

## Rozdział IV. Dynamika, czyli nauka o przyczynach ruchu

Wiecie już, że wszystko we Wszechświecie znajduje się w ciągłym ruchu. W pewnych okolicznościach tego ruchu możemy nie odczuwać, w szczególności gdy jest on jednostajny, jak np. w samolocie odrzutowym lecącym nad Atlantykiem. Również Ziemia jako planeta porusza się we Wszechświecie i to z zawrotnymi prędkościami. Prędkość ruchu orbitalnego Ziemi dookoła Słońca to 30 km/s. Kierunek tej prędkości się zmienia, ale my tego nie zauważamy, gdyż przyspieszenie z tym związane jest znacznie mniejsze niż przyspieszenie np. w ruchu na karuzeli<sup>21</sup>. Na powierzchni Ziemi możemy więc przyjąć, że jesteśmy w spoczynku, jeśli nie zmieniamy swego położenia względem otaczających nas pobliskich ciał.

W poprzednim rozdziale dowiedzieliście się, jak opisujemy ruch ciał. Tym razem będziemy się zastanawiać, jakie są jego przyczyny. Aby obiekt pozostający w spoczynku wprawić w ruch, trzeba użyć siły. Czujesz to, podnosząc plecak, wsiadając na rower i rozpędzając się na nim. Podobnie zatrzymanie poruszającego się ciała wymaga użycia siły. Będziemy starali się wskazywać i opisywać różne rodzaje sił, z którymi mamy do czynienia na co dzień. Ten dział fizyki nazywa się **dynamiką**.

### 4.1. Pojęcie i własności sił

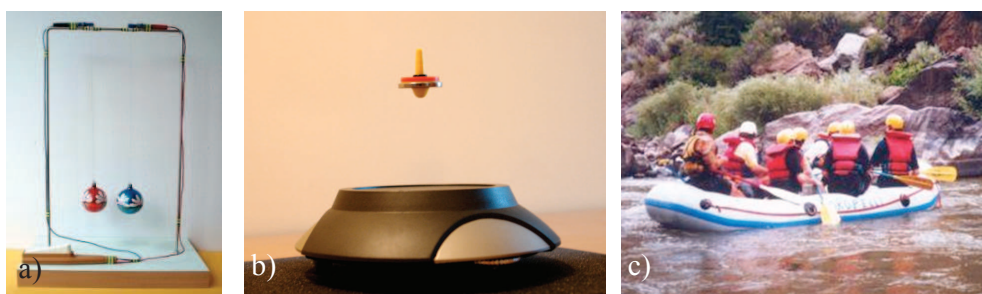
Siły towarzyszą nam bezustannie, choć zwykle nie myślimy o tym, siedząc czy też stojąc. Obserwując ciała spoczywające, tylko w niektórych przypadkach skłonni jesteśmy dopatrywać się działania sił. Najłatwiej możemy się ich domyślać, patrząc na wiszące szafki, obrazy czy lampy. Wiemy, że gdyby nie utrzymywały ich haki czy gwoździe, przedmioty te spadałyby na ziemię. Siły działają bez przerwy i na wszystko, ale ich obecność dostrzegamy łatwiej, gdy wywołują zmiany w naszym otoczeniu. To one wprawiają w ruch samochody, zatrzymują toczącą się piłkę, sprawiają, że przesuwając wzrok, czytasz te słowa i oddychasz.



**Fot. 4.1.** Oddziaływanie sił: a) wiszące lampy, b) wiszące magnesy. Sił jest wiele, działających na poszczególne lampy, magnesy, sufit, podstawki – na zdjęciu pokazujemy (za pomocą strzałek) tylko ich przykłady.

Siła może powstawać w kontakcie z przedmiotem poddanym jej działaniu, np. człowiek niesie torbę, pcha wózek, lokomotywa ciągnie wagony. Może też działać na odległość, np. pomiędzy magnesami, ale też spadającym ciałem i Ziemią oraz Księżycem a Ziemią. Tak więc, aby mówić o sile, musimy mieć przynajmniej dwa ciała i musi istnieć pomiędzy nimi **oddziaływanie**. Ponieważ mogą być różne rodzaje oddziaływań (patrz rozdział 4.7.), możemy mówić o różnych rodzajach sił: grawitacyjnych, magnetycznych, elektrycznych. Możemy też mówić o siłach tarcia, wyporu, sprężystości i ciężkości – w zależności od sytuacji, w której występują.

<sup>21</sup> Przyspieszenie w ruchu dookoła Słońca (odległość Ziemia–Słońce wynosi 149 mln km) to zaledwie  $6 \times 10^{-3}$  m/s<sup>2</sup> a w ruchu na dużej karuzeli może wynosić 3 m/s<sup>2</sup>.



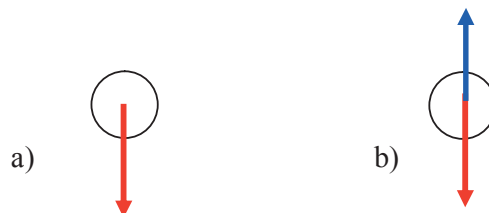
**Fot. 4.2.** Przykłady sił: a) siła elektryczna – bombki choinkowe; b) siła magnetyczna – magnetyczny bączek (lewitron); c) siła wyporu – ponton.

#### Przykład 4.1.

Jedną z najczęściej wymienianych i rozważanych w fizyce sił jest *siła ciężkości*. Każde ciało w pobliżu powierzchni Ziemi podlega jej działaniu. Podobno spadające z drzewa jabłko skłoniło Isaaca Newtona do zastanowienia się nad tym, dlaczego tak się dzieje. Ziemia przyciąga wszystko, co się na niej i w jej pobliżu znajduje.

Mówimy o sile ciężkości lub ciężarze ciała. Siła ciężkości jest bardzo specyficzną siłą. Ciężar ciała obliczamy ze wzoru  $G = m \cdot g$ , gdzie  $m$  jest masą ciała (w kg), a  $g$  znanym już nam przyspieszeniem ziemskim, czyli przyspieszeniem, z jakim spadają swobodnie spuszczone ciała. Wynosi ono na naszych szerokościach geograficznych  $9,81 \text{ m/s}^2$ , w przybliżeniu  $10 \text{ m/s}^2$ .

Spadanie ciał bardzo często kojarzymy z działaniem tej jednej siły, skierowanej pionowo w dół (rys. 4.1a). W rzeczywistości spadanie zwykle odbywa się w powietrzu, które stawia opór (rys. 4.1b).



**Rys. 4.1.** A) spadanie swobodne; b) spadanie swobodne z uwzględnieniem oporu powietrza. Strzałki oznaczają działające na ciało siły.

Siła oporu zależy m.in. od wielkości powierzchni spadającego ciała, o czym może nas przekonać proste doświadczenie.

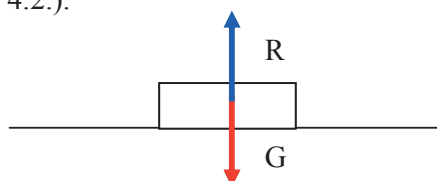
#### Doświadczenie 4.1.

Porównajmy spadanie swobodne niewielkiego przedmiotu, np. monety i kartki papieru, puszczając je równocześnie z tej samej wysokości. Moneta spadnie szybciej, ale tylko w przypadku, gdy kartka jest rozłożona. Po jej zgnieceniu w kulkę zaobserwujemy, że spadek następuje równocześnie. Właśnie powtórzyliście kolejne doświadczenie Galileusza! Jeżeli pominiemy opór powietrza, wszystkie ciała spadają z tym samym przyspieszeniem, niezależnie od ich masy. Nieprawdą jest, że ciała cięższe spadają szybciej!

#### Przykład 4.2

Zastanówmy się teraz, jakie siły działają na leżący na stole przedmiot. Czy siła ciężkości, która powoduje spadanie monety albo kartki papieru, przestaje działać, gdy kładziemy te przedmioty na stole? Oczywiście, że nie – Ziemia przyciąga je w dalszym ciągu, przecież gdy tylko znajdą się poza krawędzią stołu, natychmiast spadają. Sprawdź, co się dzieje i co czujesz, gdy naciskasz dłoń na stół. Czujesz „opór”, prawda? Inaczej mówiąc, czujesz siłę, którą stół działa na twoją dłoń. Pojawia się ona dopiero wtedy, gdy zaczniesz naciskać – jest

wynikiem działania siły nacisku. Przeciwstawia się naciskowi, *równoważąc* jego działanie. Siła taka działa też na wszystkie ciała na powierzchni Ziemi – określamy ją ogólnie jako *siłę reakcji podłoża* (por. rys. 4.2.).



**Rys. 4.2.** Siły działające na leżący na stole przedmiot. Siła ciężkości  $G$ , działająca pionowo w dół, jest równoważona przez siłę reakcji podłoża  $R$ , np. stołu

Jednostką siły jest niuton, oznaczany literą  $N$ . Określanie tej jednostki zajmiemy się w rozdziale 4.5.

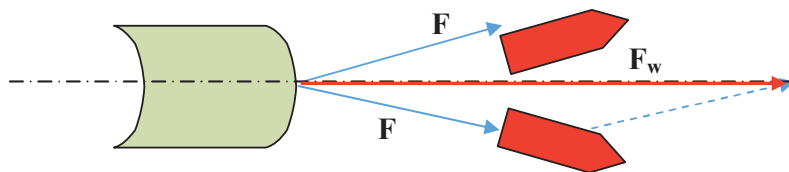
#### 4.2. Siła jako wektor

Rozważmy przykład przeciągania liny lub półkul z fot. 4.3. Załóżmy, że ciągną je z dwóch stron dwaj chłopcy. Co się stanie, gdy każdy z nich ciągnąć będzie w swoją stronę z taką samą siłą? Półkule pozostaną na miejscu, gdyż te dwie siły się zrównoważą. Wygodnie jest narysować te siły jako strzałki.



**Fot. 4.3.** Półkule magdeburskie. Dwie półkule, z których wypompowano powietrze. Dwaj studenci próbują je rozerwać

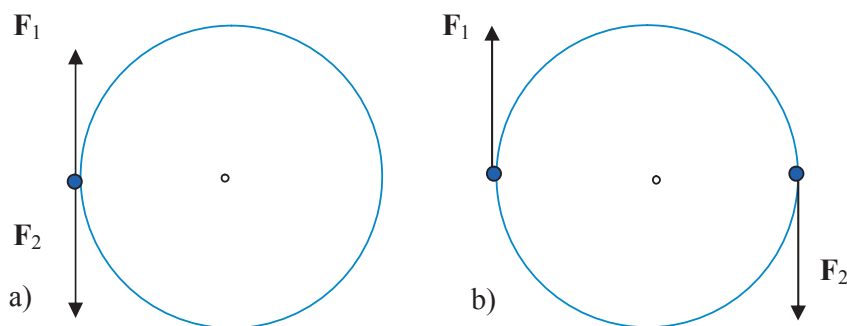
Rozważmy inny przypadek – dwóch holowników, które ciągną ciężki tankowiec (zob. rys. 4.3.). Każdy z holowników ciągnie w nieco innym kierunku, ale tankowiec płynie prosto przed siebie. Dlaczego? Mówimy, że dwie siły się składają i dają siłę sumaryczną, zwaną też po polsku *wypadkową*.



**Rys. 4.3.** Dwa holowniki ciągną tankowiec. Każdy z holowników działa siłą o wartości  $F$  (niebieskie strzałki), ale nieco pod innym kątem od osi tankowca. Z tego powodu wypadkowa siła  $F_w$  działająca na tankowiec, zaznaczona kolorem czerwonym, ma wartość nieco mniejszą od  $2F$

Zauważamy więc, że w przypadku składania sił istotne są nie tylko wartości tych sił, ale też i ich kierunki.

Rozważmy jeszcze inny przykład – karuzeli z dwoma krzeselkami, zob. rys. 4.4. Dwaj chłopcy przepychają się, w którym kierunku karuzela ma się kręcić. Pchają identycznymi co do wartości siłami, ale w przeciwnych kierunkach. Oczywiście, jeśli napierają na to samo krzeselko, to karuzela nie ruszy. Jeśli ich siły będą nadal przeciwne, ale przyłożone do dwóch różnych krzeselek po dwóch stronach karuzeli, to zacznie się ona kręcić, i to coraz szybciej.



**Rys. 4.4.** Dwie identyczne (co do wartości) siły działają na karuzelę. W pierwszym przypadku siły są przyłożone w tym samym punkcie – karuzela spoczywa. W drugim przypadku dwie siły mają różne punkty przyłożenia – karuzela zacznie się kręcić.

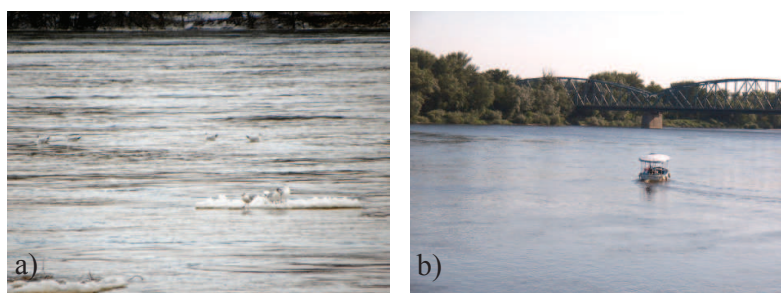
Jak więc widzisz, przy rozważaniu siły należy uwzględnić cztery jej cechy:

- 1) *wartość*,
- 2) *kierunek*,
- 3) *zwrot*,
- 4) *punkt przyłożenia*.

Tak opisaną wielkość nazywamy *wektorem*.

W dzisiejszym języku włoskim słowo *vettore* oznacza też firmę zajmującą się dostarczaniem przesyłek (czyli tzw. firmę kurierską). Otóż przemieszczenie też jest wektorem – ma kierunek (pionowo, poziomo), zwrot (w górę, w dół), wartość (o 1 metr) i punkt przyłożenia („przenieś tę paczkę”)<sup>22</sup>.

Siły możemy więc traktować jako wektory. Mają przecież wszystkie charakterystyczne dla wektora własności: miejsce zaczepienia, czyli określony *punkt przyłożenia*, *kierunek* i *zwrot* oraz swoją *wartość*, oznaczoną symbolicznie przez długość strzałki.



**Fot. 4.4.** Po Wiśle w Toruniu zimą żeglują tylko mewy na krze. Latem łódka płynie w poprzek rzeki, ale jak mewy też jest znoszona prądem (na powyższych zdjęciach w prawo)

<sup>22</sup> Pojęcie wektora jest niezwykle użyteczne. Zastanówmy się, jak opisać ruch łódki w poprzek rzeki. Łódka ma własny napęd, w kierunku w poprzek rzeki, ale prąd rzeki zanosi ją wzdłuż rzeki. Dwa wektory prędkości się sumują i dają prędkość *wypadkową*. Zdjęcie przedstawia Wisłę w Toruniu. Ale w Bydgoszczy sytuacja dla podobnej łódki jest podobna. Opis wektorów w Toruniu można więc zastosować do opisu dryfu łódki w Bydgoszczy. I to jest właśnie zasadnicze uogólnienie, na jakie pozwala pojęcie wektora: abstrakcja od określonego obiektu (i miejsca w przestrzeni), a uogólnienie na kierunek w dowolnym punkcie przestrzeni. W opisie matematycznym wektora istotne są jego współrzędne określające kierunek, wartość i zwrot, a punkt zaczepienia jest niejako dodany.



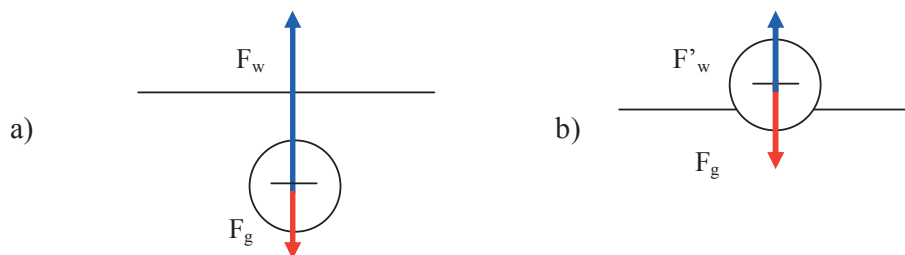
**Fot. 4.5.** Dwie identyczne siły ciągną półkule magdeburskie w przeciwnych kierunkach. Na punkt środkowy działa wypadkowa siła równa zero – pozostaje on w spoczynku

Wektory o tych samych wartościach, działające w przeciwne strony i zaczepione w tym samym punkcie równoważą się wzajemnie. Mówimy też, że *wypadkowy wektor* (czyli *wektorowa suma* składowych) przyjmuje wartość zero. Tak jest na fot. 4.5., taką też sytuację mieliśmy w poprzednim rozdziale na rys. 4.2 dla leżącego na stole przedmiotu. W obu przypadkach ciała pozostawały w spoczynku.

Z siłami równoważącymi się mamy też często do czynienia w ruchu. Po otwarciu spadochronu skoczek opada ruchem jednostajnym, gdyż siła oporu powietrza równoważy siłę ciężkości. Samolot utrzymuje się w powietrzu, gdyż siła nośna równoważy siłę ciężkości. Piłka czy nawet statek pływają po wodzie, gdyż siła ciężkości jest zrównoważona przez siłę wyporu (fot. 4.2. b i 4.2. c).

Inaczej jest, gdy piłka jest zanurzona w wodzie – puszczonej swobodnie będzie wypływać na powierzchnię, z rosnącą prędkością, gdyż siła wyporu po jej zanurzeniu jest większa od ciężaru (rys. 4.5a).

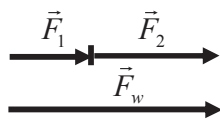
Natomiast dla ciała pływającego na powierzchni wody znów będziemy mieli do czynienia z równoważącymi się siłami ciężkości i wyporu (rys. 4.5b).



**Rys. 4.5.** a) Siły działające na piłkę zanurzoną w wodzie; b) siły działające na piłkę pływającą na powierzchni. Siła wyporu  $F_w$  działająca na zanurzoną piłkę jest większa od siły ciężkości  $F_g$  i piłka wypływa („wyskakuje”) na powierzchnię. Kiedy piłka pływa po powierzchni wody, siła wyporu  $F'_w$  jest mniejsza niż przy pełnym zanurzeniu: równoważy ona siłę ciężkości

W sytuacji, gdy dwie siły  $F_1$  i  $F_2$  działają w tę samą stronę (rys. 4.6), obliczając całkowitą siłę (inaczej: siłę wypadkową  $F_w$ ), będziemy dodawać wartości tych sił:

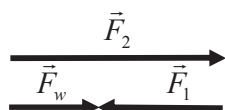
$$F_w = F_1 + F_2.$$



**Rys. 4.6.** Dodawanie sił (wektorów) o tym samym zwrocie

Jeżeli natomiast siły działają w przeciwne strony (rys. 4.7.), musimy odjąć ich wartości:

$$F_w = F_2 - F_1.$$



**Rys. 4.7.** Dodawanie sił (wektorów) o zwrocie przeciwnym.

Przykład 4.3.

Na spadające ciało działa pionowo w dół siła o wartości 100 N. Siła oporu powietrza wynosi 10 N. Jaka jest wartość siły wypadkowej działającej na to ciało?

Mamy tu do czynienia z sytuacją przedstawioną na rys. 4.7., siły działają w przeciwne strony, zatem  $F_w = 100 \text{ N} - 10 \text{ N} = 90 \text{ N}$ .

Nieco trudniejsze jest obliczanie siły wypadkowej w ogólnym przypadku, gdy poszczególne składniki  $F_1$  i  $F_2$  działają pod pewnym kątem (patrz rys. 4.3.). W celu określenia siły wypadkowej dodajemy wówczas do siebie dwa wektory składowe. Graficznie wektor wypadkowy reprezentuje przekątna równoległoboku zbudowanego na składowych.

Podstawową cechą oddziaływań jest ich *wzajemność*. Działaniu każdej siły towarzyszy przeciwdziałanie, każdej akcji – reakcja. Przykład z areny sportowej przedstawia fot. 4.6. Dokładniej powiemy o tym w rozdziale 4.6.



**Fot. 4.6.** Wzajemność sił – działaniu siły towarzyszy jej przeciwdziałanie. Miotaczka działa na kulę siłą powodującą ruch po okręgu – siłą dośrodkową. Kula działa na miotaczkę siłą *reakcji*. Obecność sił dośrodkowych i sił reakcji wykorzystuje się do odkrywania planet poza Układem Słonecznym.

<http://www2.pictures.gi.zimbio.com/Australian+Athletics+Championships+Day+3+HtdWBM3xZ2el.jpg>

### 4.3. I prawo dynamiki Newtona

Zastanawiając się, co jest przyczyną spadania ciał, Newton starał się podać ogólny opis sytuacji, w których na ciało działa bądź nie działa siła. Oczywiście nie sposób wyobrazić sobie sytuacji, w której na ciało nie będzie działać żadna siła, choćby z tej prostej przyczyny, że np. grawitacja występuje w każdym miejscu i to ze strony różnych ciał – Ziemi, Słońca, Księżyca, innych planet i gwiazd. Fizycy radzą sobie z tym problemem, dokonując przybliżeń i uproszczeń – np. rozważając zachowanie się ciał w pobliżu powierzchni Ziemi zaniedbują siły pochodzące od pozostałych ciał. Jest to zupełnie uzasadnione, gdyż żadnych skutków ich działania nie zaobserwujemy.

Znacznie częściej mamy do czynienia z przypadkami, w których na ciało działają siły równoważące się wzajemnie. Raz jeszcze przypomnijmy sobie przedmiot leżący na stole (przykład 4.2.) czy też ciało pływające na powierzchni wody (rys. 4.5. b). Można by sądzić, że działanie sił równoważących się wzajemnie jest charakterystyczne dla sytuacji spoczynku. Tymczasem równie powszechne jest równoważenie się sił dla ciał będących w ruchu – zwracaliśmy już uwagę na spadającego skoczka spadochronowego czy lecący samolot. Również ciała poruszające się po powierzchni Ziemi w wielu przypadkach podlegają działaniu (oczywiście w uproszczeniu stosowanym przez fizyków) dwóch sił: ziemskiego przyciągania oraz sile reakcji podłoża (często określanej jako *siła sprężystości podłoża*), towarzyszącej sile nacisku (fot. 4.7.).



**Fot. 4.7.** Na poruszającą się (swobodnie puszczoną) kulę do kręgli działają siła ciężkości i siła reakcji podłoża. Siła tarcia może zostać pominięta w rozważaniach nad tym rodzajem ruchu

Mówiąc ogólnie – w sytuacjach, w których na ciało działają siły równoważące się wzajemnie, **nie następuje zmiana stanu ruchu ciała**. Tak więc ciało pozostaje w spoczynku, jeśli wcześniej już w tym spoczynku było, lub też zachowuje swój poprzedni ruch – porusza się bez zmiany prędkości, a więc jednostajnie i po linii prostej.

Podsumowując, dochodzimy do sformułowania **I zasady dynamiki Newtona**:

Jeżeli na ciało działają równoważące się siły, to ciało pozostaje w *spoczynku* lub porusza się *ruchem jednostajnym prostoliniowym*.

Podkreślmy, że jest to bardzo ważne stwierdzenie. W potocznym rozumieniu wydaje się, że jeśli na ciało poruszające się nie działają żadne siły, to „ono się zatrzyma”. Nic bardziej błędnego! Jeśli ciało zatrzymuje się, to właśnie działają na nie siły, na przykład siła tarcia.

Sformułujmy jeszcze zwięźle I prawo Newtona:

Jeżeli na ciało nie działają żadne siły, to jego prędkość pozostaje *stała*.

W tym rozumieniu prędkość stała oznacza stałą co do wartości (czyli również zerową) i stałą co do kierunku (czyli ruch prostoliniowy). „Żadne siły” oznaczają natomiast siłę (pojedynczą lub wypadkową) równą *zeru*.

Warto zwrócić uwagę, że rozważamy tu ruch ciała w pewnym *układzie odniesienia*, którym najczęściej jest powierzchnia podłoża i otaczająca je najbliższa przestrzeń (ogólnie: powierzchnia Ziemi, wody itp.).

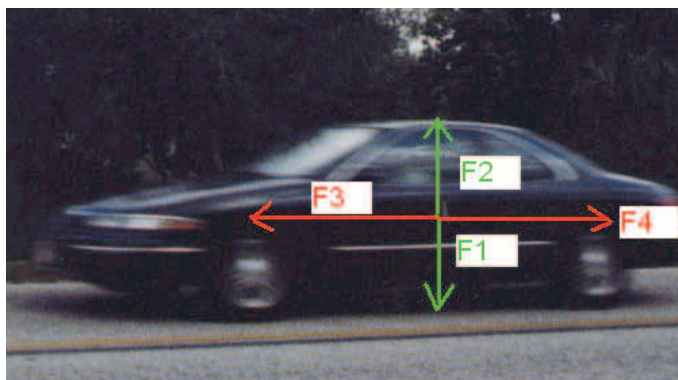
Prawdziwe jest też zdanie odwrotnie sformułowane: jeżeli ciało pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, to siły działające na to ciało muszą się równoważyć (siła wypadkowa jest równa zeru). To stwierdzenie bywa bardzo pomocne w rozwiązywaniu wielu zadań i problemów.

Przykład 4.4.

Jadący po linii prostej ze stałą prędkością samochód napędzany jest siłą ciągu silnika o wartości 1000 N. Jaka jest łączna wartość sił oporu i tarcia, które działają w tej sytuacji?

Rozwiązanie:

Na jadący samochód działają aż cztery siły (fot. 4.8.).



**Fot. 4.8.** Siły działające na samochód poruszający się ze stałą prędkością:  $F_1$  – siła ciężkości,  $F_2$  – siła reakcji podłoża,  $F_3$  – siła ciągu silnika,  $F_4$  – siły oporów ruchu

Dwie z nich to znana już nam z poprzednich przykładów para siły ciężkości  $F_1$  oraz siły sprężystości podłoża  $F_2$ . W tym przykładzie nie podano ich wartości, ale nie jest to nam potrzebne do rozwiązania, gdyż te dwie siły równoważą się i nie mają wpływu na stan ruchu ciała. Natomiast druga para, utworzona z jednej strony przez siłę ciągu silnika  $F_3$ , a z drugiej – przez siły oporu powietrza i tarcia  $F_4$ , też musi się wzajemnie zrównoważyć, aby spełniona była I zasada dynamiki. Zatem znając wartość siły  $F_3 = 1000$  N, możemy stwierdzić, że wartość siły oporu powietrza i tarcia będzie taka sama i podać jej wartość jako  $F_4 = 1000$  N. Pomimo działania czterech sił mamy więc sytuację, w której wypadkowa siła jest równa zeru!



#### 4.4. II prawo dynamiki Newtona

W poprzednim podrozdziale podaliśmy kilka przykładów równoważących się sił. To właśnie wtedy stan ruchu ciała nie ulega zmianie. Możemy się więc domyślać, że w sytuacji przeciwnej, w której jedna z sił zaczyna przeważać, będziemy ten stan zmieniać. Na ogół tak właśnie kojarzymy działanie siły z jej skutkami. Będą nas interesować skutki dynamiczne, a więc związane z ruchem. Aby poruszyć ciało, musimy użyć siły. Równie koniecznym warunkiem zatrzymania ciała poruszającego się jest przyłożenie siły<sup>23</sup>.

Pod wpływem siły będzie się zmieniać prędkość ciała; siła może ciało rozpędzać (jeśli podziała zgodnie z kierunkiem ruchu) lub też je zatrzymać (działając przeciwnie do kierunku ruchu). W obu przypadkach fizycy określają *przyspieszenie*  $a$  – patrz rozdział 3.3:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

jako miarę zmiany prędkości. Im szybciej ciało się rozpędza (lub zatrzymuje), tym większe jest jego przyspieszenie. Co jest przyczyną zmiany stanu ruchu? Jest nią właśnie działająca siła. Jeśli ta siła pozostaje stała, to stałe pozostaje przyspieszenie ciała.

Możemy już podać ogólne prawo – zwane też **II zasadą dynamiki Newtona**:

Jeśli na ciało działa stała, nie zrównoważona siła, to ciało porusza się będzie ruchem jednostajnie zmiennym, z przyspieszeniem wprost proporcjonalnym do działającej siły, a odwrotnie proporcjonalnym do masy ciała.

$$a = \frac{F}{m} \quad (4.1.)$$

Pamiętajmy, że sytuacja, w której na ciało działa tylko jedna siła, należy do wyjątków. Rozważając siłę działającą na ciało, będziemy najczęściej mieli na myśli *siłę wypadkową* – czyli „efektywną” siłę po zsumowaniu wszystkich składowych.

Druga część podanego prawa oznacza, że jeśli taką samą siłą podziałamy na dwa ciała o różnych masach, to większe przyspieszenie (czyli silniejszy efekt) uzyskamy dla mniejszej masy. Trudniej zmienić stan ruchu ciała o większej masie – mówimy, że ma ono większą *bezwładność*.

Przykład 4.5.

Siła o wartości 10 N działa na dwa ciała, o masach 2 i 5 kg. Jakie przyspieszenia uzyskają obie masy?

Rozwiązanie:

Stosując wzór 4.1. obliczamy wartości przyspieszeń – wynoszą one odpowiednio:

$$a_1 = \frac{10 \text{ N}}{2 \text{ kg}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{i} \quad a_2 = \frac{10 \text{ N}}{5 \text{ kg}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

<sup>23</sup> Wszelkie pochodzące z codziennego doświadczenia obserwacje, w których ciała poruszające się w końcu się zatrzymują, opierają się na działaniu sił oporu i tarcia; jeśli te ostatnie nie występują, to ciało raz wprowadzone w ruch może się poruszać bez końca – tak jak to dzieje się z krążącym wokół Ziemi Księżycem albo z planetami w ich ruchu wokół Słońca.

Druga zasada dynamiki pozwoli nam określić ogólny sposób obliczania siły:

$$F = m \cdot a.$$

Na podstawie tego związku podajemy definicję niutona:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2},$$

co odczytujemy – 1 niuton jest to siła, która ciału o masie 1 kg nadaje przyspieszenie 1 m/s<sup>2</sup>.

Patrząc na podany przed chwilą przykład, widzimy, że siła 10 N może ciału o masie 2 kg nadać przyspieszenie 5 m/s<sup>2</sup>, z kolei ciału o masie 5 kg – przyspieszenie 2 m/s<sup>2</sup>. Gdyby zaś masa wynosiła 1 kg, jej przyspieszenie osiągnęłoby wartość 10 m/s<sup>2</sup>. Ta ostatnia wielkość to nic innego, jak przybliżona wartość przyspieszenia, z jakim ciała spadają na powierzchnię ziemi, czyli wartość przyspieszenia ziemskiego  $g$ . Możemy podać wzór:

$$F = m \cdot g,$$

który pozwala obliczyć *siłę ciężkości*, czyli po prostu **ciężar** ciała<sup>24</sup>. Łatwo zauważyć, że wartość ciężaru w niutonach dla dowolnego ciała to jego masa przemnożona przez 10, np. ciało o masie 1 kg waży 10 N, o masie 10 kg – 100 N, zaś o masie 100 kg – 1000 N albo 1 kN (kiloniuton).

Ćwiczenie 4.1.

Określ przybliżoną wartość swojego ciężaru w niutonach.

Przykład 4.6.

Bolid Roberta Kubicy o masie 600 kg przyspiesza do 100 km/h w ciągu 2,9 s. Oblicz siłę ciągu wytworzoną przez silnik bolidu (siły oporu i tarcia pomijamy).

Rozwiązanie:

Na początek, ze wzoru  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ , możemy obliczyć przybliżoną wartość przyspieszenia (pamiętajmy o przeliczeniu prędkości na m/s!):  $a = 9,58 \text{ m/s}^2$  – zwróćmy uwagę, że jest ono tylko nieznacznie mniejsze od ziemskiego! Przemnażając przez masę jako siłę ciągu, otrzymamy wartość 5748 N lub raczej (w przybliżeniu) 5700 N.

*Uwaga dla lubiących porządek, czyli poukładaną wiedzę ☺*

Patrząc na ogólny wzór na siłę

$$F = m \cdot a,$$

warto zauważyć, że mamy tu do czynienia z dwiema wielkościami wektorowymi – siłą i przyspieszeniem. Siła powstaje przez przemnożenie przyspieszenia przez określoną liczbę (masa  $m$  jest wielkością *skalarną*, tzn. nie posiada charakterystycznych dla wektorów cech kierunku, zwrotu i punktu przyłożenia). Oznacza to w szczególności, że te dwie wielkości będą **zawsze** nierozzerwalnie ze sobą związane. Jeżeli potrafimy wskazać działającą na ciało siłę wypadkową, to na pewno taki sam kierunek i zwrot będzie miało przyspieszenie ciała! Pamiętajmy tylko, że *kierunek* ruchu ciała *może być* różny od zwrotu przyspieszenia.

<sup>24</sup> Będziemy tu przyjmować przybliżoną do 10 m/s<sup>2</sup> wartość przyspieszenia ziemskiego; w rzeczywistości przy powierzchni Ziemi zmienia się ona od około 9,78 m/s<sup>2</sup> na równiku do około 9,83 m/s<sup>2</sup> na biegunach

Sformułujmy ponownie II prawo Newtona:

Siła działająca na ciało  $\mathbf{F}$  i jego przyspieszenie  $\mathbf{a}$  są wprost proporcjonalne  $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$ .  
**Współczynnikiem proporcjonalności jest masa ciała  $m$ .**

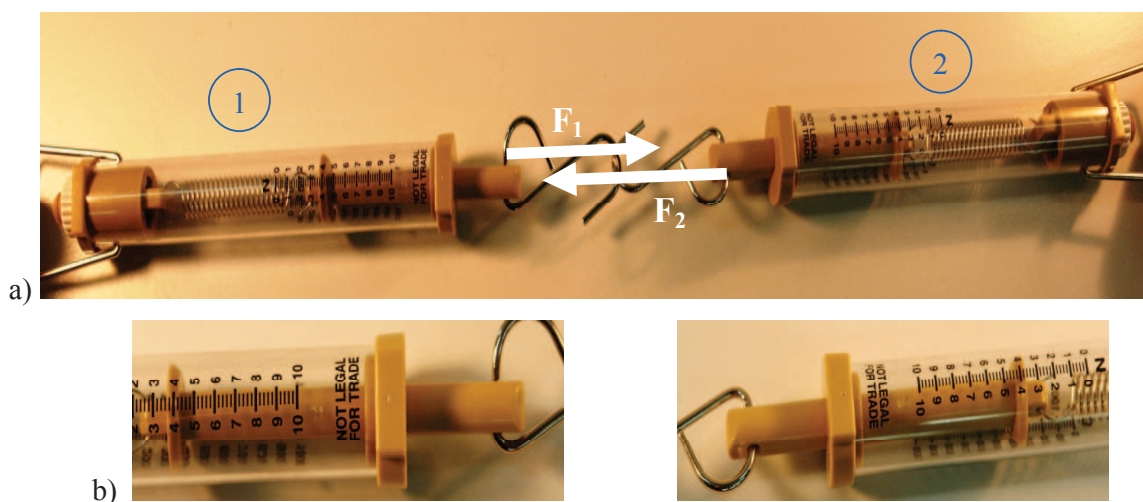
Okazuje się, że masa, którą mierzymy w II prawie Newtona, jest taka sama, jaką mierzymy badając ciężar ciała przyciąganego przez Ziemię, nawet jeśli pozostaje ono w spoczynku. Dlaczego jedna masa (tzw. inercyjna) jest równa drugiej (tzw. grawitacyjnej) tego dzisiaj jeszcze nie wiemy. Jeśli to wyjaśnisz, czeka Cię Nagroda Nobla!

#### 4.5. III prawo dynamiki Newtona

Wspominaliśmy już w rozdziale 4.3., że podstawową cechą oddziaływań jest ich wzajemność. Miarą oddziaływań jest siła, przekonajmy się więc, jakie siły towarzyszą oddziaływaniom.

Przykład 4.7.

Obserwujemy wskazania połączonych ze sobą siłomierzy podczas ich rozciągania. Niezależnie od tego, czy doświadczenie wykonuje jedna osoba, czy też dwie, w każdej sytuacji wskazania obu siłomierzy są jednakowe. Siły mają przeciwne zwroty, ale *nie równoważą się* wzajemnie – działają na różne ciała i mają różne punkty przyłożenia!



**Fot. 4.9.** A) Dwa złączone ze sobą siłomierze – oba pokazują tę samą wartość siły. Źródłem siły  $F_1$ , działającej na dynamometr „1” jest dynamometr „2”; źródłem siły  $F_2$ , działającej na dynamometr „2” jest dynamometr „1”. Oba dynamometry ciągnie studentka – jeden lewą, drugi prawą ręką; siły są przeciwnie skierowane ale o tej samej wartości; b) powiększenie rysunku a.

Ta własność sił dotyczy wszystkich ciał i wszystkich rodzajów oddziaływań – podajemy ją jako **III zasadę dynamiki Newtona**:

Jeżeli ciało  $A$  działa na ciało  $B$  siłą  $F_{AB}$ , to ciało  $B$  działa również na ciało  $A$  siłą o tej samej wartości, ale przeciwnym zwrocie.

Symbolicznie III zasadę dynamiki Newtona możemy zapisać jak

$$\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}.$$

Inaczej mówiąc, każdemu działaniu towarzyszy przeciwdziałanie, każdej akcji – reakcja. Przysłowie, które dobrze pasuje do III zasady dynamiki, to: „Jak Kuba Bogu, tak Bóg Kubie”.

Zasady dynamiki Newtona to podstawowe reguły fizyczne, które możemy zastosować w wielu sytuacjach. Pamiętajmy zawsze o ich uniwersalnym przesłaniu, pomimo zakładanych w każdym z tych praw ograniczeń.

1° Pierwszą zasadę możemy stosować tylko dla ciał spoczywających lub poruszających się ze stałą prędkością – lub inaczej, w sytuacji, gdy działające na ciało siły wzajemnie się równoważą.

2° Druga zasada pozwala nam przewidzieć zachowanie się ciała w sytuacji, gdy zadziała na stała i niezrównoważona siła. Wiemy już, że pod jej wpływem ciało porusza się będzie ruchem jednostajnie przyspieszonym.

Te dwie zasady w prosty i elegancki sposób wiążą poznawane przez was w tym rozdziale pojęcia dynamiki z poznanymi już wcześniej pojęciami opisującymi ruch.

3° Trzecia zasada ma nieco inny charakter, ale jej konsekwencje są chyba jeszcze dalej idące, a nie zawsze się o nich pamięta w czasie nauki fizyki. Szkoda, bo pomaga ona w bardzo prosty sposób rozwiązywać wiele problemów dotyczących oddziaływań – np. grawitacyjnych czy magnetycznych.

Przykład 4.8.

Zastanów się, czy potrafisz określić wartość siły, z jaką jesteś przyciągany przez Ziemię.

Rozwiązanie:

Jeśli pomyślałeś o ciężarze, albo inaczej sile ciężkości, to oczywiście masz rację. Jeżeli wykonałeś ćwiczenie 4.1, to możesz tę wartość (w niutonach) podać. Powiedzmy, że będzie to np. wartość 600 N (dla tych, których masa ciała to 60 kg).

Czy przy okazji przyszło ci już do głowy, że mógłbyś, wykorzystując III zasadę dynamiki, określić, z jaką siłą przyciągasz Ziemię? Przecież jeśli Ziemia przyciąga cię siłą 600 N, to i ty przyciągasz Ziemię siłą o tej samej wartości, lecz przeciwnym zwrocie! Trudno uwierzyć?

Przypisanie określonego skutku danej sile nie zawsze jest takie oczywiste. Wydaje się, że pojedynczy siłacz nie poruszy wielkiego holownika. W rzeczywistości jest inaczej: pojedynczy *strong-man* tak jak najsilniejszy dziś (2009 r.) Polak, Pudzian z Pucka, jest w stanie ruszyć taki holownik, tylko że przyspieszenie, które mu nada jest niezwykle małe. Co więcej, nawet ty byłbyś (byłabyś) w stanie ruszyć taki holownik. Archimedes z Syrakuz powiedział: „dajcie mi punkt podparcia a poruszę Ziemię” – i miał rację! Archimedes miał na myśli dźwignię, ale w wielu zastosowaniach stosujemy inne podobne urządzenia – ręczne podnośniki hydrauliczne, kliny, śruby, liny i bloczki.

Przykład 4.9.

*Strong-man* jest w stanie podnieść masę 400 kg. Oblicz, jakie przyspieszenie nada on holownikowi o masie 8 tysięcy „ton” (czyli 8 000 000 kg)?

Rozwiązanie:

Podniesienie masy 400 kg wymaga siły  $F = mg = 400 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 4000 \text{ N}$

Siła  $F = 4000 \text{ N}$  nada masie  $M = 8\,000\,000 \text{ kg}$  przyspieszenie  $a = F/M = 1/2000 \text{ m/s}^2$

Aby holownik zaczął poruszać się z widoczną prędkością, np.  $v = 0,5 \text{ m/s}$  (czyli mniej niż 2 km/h), musi upłynąć  $t = v/a = 1000 \text{ s}$ , czyli około 17 min. W tym czasie światło przebędzie dwukrotnie odległość od Słońca do Ziemi.

Podobnie jest w przykładzie z Ziemią i gimnazjalistą. Siła 600 N, działając na ciało o masie 60 kg, nadaje mu przyspieszenie... (sprawdź zresztą sam, skorzystaj ze wzoru podanego wraz z drugą zasadą dynamiki). Pomyśl teraz, jak ma się wielkość tej siły do wartości masy Ziemi, czyli 6 000 000 000 000 000 000 000 000 kg (w prostszym zapisie  $6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ )! Przyspieszenie, z którym „Ziemia podskakuje do Ciebie”, kiedy skaczesz z drzewa to zaledwie  $1 \cdot 10^{-22} \text{ m/s}^2$ ! Efekt jest więc taki, jaki obserwujemy na co dzień: pomimo wzajemnego działania na siebie tą samą siłą, będziemy widzieli, jak ciała spadają na ziemię, a nie Ziemię spadającą na ciała.

#### 4.6. Jeszcze raz o wektorach

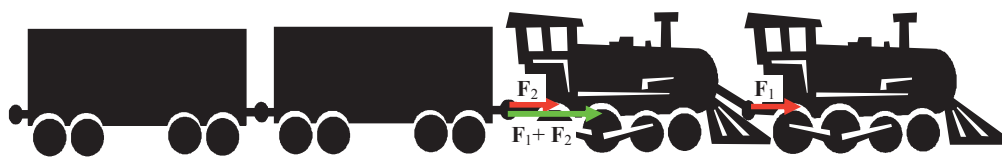
Jak już wspominaliśmy, skutek działania siły zależy nie tylko od jej wartości, ale i od kierunku, w którym ta siła działa. Na rysunku 4.3. pokazane są dwa holowniki, z których każdy ciągnie tankowiec w nieco innym kierunku. Skutek działania obu tych sił jest jednak taki, że tankowiec płynie do przodu. Dwie siły działające w różnych *kierunkach* dają skutek w kierunku *wypadkowym*.

Z kolei fotografia 4.5. przedstawia próbę rozerwania półkul magdeburskich – dwie grupy zawodników ciągną z dwóch stron. Dopóki dwie siły będą równe, kula wisząca w środku się nie przesunie. Mówimy, że dwie działające siły są równe *co do wartości*, ale mają przeciwny *zwrot*.

W ten sposób odkryliśmy trzy atrybuty siły:

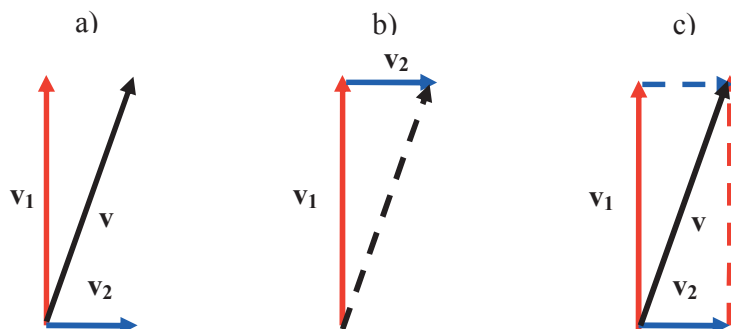
- 1) wartość,
- 2) kierunek,
- 3) zwrot.

Siły w przeciąganiu liny działają *wzdłuż* tego samego *kierunku*, ale mają przeciwny *zwrot*. Dwa holowniki ciągną siłami o tych samych *wartościach*, ale w różnych *kierunkach* (rys 4.3.). Z kolei kilka lokomotyw podłączonych do tego samego składu wagonów ciągnie siłami w tym samym *kierunku* i mającymi ten sam *zwrot*.



**Rys. 4.8.** Składanie sił działających w tym samym kierunku: lokomotywa pierwsza wytwarza siłę ciągu  $F_1$ , jest ona przyłożona do przedniego zaczepu lokomotywy drugiej, a przez nią do wagonów; lokomotywa druga wytwarza siłę ciągu  $F_2$ , przyłożoną do wagonów. W ten sposób na wagony działa sumaryczna siła  $F_1+F_2$  (zielony wektor)

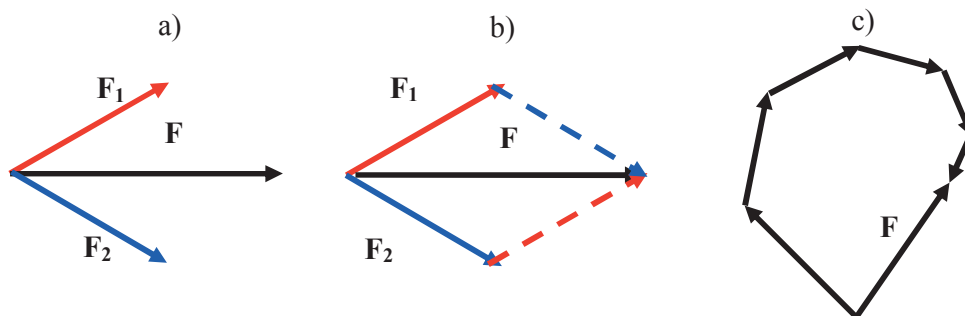
Wektorem jest również *prędkość*. Rozważmy przykład łódki płynącej w poprzek rzeki. Wioślarz wiosłuje ile sił, ale łódka i tak jest znoszona z prądem. *Wypadkowy* kierunek ruchu będzie złożeniem prędkości własnej łódki (to znaczy prędkości, jaką miałaby łódka na stojącej wodzie) i prędkości prądu rzeki, zobacz rys. 4.9. Mówimy, że *wypadkowy wektor* prędkości jest *sumą* prędkości składowych. Sposób na sumowanie wektorów jest pokazany na rysunkach 4.6.–4.10.



**Rys. 4.9.** Prędkość jest wektorem:

a) wiosłarz wiosłuje w poprzek rzeki, ale łódka znoszona jest prądem wzdłuż rzeki; wypadkowa prędkość łódki  $v$  (wektor czarny) jest złożeniem prędkości  $v_1$ , jaką miałyby ona na wodzie stojącej (wektor czerwony) i prędkości prądu  $v_2$  (wektor niebieski). Aby wyznaczyć kierunek wektora wypadkowego (sumarycznego) mamy dwa sposoby: b) możemy wektory *zsumować*, przesuując wektor „2” na koniec wektora „1” – wektor wypadkowy zaczyna się na początku wektora „1”, a kończy na końcu wektora „2”; c) na wektorach „1” i „2” budujemy *równoległobok* – wektor wypadkowy jest przekątną tego równoległoboku

Podobnie, aby obliczyć, ile wynosi i pod jakim kierunkiem działa siła *wypadkowa*, musimy działające siły *dodać*. Na rysunku 4.3. i 4.10., a czynimy to dla dwóch holowników.



**Rys. 4.10.** Siła jest wektorem:

a) aby określić, jaka wypadkowa siła  $F$  działa na ciągnięty tankowiec, sumujemy siły  $F_1$  i  $F_2$  pochodzące od dwóch holowników; b) w sumowaniu dwóch wektorów możemy skorzystać z reguły równoległoboku; c) reguła równoległoboku staje się niewygodna przy sumowaniu większej liczby wektorów, jak na przykład w zagadnieniu związanym z teorią tęczy. Wygodniej jest w tym przypadku sumować wektory metodą „początku z końcem”

Aby podkreślić, że jakaś wielkość jest wektorem, zapisujemy ją ze strzałką na górze  $\vec{F}$  lub czcionką pogrubioną. I tak „ $v$ ” będzie oznaczało jedynie *wartość* prędkości a zapis „ $\mathbf{v}$ ” oznacza *wektor* prędkości – pisząc tak, mamy na myśli nie tylko *wartość*, ale także *kierunek* i *zwrot* prędkości. Zauważ, że przemieszczenie ciała też ma kierunek, czyli jest wektorem. W przykładzie na rysunku 3.4. (policji goniącej gangsterów) wektor przemieszczenia policji jest równy sumie wektorów przemieszczenia gangsterów.

Fakt, że siła jest wektorem ma zasadnicze znaczenie w interpretacji II prawa Newtona. Zapis

$$F = m a,$$

jak w równaniu 4.1. nie oddaje całego sensu tego prawa.

Poprawniejszy jest zapis

$$\mathbf{F} = m \mathbf{a}.$$

Oznacza on, że wektor przyspieszenia ma ten sam kierunek, co wektor (sumarycznej) siły. Jest to stwierdzenie bardzo ważne dla opisu rzuconej poziomo piłki: jej tor to taki zakrzywiony „łuk”. Na lecącą kulkę działa jedynie siła grawitacji pionowo w dół. Mimo że tor jest skomplikowany, przyspieszenie kulki ma zawsze kierunek pionowo w dół, jak w spadku swobodnym.

Siła, jako wektor, jest zaczepiona do ciała w określonym punkcie – dla dynamometrów na fotografii 4.9. są to haczyki, dla holowników na zdjęciach poniżej jest to wielki zaczep na rufie.



Fot. 4.10. Holowniki – na rufie każdego z nich widoczny zaczep do liny ciągnącej statek

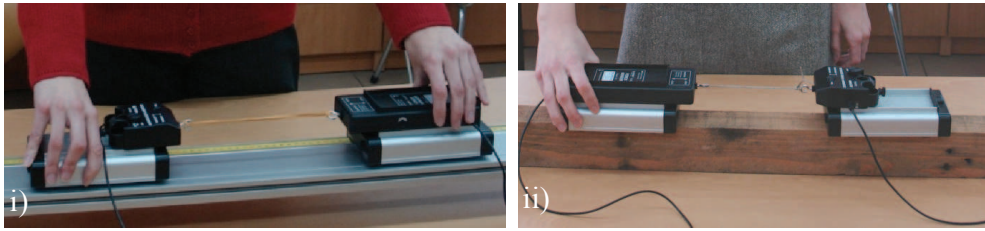
Wektor siły ma więc cztery atrybuty: wartość, kierunek, zwrot i punkt zaczepienia.

Ta ostatnia cecha jest bardzo ważna dla zrozumienia III prawa Newtona. Na rysunku 4.8 dwie siły  $F_1$  i  $F_2$  są identyczne co do wartości i mają przeciwne zwroty. Nie byłoby jednak prawidłowe powiedzenie, że na te dwa dynamometry *nie* działają siły albo że „działające siły się równoważą”. Źródłem siły działającej na dynamometr „1” jest dynamometr „2”, siła ta jest przyłożona do dynamometru „1”. I dalej, źródłem siły działającej na dynamometr „2” jest dynamometr „1”. O równoważeniu się sił mówimy jedynie, kiedy działają one na *to samo* ciało. Układ dwóch dynamometrów może się poruszać ruchem przyspieszonym a siły  $F_1$  i  $F_2$  nadal pozostaną równe co do wartości. Na rysunku 4.11. siła ( $-F_1$ ), z jaką wagony ciągną lokomotywę (do tyłu), jest taka sama, jak siła ( $F_1$ ), z jaką lokomotywa ciągnie wagony. Co jest powodem ruchu przyspieszonego całego składu? Otóż lokomotywa jest ciągnięta do tyłu przez wagony, ale sama „odpycha się” od szyn. Siła tarcia  $F_2$ , pochodząca od szyn, a działająca na lokomotywę, jest powodem ruchu przyspieszonego całego składu, o ile oczywiście  $F_2 > F_1$ .

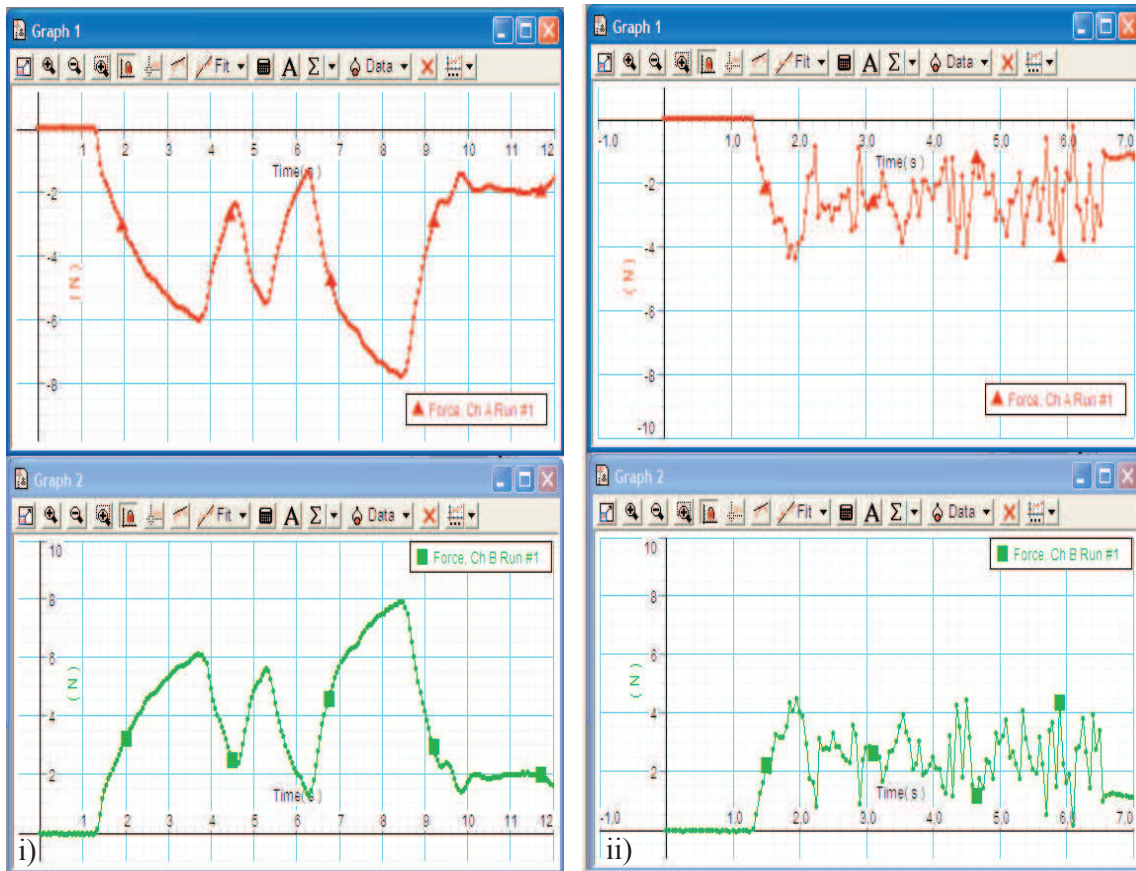


Rys. 4.11. Trzecia zasada dynamiki Newtona:

Siła ( $-F_1$ ), z jaką wagony ciągną lokomotywę (do tyłu) jest taka sama, jak siła ( $F_1$ ), z jaką lokomotywa ciągnie wagony. Źródłem przyspieszenia całego składu jest siła tarcia  $F_2$  pochodząca od szyn, a działająca na lokomotywę. Szyny działają siłą  $F_2$  na lokomotywę, bo koła lokomotywy „odpychają” szyny do tyłu



**Fot. 4.12. A)** Sprawdzenie III zasady dynamiki Newtona za pomocą pomiaru komputerowego. Czujniki siły zostały zamocowane na dwóch wózkach; i) w pierwszym doświadczeniu czujniki są połączone za pomocą elastycznej gumki a, Autorka ciągnie jeden lub drugi wózek; ii) w drugim doświadczeniu wózki są ciągnięte po chropowatej belce – raz ruszają, raz się zatrzymują



**Fot. 4.12. B)** Zależność od czasu sił działających na oba wózki. Mimo skomplikowanego charakteru doświadczenia (gumka jest napięta silniej lub słabiej, wózki ruszają lub stają) siły rejestrowane przez czujniki są zawsze takie same (i przeciwnie skierowane)

Nie wszystkie wektory mają punkt zaczepienia. Jednym z przykładów jest wektor określający wirowanie bąka – nie podajemy punktu, w którym jest zaczepiony wektor określający prędkość (i kierunek) wirowania.



#### 4.7 Przykłady oddziaływań w przyrodzie

Obserwując otaczający nas świat, możemy dostrzec szereg zjawisk, których przyczyną są oddziaływania. W niektórych przypadkach wydają się one *bezpośrednie*<sup>25</sup>, na przykład podnosimy torbę, kopujemy piłkę, przesuwamy meble. Obserwujemy też oddziaływania *na odległość*, kiedy to ciała nie dotykają się, ale wpływają na siebie. Wśród nich wyróżniamy oddziaływania:

- grawitacyjne,
- elektryczne,
- magnetyczne,
- jądrowe.

**Oddziaływania grawitacyjne** objawiają się nam przede wszystkim jako wszechobecna siła przyciągania ziemskiego. Z powodu ogromnej masy Ziemi mamy wrażenie, że jest to działanie jednostronne. Aby dostrzec *wzajemność* tych oddziaływań, należy przyjrzeć się układom ciał o bardziej zbliżonej masie, np. Ziemia–Księżyc, albo Słońce–planety, a jeszcze lepiej obserwowanym przez astronomów układom podwójnym gwiazd, czy też np. planetoid. W tego typu układach wzajemne oddziaływanie grawitacyjne utrzymuje ciała obiegające wspólny *środek masy* (fot. 4.13.).



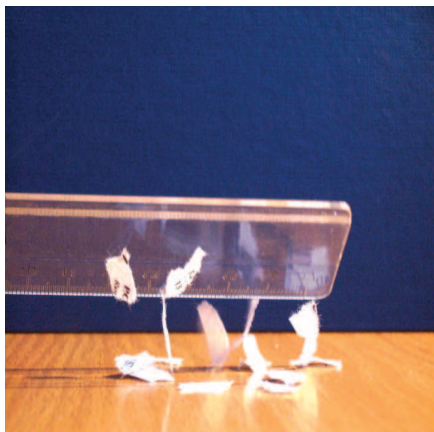
**Fot. 4.13.** Układ podwójny – planetoida 90 Antiope. Dwa składniki krążą dookoła wspólnego *środku masy*. Zob. też animacja w Internecie <http://www.boulder.swri.edu/merline/press/movie2.html>

**Oddziaływania elektryczne (elektrostatyczne)** to przyciąganie lub odpychanie naelektryzowanych ciał, np. linijka i skrawki papieru (fot. 4.14.) albo grzebień i włosy. Przyciągają się ładunki *różnych* znaków – dodatnie z ujemnymi, jak proton i elektron opisane w rozdziale I.

Oddziaływania elektryczne są niezwykle ważne – to one powodują, że elektrony krążące w atomach dookoła *jąder* atomowych nie oddalają się; to one powodują, że atomy łączą się w cząsteczki, a te z kolei w kryształy, metale i inne stałe (lub płynne) formy skupienia. Jak napisano w jednym ze znanych podręczników fizyki<sup>26</sup>, to, że szczyt Empire State Building w Nowym Jorku, wysoki na 500 metrów, odchyła się w czasie najsilniejszych wiatrów zaledwie o 1 metr, zawdzięczmy niezwykle silnym siłom elektrycznym łączącym atomy w kawałki cementu i stali.

<sup>25</sup> Pojęcie siły „bezpośrednie” jest umowne. W rzeczywistości dwa ciała stałe pozostające w „kontakcie” zbliżone są do siebie na odległości rzędu rozmiarów atomów. Atomy blisko siebie położone odpychają się, siłami elektrycznymi.

<sup>26</sup> R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*, PWN, Warszawa 1974.



Fot. 4.14. Przyciąganie kawałków papieru przez naelektryzowaną linijkę

**Oddziaływania magnetyczne** to przyciąganie lub odpychanie ciał o właściwościach magnetycznych lub dających się łatwo namagnesować (fot. 4.15).



Fot. 4.15. Oddziaływanie magnetyczne

Oddziaływania elektryczne i magnetyczne są ze sobą ściśle związane: jeśli *ładunki* elektryczne spoczywają, oddziałują jedynie siłami *elektrycznymi*, jeśli się poruszają – oddziałują również siłami *magnetycznymi*. Oba rodzaje oddziaływań określamy wspólnie jako oddziaływania elektromagnetyczne. Obok grawitacyjnych, występują one nawet w bardzo dużej (nieskończonej) odległości – są to oddziaływania *dalekozasięgowe*.

W wieku XX odkryto ponadto **oddziaływania jądrowe**, występujące tylko w bardzo niewielkiej odległości (*krótkozasięgowe*), w obrębie jądra atomu. To siły działające pomiędzy cząstkami elementarnymi tworzącymi *jądra atomowe*.

Oddziaływania rozpoznajemy po ich skutkach. Tradycyjnie przyjęło się dzielić te skutki na dwie grupy: jedna dotyczy zmian prędkości ciała (skutki *dynamiczne*), druga – zmian kształtu (skutki *statyczne*). Do skutków dynamicznych zaliczymy wprawienie ciała w ruch bądź jego zatrzymanie, a także zmianę kierunku ruchu. Z kolei zgniecenie czy rozciągnięcie to skutki statyczne. W rzeczywistości i jedno, i drugie występują równocześnie. Ich rozmiar zależy oczywiście od wartości działającej siły – mówimy, że *siła jest miarą oddziaływań*.

Skutki statyczne to inaczej odkształcenia. Niektóre z nich mogą być **nietrwale** – kiedy po usunięciu siły ciało wraca do swojego pierwotnego kształtu mówimy, że jest to ciało *sprężyste* (np. guma, gąbka). Inne ulegają odkształceniom **trwałym** – należą do nich w szczególności ciała *plastyczne* (np. plastelina, glina) oraz *kruche* (np. lód, szkło). Ale jak pisaliśmy w rozdziale I, wiele ciał umyka tej klasyfikacji.