

## 2. Siły i ich źródła

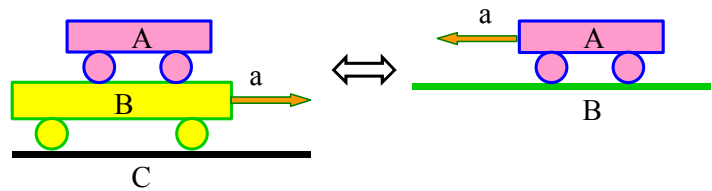
### Siła $\mathbf{F}$

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \{ \text{gdy masa się nie zmienia w czasie} \} = m\mathbf{a}$$

Siła jest tym, co zmienia pęd a w konsekwencji prędkość ciał (zmiana prędkości jest tym łatwiejsza im jest mniejsza masa bezwładna ciała). Określenie siły działającej na obiekt w każdym miejscu rozpatrywanej przestrzeni oznacza zdefiniowanie pola siły (ogólnie termin "pole czegoś" oznacza przyporządkowanie wartości "czegoś" w każdym miejscu w przestrzeni, np. pole temperatury określa zależność temperatury od położenia).

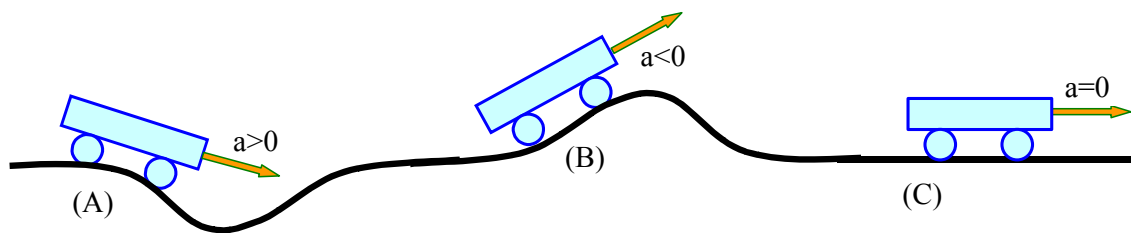
Źródłami sił są cztery podstawowe oddziaływania: grawitacyjne, elektromagnetyczne, jądrowe słabe oraz jądrowe silne.

Siły pojawiają się również w nieinercjalnych układach odniesienia, tzn. takich, które przyspieszają względem innych układów. Przykładem jest sytuacja przedstawiona na rysunku obok: na



wózek A nie działa żadna siła, więc jest nieruchomy względem podłoża C, natomiast względem przyspieszającego wózka B porusza się z przyspieszeniem  $-\mathbf{a}$ . Zatem analizując ruch wózka A względem B, wózek ten zachowuje się tak, jakby na niego działała siła  $\mathbf{F} = -m\mathbf{a}$ , gdzie  $m$  jest jego masą. Siła ta występuje tylko w układzie przyspieszającym (układzie związanym z wózkiem B) i dlatego nazywana jest pozorną lub siłą bezwładności, bo jej wartość zależy od masy bezwładnej ciała. Podobny mechanizm dotyczy występowania w układzie wirującym przyspieszenia odśrodkowego (siły odśrodkowej) oraz przyspieszenia (siły) Coriolisa działającego min. na ciała spadające i poruszające się na Ziemi.

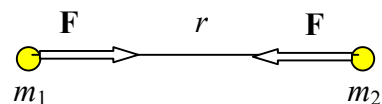
Występowanie układów nieinercjalnych z siłami pozornymi jest utożsamiane z zakrzywieniem przestrzeni. W układzie dwuwymiarowym zakrzywienie takie można wyobrazić sobie jako "dołek", w pobliżu którego pojawia się siła wciągająca do dołka (wózek (A) na rysunku poniżej). Sytuacja przeciwna występuje w pobliżu wzniesienia, wokół którego występuje odpychanie (wózek (B)). W płaskiej przestrzeni (układzie inercjalnym) nie ma sił pozornych (wózek (C)).



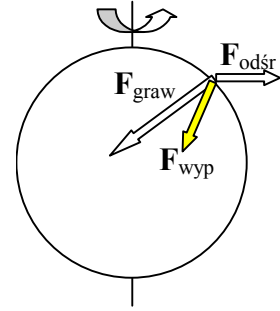
### Siła grawitacyjna:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

gdzie  $G = 6,6 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$  jest stałą grawitacji,  $r$  odległością pomiędzy dwoma ciałami a  $m$  masą grawitacyjną ("ładunkiem" siły grawitacyjnej).



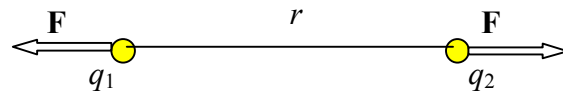
Z doświadczenia wynika, że masa bezwładna i grawitacyjna są równoważne. Siła wypadkowa  $\mathbf{F}_{\text{wyp}}$  działająca na ciała na powierzchni Ziemi jest złożeniem siły przyciągania grawitacyjnego do środka Ziemi  $\mathbf{F}_{\text{graw}}$  oraz siły odśrodkowej  $\mathbf{F}_{\text{odśr}}$  związanej z ruchem obrotowym Ziemi, prostopadłej do osi obrotu Ziemi. Siła grawitacyjnego przyciągania zależy od masy grawitacyjnej ciała zaś siła odśrodkowa jest siłą pozorną równą iloczynowi przyspieszenia odśrodkowego i masy bezwładnej. Gdyby dla różnych ciał stosunek masy bezwładnej i masy grawitacyjnej był różny, to wypadkowa siła miałaby różny kierunek. Doświadczenie wykazuje, że pion jest taki sam dla wszystkich ciał, czyli masa bezwładna i grawitacyjna są tą samą wielkością fizyczną. W konsekwencji pole grawitacyjne jest równoważne istnieniu nieinercjalnego układu odniesienia, czyli polu sił pozornych. Ogólna teoria względności Einsteina łączy geometrię (kształt i zakrzywienie) przestrzeni z rozkładem masy.



### Siły elektryczne (elektromagnetyczne)

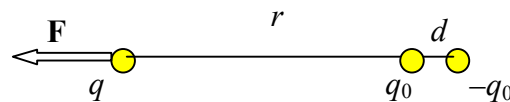
Pomiędzy dwoma nieruchomymi ładunkami elektrycznymi:

$$F = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



gdzie  $1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  jest współczynnikiem proporcjonalności,  $r$  jest odległością zaś  $q$  wartością ładunku elektrycznego (całkowitą wielokrotnością ładunku elementarnego elektronu  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ). Ładunki mogą być dodatnie bądź ujemne a siła odpowiednio przyciągająca (dla ładunków o różnych znakach) bądź odpychająca (dla ładunków o takich samych znakach).

Dwa ładunki  $q_1$  i  $q_2$  o tej samej wartości, ale przeciwnych znakach  $q_1 = -q_2 = q_0$  tworzą tzw. dipol elektryczny. Siła działająca na ładunek  $q$  w polu elektrycznym



wytworzonym przez dipol elektryczny, w przypadku gdy wszystkie ładunki znajdują się na jednej prostej, wynosi:

$$F = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{(r+d)^2} = -\frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+d)^2} \right) = -\frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(2r+d)d}{r^2(r+d)^2},$$

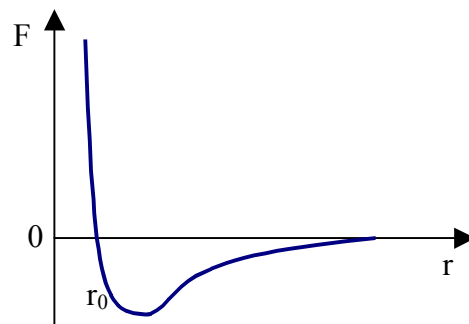
czyli dla  $d \ll r$ :

$$F \approx -\frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \frac{2d}{r^3}.$$

Ogólnie w polu dipola:  $F \propto 1/r^3$ , podczas gdy w polu pojedynczego ładunku (monopola)  $F \propto 1/r^2$ .

Siła działająca na ładunek w polu wytworzonym przez ładunek i dipol elektryczny:  $F \propto \alpha/r^2 + \beta/r^3$ , gdzie pierwszy człon odpowiada oddziaływaniu z pojedynczym ładunkiem a drugi z dipolem. Gdy stałe  $\alpha$  i  $\beta$  mają różne znaki siła ta na bliskich

odległościach  $r \ll r_0$  ma kierunek zgodny ze znakiem  $\beta$ , dla  $r = r_0 = -\beta/\alpha$  jest równa zero, a dla  $r > r_0$  ma kierunek zgodny ze znakiem  $\alpha$ . Zatem siła ta w zależności od odległości będzie przyciągająca lub odpychająca, a na dużych odległościach maleje do zera.



Podobny charakter jak powyżej ma siła oddziaływania elektrycznego pomiędzy atomami (lub cząsteczkami), które mają złożony rozkład ładunku elektrycznego. Dwa atomy będące blisko siebie odpychają się, w odległości  $r_0$  od siebie nie działają na siebie żadną siłą, na większych odległościach przyciągają się a na bardzo dużych siła znowu się zeruje. Odległość  $r_0$ , poniżej której występuje siła odpychająca wyznacza rozmiar atomu i określa średnią odległość pomiędzy atomami w kryształach. Zmniejszanie tej odległości (ściskanie) wywołuje reakcję w postaci siły odpychającej zaś zwiększanie tej odległości (rozciąganie) powoduje wystąpienie siły przyciągającej. Jest to źródło sił: chemicznych, krystalicznych, sprężystości, tarcia, etc.

Układ ładunków wytwarza pole elektryczne, które może być sumarycznie opisywane wektorem natężenia pola elektrycznego  $\mathbf{E}$  określającego siłę działającą na ładunek  $q$  w polu innych ładunków:  $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ . Analogicznie można opisywać pole magnetyczne poprzez wektor indukcji pola magnetycznego  $\mathbf{B}$ . Tym razem jednak pole wytwarzane jest przez poruszające się ładunki (w magnesach stałych są to ruchy elektronów wewnątrz atomów a w elektromagnesach prąd elektryczny) i pole to oddziałuje na poruszające się ładunki. Siła działająca na ładunek  $q$  w polu  $\mathbf{B}$  jest również proporcjonalna do prędkości  $\mathbf{v}$ , z jaką się ten ładunek porusza:  $F \sim qvB$ . Dokładnie:  $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , gdzie  $\times$  oznacza iloczyn wektorowy, którego wartość jest równa iloczynowi wartości  $vB$  oraz sinusa kąta pomiędzy tymi wektorami a kierunek jest prostopadły do wektorów  $\mathbf{v}$  i  $\mathbf{B}$ . Ogólnie pola elektryczne i magnetyczne są ze sobą powiązane i dlatego mówi się o zjawiskach elektromagnetycznych.

### Siły jądrowe

Siły te występują na bardzo małych odległościach, charakterystycznych dla jąder atomowych. Dlatego dotyczą one tylko oddziaływań pomiędzy cząstkami elementarnymi. Siły jądrowe silne między innymi łączą kwarki w protony i neutrony oraz łączą neutrony i protony w jądra atomowe. Siły jądrowe słabe między innymi powodują rozpad  $\beta$  jąder i neutronu. W podejściu kwantowym oddziaływanie pomiędzy cząstkami odbywa się poprzez wymianę wirtualnej cząstki będącej nośnikiem tego oddziaływania. Cząstkami przenoszącymi oddziaływania są następujące bozony:

- gluon (jądrowe silne),
- foton (elektromagnetyczne),
- bozony pośrednie  $W^-$ ,  $W^+$  oraz  $Z$  (jądrowe słabe),
- grawiton (grawitacyjne).

Dodatkowo postuluje się istnienie bozonu Higgsa, który odpowiada za tzw. oddziaływanie skalarnie (nie dotyczące oddziaływań pomiędzy dwoma cząstkami) powodujące to, że cząstki mają różne masy. Eksperymentalne potwierdzenie istnienia (lub nie) bozonu Higgsa przewidywane jest w najbliższych latach.

W modelu standardowym oddziaływania jądrowe słabe i elektromagnetyczne są formą jednego oddziaływania elektroslabego. Są również prowadzone próby stworzenia teorii, w której zunifikowane byłyby wszystkie oddziaływania. Oddziaływaniem sprawiającym największą trudność dla jednolitej teorii jest oddziaływanie grawitacyjne, które jest o wiele rzędów wielkości słabsze niż pozostałe oddziaływania.

Oddziaływania fundamentalne:	Natężenie względne	Zasięg
<b>Grawitacyjne</b>	$6 \cdot 10^{-39}$	$\infty$
<b>Elektromagnetyczne</b>	$7 \cdot 10^{-3}$	$\infty$
<b>Jądrowe słabe</b>	$10^{-5}$	$10^{-18} \text{ m}$
<b>Jądrowe silne</b>	1	$10^{-15} \text{ m}$

### Zasady dynamiki Newtona

Zasady te podane w 1687 roku, obecnie formułuje się następująco:

1. Jeśli na ciało nie działa żadna siła wypadkowa, to ciało jest nieruchome lub porusza się ruchem jednostajnym ( $\mathbf{F} = 0 \Rightarrow \mathbf{v} = 0$  lub  $\mathbf{v} = \text{const.}$ ).
2. Szybkość zmiany pędu ciała jest równa sile działającej na to ciało ( $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$ ).
3. Siły wzajemnego oddziaływania dwóch ciał są sobie równe, lecz przeciwnie skierowane ( $\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = -\mathbf{F}_{2 \rightarrow 1}$ ).

Ad 1. Tzw. zasada bezwładności jest w rzeczywistości definicją inercjalnego układu odniesienia i stwierdzeniem, że istnieją układy inercjalne (tzn. takie, w których ciała są nieruchome lub poruszają się ze stałą prędkością). Pozostawanie w spoczynku nie jest tylko szczególnym przypadkiem ruchu jednostajnego, bo np. wszystkie fotony poruszają się ze stałą prędkością a nie istnieją fotony nieruchome.

Ad. 2. Jest to definicja siły, lecz również stwierdzenie, że przyczyną zmiany pędu jest siła.

Ad. 3. Jest to tzw. prawo akcji i reakcji. Nie jest ono jednak ściśle spełnione (szczególnie dla ciał odległych poruszających się z dużymi przyspieszeniami), bowiem zakłada, że oddziaływania rozchodzą się z nieskończoną prędkością. W rzeczywistości oddziaływania rozprzestrzeniają się ze skończoną prędkością i np. zmiana położenia jednego ciała wywoła zmianę kierunku działania siły na drugie ciało po czasie związanym z dotarciem odpowiedniego bozonu.