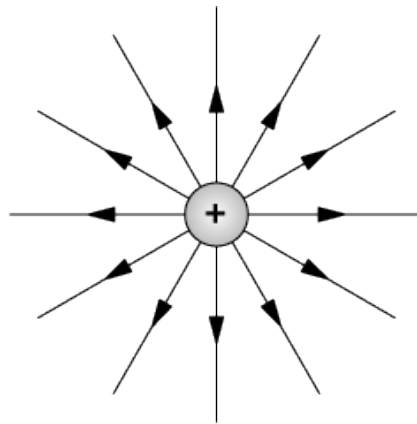
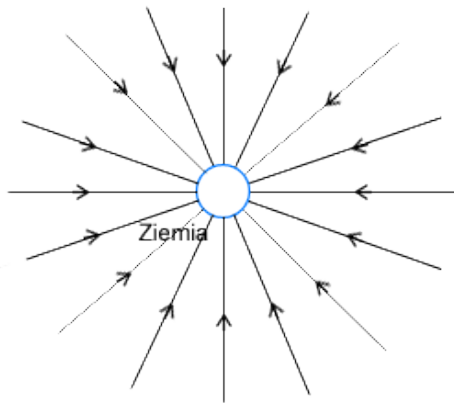
# Siły \*

- o jądrowe  
siły utrzymujące protony i neutrony w jądrze atomu, mikroświat – mechanika kwantowa

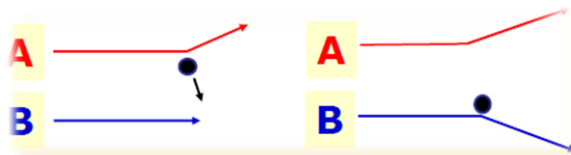


# Oddziaływania

- Oddziaływania – w jaki sposób przenoszone są siły?
  - pole (grawitacyjne, elektryczne, magnetyczne, ...)

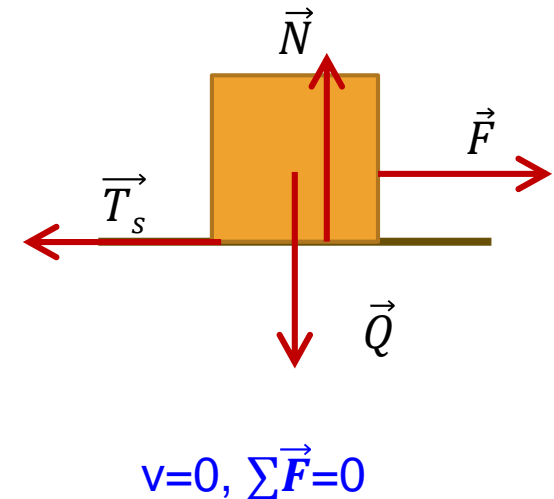


- bozony pośredniczące (mechanika kwantowa)



# Tarcie

- Tarcie jest to siła kontaktowa styczna do powierzchni.
- Działa zrówno, gdy ciała spoczywają, jak i poruszają się.
- Siła tarcia działającą między nieruchomymi powierzchniami – **tarcie statyczne  $T_s$** .
- Maksymalna wartość  $T_{s\ max}$  - krytyczna siła, którą należy przyłożyć, żeby ruszyć ciało z miejsca



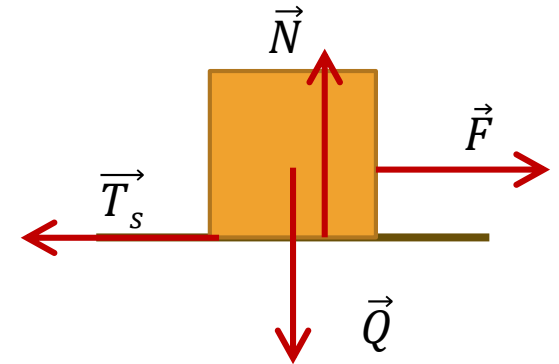
# Tarcie

- Maksymalna wartość  $T_{s\ max}$  - krytyczna siła, którą należy przyłożyć, żeby ruszyć ciało z miejsca
  - $T_s$  jest w przybliżeniu niezależna od wielkości pola powierzchni styku ciał;
  - $T_s$  jest proporcjonalna do siły normalnej, z jaką jedna powierzchnia naciska na drugą.

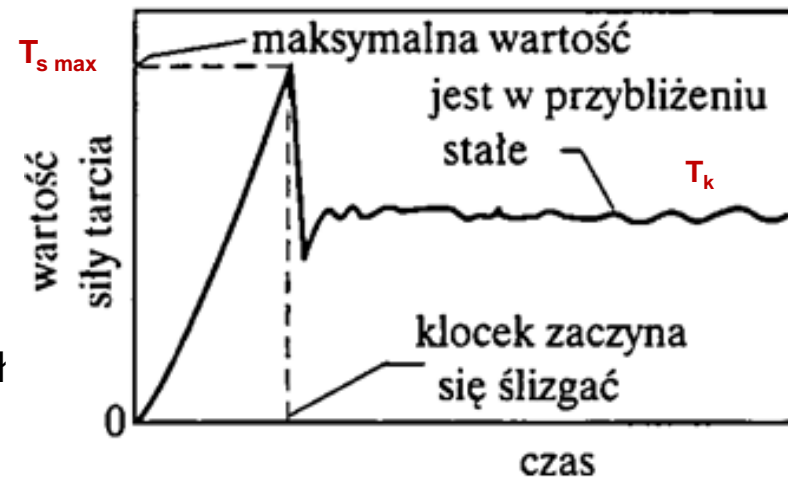
$$T_s \leq \mu_s N, \quad \mu_s = \frac{T_{s\ max}}{N},$$

- Gdy ciało zacznie się poruszać – siła tarcia kinetycznego  $T_k$ 
  - tarcie kinetyczne nie zależy od prędkości ciała

$$\mu_k = \frac{T_k}{N}$$

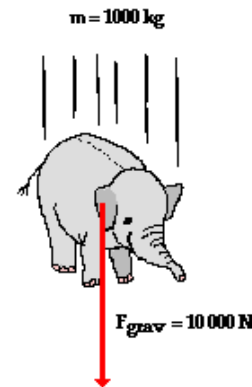
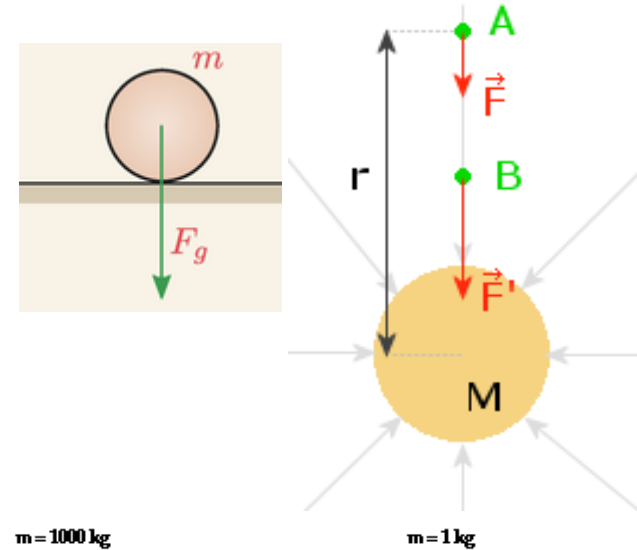


$$v=0, \quad \sum \vec{F}=0$$

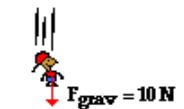


# Siła ciężkości, ciężar i masa

- Ciężar definiujemy jako wartość bezwzględną siły grawitacyjnej, z jaką Ziemia przyciąga ciało. Siła grawitacyjna jest to wielkość wektorowa.
- Ciężar zależy od odległości od środka Ziemi, masa jest zawsze taka sama.
- Masa jest miarą bezwładności – jeżeli do dwóch różnych mas przyłożymy tę samą siłę – stosunek uzyskanych przyspieszeń jest odwrotnością stosunku mas:  
$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$$
- Galileusz (1590) – wszystkie ciała swobodnie puszczane spadają z takim samym przyspieszeniem  $g$
- Siłą działającą na spadające ciało jest jego ciężar  $Q=mg$  (tylko wartość!)



$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{10\,000\text{ N}}{1000\text{ kg}}$$
$$a = 10\text{ m/s}^2$$



$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{10\text{ N}}{1\text{ kg}}$$
$$a = 10\text{ m/s}^2$$

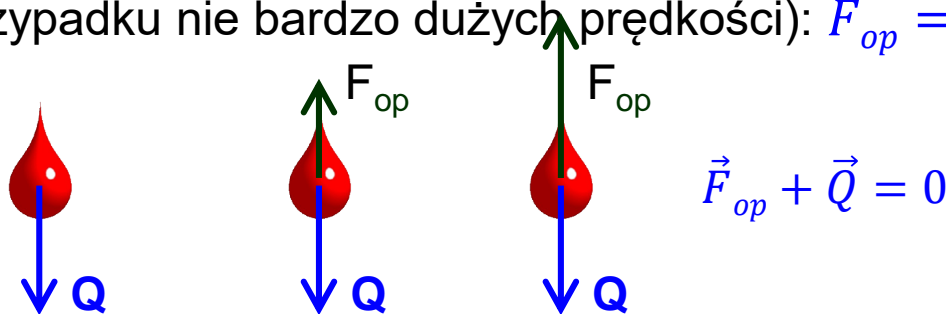
# Siła oporu

- Na rzeczywisty ruch ciała wpływają siły oporu (aerodynamicznego lub hydrodynamicznego)
- Na wartość siły oporu wpływają głównie:
  - gęstość ośrodka
  - poprzeczne rozmiaru ciała
  - prędkość ciała

$$D = \frac{1}{2} C_{\rho} S v^2$$

# Spadek ciała w powietrzu z oporem

- Ruch ciała o masie  $m$ , spadającego w pobliżu Ziemi, z uwzględnieniem oporu powietrza.
- Opór powietrza zależy od prędkości (przykłady).
- Zakładamy, że siła oporu powietrza jest proporcjonalna do prędkości (w przypadku nie bardzo dużych prędkości):  $F_{op} = -bv$



- Prędkość rośnie – wzrasta siła oporu, aż  $Q=F_{op}$  i ciało porusza się ruchem jednostajnym.
- Prędkość graniczna:  $mg = -bv_{gr}$

Jak zmienia się prędkość w czasie tego ruchu?

- II Zasada Dynamiki Newtona:  $m \frac{dv}{dt} = mg - bv$

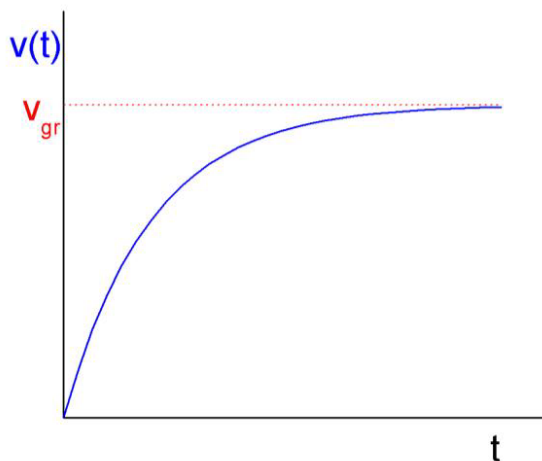
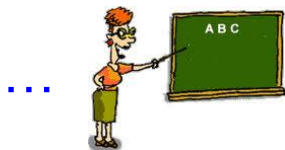


# Spadek ciała w powietrzu z oporem

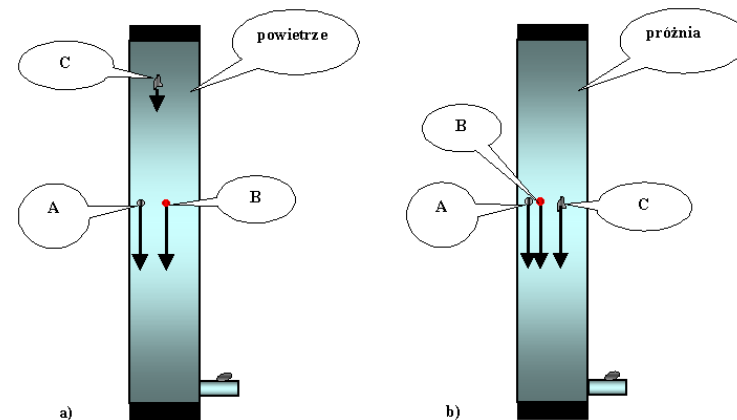
- Rozwiązanie równania ruchu:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - bv$$

$$dv = \left( g - \frac{b}{m} v \right) dt$$



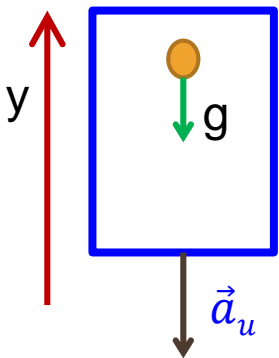
Prędkość graniczna:  
spadającego  
człowieka: 60m/s,  
osiągana przez ok.12s,  
na drodze 450m,  
kropla deszczu: 7 m/s,  
6m



## Ruch ciała w poruszających się układach (nieinercjalnych)

- Gdy ciało umieszczone jest w układzie poruszającym się z przyspieszeniem  $a_u$ , to jego przyspieszenie w tym układzie wynosi  $-a$
- II zasada dynamiki Newtona (ogólnie):  $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}(\vec{r}, \vec{p}, t)$ ,  $\frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}$
- w nieinercjalnych układach odniesienia:  $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}(\vec{r}, \vec{p}, t) - m\vec{a}_u$

Przykład: spadająca piłka w windzie:



$$\text{w ukł. bloku: } m \frac{dv}{dt} = -mg$$

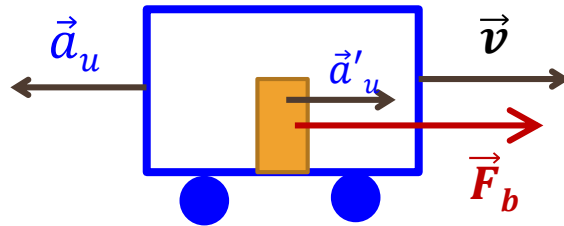
w ukł. windy:

$$m \frac{dv}{dt} = -mg + ma_u = -m(g - a_u)$$

# Układy nieinercyjne – siły bezwładności

**Siły bezwładności** – siły pozorne, ale powodujące rzeczywiste skutki (kawa na spodniach).

Przykład 1: hamujący samochód:



- gdy  $v = \text{const}$  – nie działa siła, ruch jednostajny
- w ukł inercyjnym:  $\vec{a}_u$
- w ukł nieinercyjnym:  $\vec{a}'_u$ , czyli działa siła:

$$\vec{F}_b = m \vec{a}'_u = -m \vec{a}_u$$

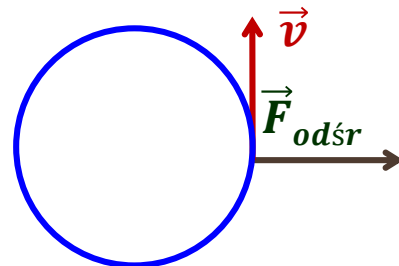
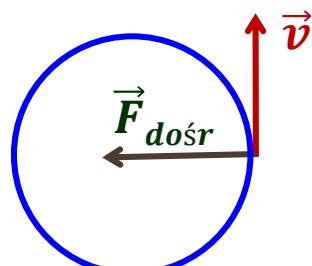
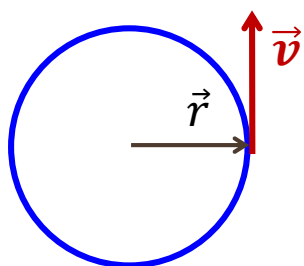
jest to siła bezwładności

# Układy nieinercyjne – siły bezwładności

Przykład 2: ruch jednostajny po okręgu:

ukł. inercjalny:

ukł. nieinercjalny:

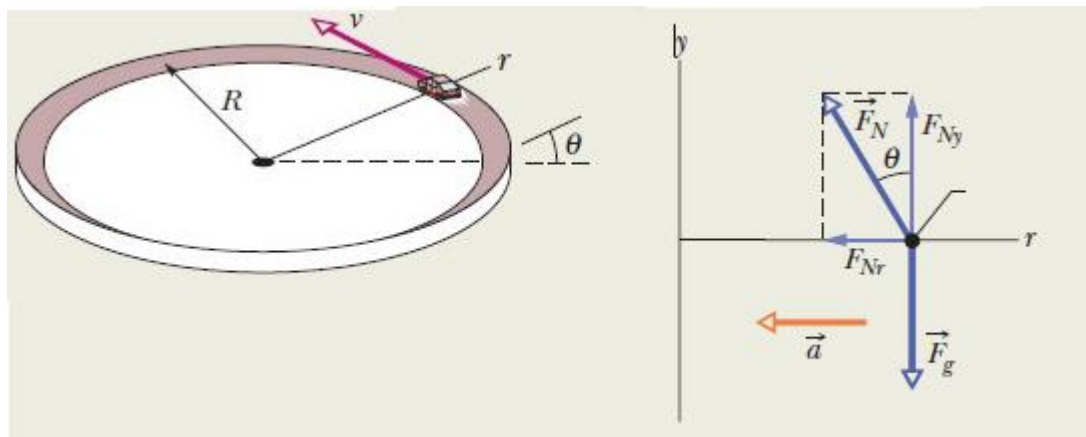


$$\vec{F}_{dośr} = -\frac{mv^2 \vec{r}}{r r}$$

$$\vec{F}_{odśr} = \frac{mv^2 \vec{r}}{r r}$$

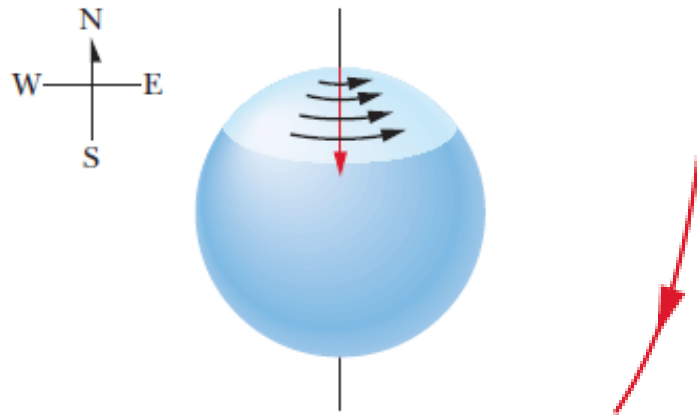
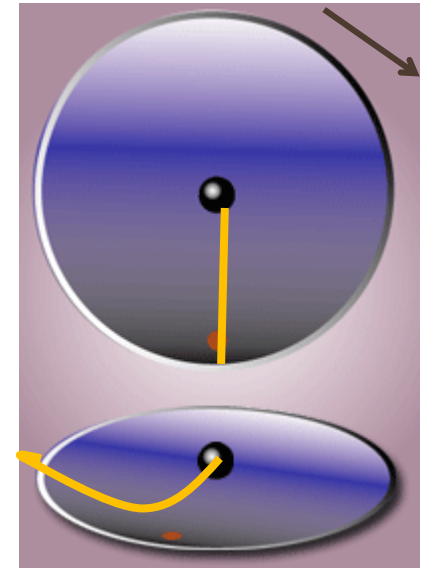
Ciało porusza się po okręgu, ponieważ **działa siła dośrodkowa**. Siła ta powoduje zakrzywienie toru

Przykład 3. Pochylona powierzchnia autostrady



# Ruch ciał w obracających się układach

- Ruch po obracającej się płycie –
  - dla obserwatora inercyjnego – to układ się porusza, torem jest prosta,
  - dla nieinercyjnego tor jest zakrzywiony, Zakrzywienie musi być wywołane siłą – siłą pozorną (bezwładności)
- Ruch na obracającej się Ziemi.



# Siła Coriolisa

- Obliczenie prędkości i przyspieszenia w obracającym się z prędkością  $\omega$  układzie odniesienia („Mechanika” Ch. Kittel).

Schemat: wyrażamy położenie jako funkcje  $r$  i  $t$ , liczymy prędkość i przyspieszenie (pierwsze i drugie pochodne) i ostatecznie:

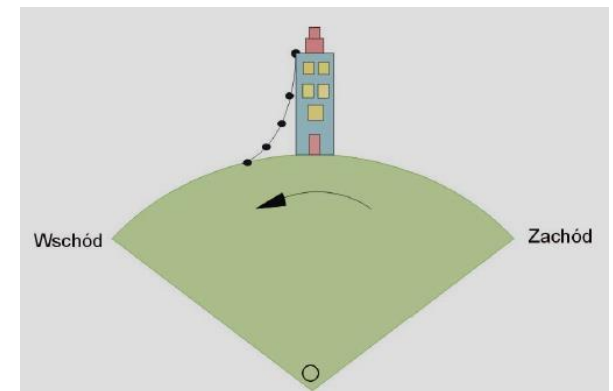
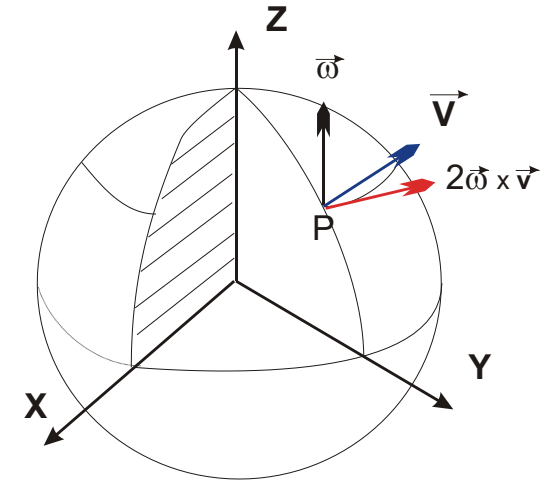
$$\vec{a}_i = \vec{a}_r + 2\vec{\omega} \times \vec{v}_r + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$$

przyp. w ukł.inercjalnym      przyp. w ukł.obracającym się      **przyspieszenie Coriolisa**      przyp.dośrodkowe

- Siła Coriolisa (bezwładności):  $\vec{F}_c = -2m\vec{\omega} \times \vec{v}$

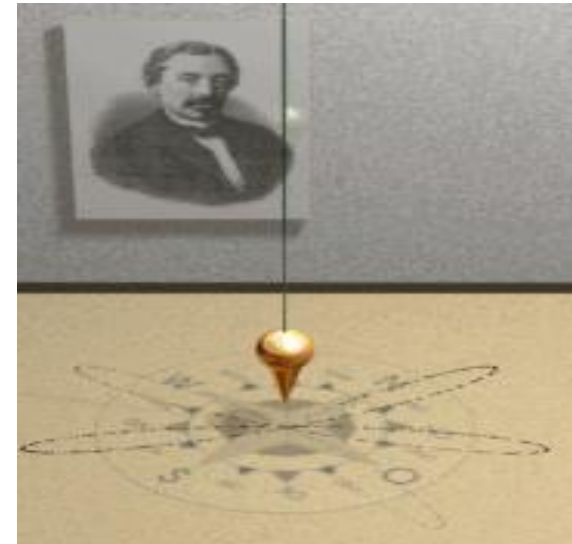
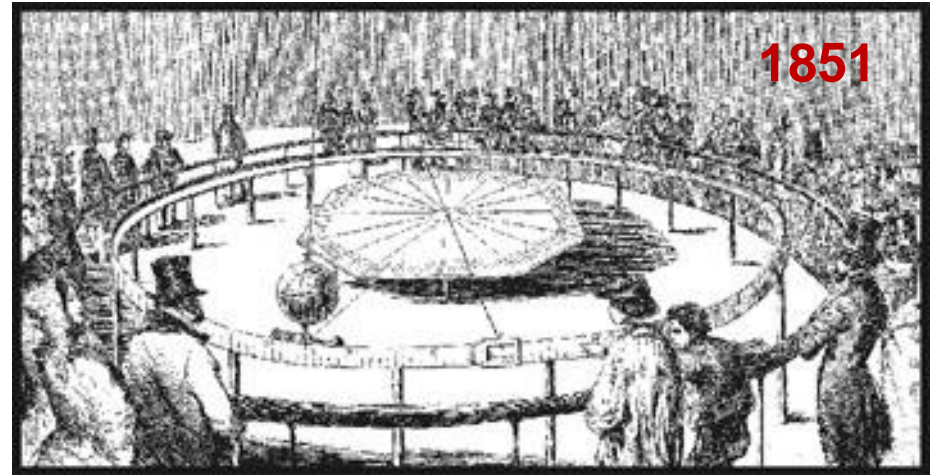
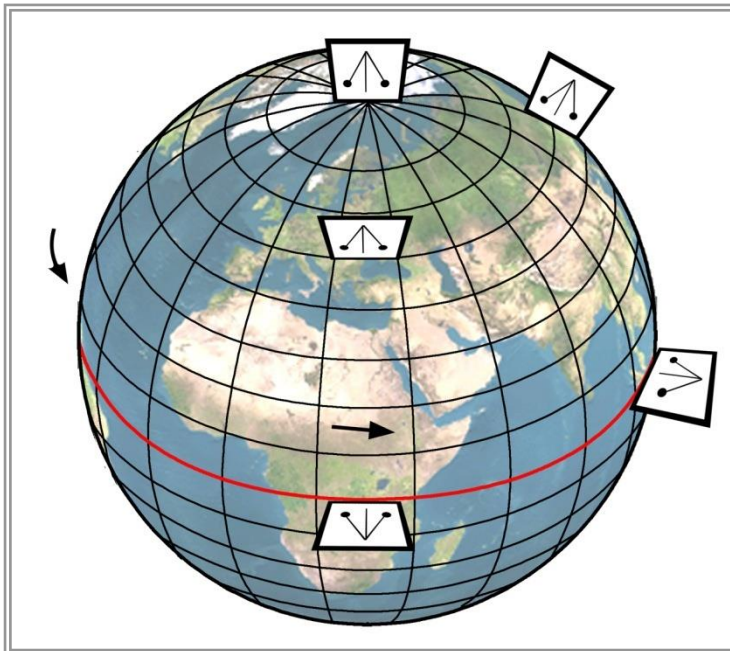
# Siła Coriolisa - skutki

- Siła Coriolisa:
  - działa wyłącznie na obiekty znajdujące się w ruchu
  - zależy od prędkości kątowej wirującego układu oraz od masy i prędkości liniowej poruszającego się obiektu.
  - Kierunek działania siły Coriolisa jest zawsze prostopadły do kierunku wektora prędkości poruszającego się ciała, tak więc siła ta powoduje odchylenie toru ruchu ciała od linii prostej.
- Kamień rzucony z wieży Eiffla odchyła się o 6cm od pionu,
- Kierunki wiatrów na półkuli N odchylają się w prawo.
- Rakiety dalekiego zasięgu skręcają na wschód.



# Wahadło Foucaulta

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





# Podsumowanie

---

- ▶ Zasady dynamiki Newtona z zastosowaniami.
- ▶ Tarcie.
- ▶ Ruch ciała z oporem.
- ▶ Ruch ciała w inercjalnych i nieinercjalnych układach.
- ▶ Siły bezwładności, przyspieszenie Coriolisa.
- ▶ Ruch ciał ze zmienną masą.