

Zasady dynamiki Newtona



- Prędkość graniczna osiągnięta jest wtedy, gdy siła
- oporu powietrza równa jest ciężarowi ciała

Isaac Newton urodził się w 1642 r., kilka miesięcy po śmierci Galileusza. W wieku 23 lat odkrył swe słynne zasady dynamiki, przyczyniając się do odrzucenia poglądów Arystotelesa, które zdominowały sposób myślenia największych umysłów ostatnich 2000 lat. Pierwsza zasada nawiązuje do pojęcia bezwładności, wprowadzonego wcześniej przez Galileusza. Druga zasada połączyła pojęcie przyspieszenia z przyczyną je wywołującą, czyli siłą. Trzecia zasada dynamiki to słynne prawo akcji i reakcji. Te trzy zasady zostały opublikowane po raz pierwszy w najważniejszej książce tamtych czasów pt. *Principia*.

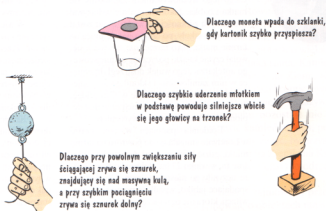
Pierwsza zasada dynamiki

Pogląd Arystotelesa, jakoby każdy ruch wymagał ciągłego „napędu”, został odrzucony przez Galileusza, który wykazał, że ruch może być kontynuowany również bez użycia siły. Tę tendencję do podtrzymywania ruchu Galileusz nazwał *bezwładnością* (*inercją*). Newton uściślił poglądy Galileusza, formułując pierwszą zasadę dynamiki, nazywaną też **prawem bezwładności**. Zasada ta, napisana w oryginale po łacinie, brzmi:

I zasada dynamiki: Jeśli na ciało nie działa żadna siła, to pozostaje ono w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Kluczową sprawą w tym sformułowaniu jest utrzymywanie bez zmian stanu ruchu tak długo, dopóki nie zadziała jakaś siła zewnętrzna. Jeśli ciało spoczywało, to pozostanie w spoczynku. Jeśli poruszało się, to nadal będzie to czynić bez zmiany kierunku ruchu i jego prędkości. Mówiąc krótko, prawo to orzeka, że ciało nie przyspiesza samo z siebie; przyspieszenie musi być narzucone z zewnątrz, wbrew tendencji do podtrzymywania pierwotnego stanu ruchu. Ciała spoczywające dążą do przebywania w stanie spoczynku, ciała poruszające się dążą do utrzymania tego ruchu bez zmiany prędkości. Ten opór ciał wobec zmian stanu ruchu nazywa się **bezwładnością (inercją)**.

Rys. 4.1. Przykłady bezwładności



Masa

Każdy obiekt materialny ma pewną masę. Zależy ona od ilości materii; im więcej materii, tym większa masa. Mówiąc o ilości materii, używamy więc pojęcia **masy**. Im większa masa ciała, tym większa jego bezwładność.

Masa jest odpowiednikiem intuicyjnego pojęcia, jakim jest **ciężar**. Często zakładamy, że coś ma dużą masę, jeśli dużo waży. Istnieje jednak pewna różnica między masą a ciężarem. Ich definicje są bowiem następujące:

Masa to ilość materii w danym przedmiocie. Jest miarą bezwładności, oporu, jaki stawia ten przedmiot, gdy chcemy go poruszyć, zatrzymać lub zmienić w jakiś sposób jego ruch.

Ciężar to siła wywierana na przedmiot w wyniku działania grawitacji.

Masa i ciężar są wzajemnie proporcjonalne. Jeśli masa wzrośnie dwukrotnie, ciężar również zwiększa się dwa razy, a gdy masa zmaleje dwukrotnie, ciężar również maleje dwa razy. Dzięki temu masa i ciężar bywają używane zamiennie. Są często mylone, gdyż ilość materii (masę) mierzy się poprzez pomiar przyciągania grawitacyjnego (ciężaru). Masa jest jednak bardziej podstawowym pojęciem niż ciężar, co często uchodzi uwadze wielu ludzi.

Zdarza się jednak, że ciężar łączymy z nieco abstrakcyjnym pojęciem bezwładności. Na przykład, gdy chcemy porównać ciężary dwóch małych przedmiotów, możemy nimi albo potrząsnąć, albo poruszyć w inny sposób, a niekoniecznie

Isaac Newton (1642–1727)



Isaac Newton urodził się jako wcześniak (który ledwo przeżył) w Boże Narodzenie 1642 roku, w tym samym, w którym zmarł Galileusz. Miejscem urodzin była farma jego matki w Woolsthorpe w Anglii. Ojciec Newtona zmarł kilka miesięcy wcześniej, wskutek czego jego wychowywaniem zajmowały się matka i babka. Jako dziecko nie wykazywał specjalnych zdolności i w wieku 14 lat został zabrany ze szkoły, po czym zajął się pracą na farmie matki. Jako farmer nie sprawdził się; wolał czytać książki pożyczane od miejscowego aptekarza. Jego wujek dostrzegł drzemiacę w nim zamilowania i skłonił go do podjęcia studiów na uniwersytecie w Cambridge. Co też uczynił i po pięciu latach otrzymał dyplom, choć bez specjalnych wyróżnień.

Epidemia panująca w tym czasie w Londynie zmusiła go do powrotu na farmę matki, gdzie kontynuował swe studia. Właśnie tu, w wieku 23 lat, dokonał odkryć, które uczyniły go nieśmiertelnym. Obserwując spadające jabłko, wpadł na pomysł siły grawitacji, która nie ogranicza się do Ziemi, lecz sięga daleko w kosmos, i którą opisał formułując prawo powszechnej grawitacji (później go także udowodnił). Wymyślił też różne metody rachunkowe, będące niezastąpionym narzędziem matematycznym w nauce. Rozszerzył prace Galileusza, formułując trzy zasady dynamiki. Opisał też naturę światła i wykazał (dzięki zastosowaniu pryzmatu), że światło jest kombinacją różnych barw. To właśnie doświadczenia z pryzmatem uczyniły go sławnym.

Po wygaśnięciu epidemii Newton powrócił do Cambridge, gdzie zyskał sławę wybitnego matematyka. Wykładowca matematyki ustąpił mu miejsca i w ten sposób Newton został profesorem matematyki; stanowisko to dzierżył 28 lat. W 1672 r. został wybrany członkiem Royal Society, gdzie zaprezentował pierwszy w świecie teleskop odbiciowy. Stoi do dziś w bibliotece Royal Society w Londynie z dopiskiem: „Pierwszy teleskop odbiciowy, wynaleziony przez Isaaca Newtona, sporządzony jego własnymi rękami”.

W wieku 42 lat Newton zaczął pisać książkę: *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*, uważaną powszechnie za największą książkę naukową wszechczasów.

Pisał ją po łacinie; praca nad nią trwała 18 miesięcy. W druku pojawiła się w 1687 r. Jej pierwsze wydanie w języku angielskim nastąpiło dopiero w 1729 roku, w dwa lata po jego śmierci. Pytany, jak mógł dokonać tylu odkryć, Newton odpowiadał, że nie były to nagle olśnienia, lecz długotrwałe, głębokie przemyslenia i ciężka praca.

W wieku 46 lat jego energia skierowała się w inną stronę, gdyż został członkiem parlamentu. Przez dwa lata uczestniczył w jego posiedzeniach, lecz ani razu nie zabrał głosu. Tylko raz się podniósł i wówczas Izba zamilkła, chcąc usłyszeć głos wielkiego człowieka. Mowa Newtona była jednak krótka: poprosił jedynie o zamknięcie okien z powodu przeciągu.

Kolejny zwrot w jego karierze to posada wartownika, a następnie mistrza w mienicy. Newton zrezygnował z profesury i poświęcił się poprawie warunków pracy w tym miejscu, ku konsternacji fałszerzy, którzy w tym czasie święcili triumfy. Utrzymał jednak członkostwo w Royal Society, którego został prezesem; odtąd aż do śmierci był corocznie wybierany na tę funkcję. W wieku 62 lat napisał książkę *Optics*, w której zebrał swoje prace na temat światła. Dziewięć lat później napisał drugie wydanie książki *Principia*.

Chociaż Newton osiwił w wieku 30 lat, do końca zachował długie, gęste, faliste włosy i nigdy nie nosił peruki, jak to było wówczas w modzie. Był skromnym człowiekiem, wrażliwym na krytykę. Nie ożenił się. Do późnej starości pozostał sprawny fizycznie i umysłowo. Mając 80 lat posiadał pełne uzębienie, świetnie widział i słyszał, miał bystry umysł. Przez swoich rodaków uważany był wówczas za największego uczonego wszystkich czasów. W roku 1705 królowa Anna nadała mu tytuł kawalera orderu. Zmarł w wieku 84 lat i został pochowany w opactwie Westminster, obok królów i bohaterów angielskich.

Newton pokazał, że świat podlega prawom natury, które nie są ani kapryśne, ani złowrogie. Wiedza ta stała się nadzieją i inspiracją dla naukowców, pisarzy, artystów, filozofów i innych; ona wprowadziła nas w Wiek Rozumu. Odkrycia i idee Newtona dosłownie zmieniły świat i przyczyniły się do rozwoju cywilizacji.



Rys. 4.2. Kowadło może nie nie wazyć, gdy znajdzie się w przestrzeni kosmicznej, np. między Ziemią i Księżycem, ale jego masa jest zawsze różna od zera



Rys. 4.3. Astronauta stwierdza, że kowadło jest nieważne trudno poruszyć w przestrzeni kosmicznej, jak i na Ziemi, mimo iż jest tam nieważkie. Założmy, że masa kowadła przewyższa masę astronauty. Czy wtedy, poruszając kowadłem, w większym stopniu porusza kowadło czy samego siebie?

dźwigać w górę. W ten sposób sprawdzamy, który przedmiot trudniej poruszyć, który stawia większy opór przy zmianie ruchu. Tak określa się w istocie bezwładność ciał.

W Stanach Zjednoczonych ilość materii w jakimś ciele określa się poprzez jego grawitacyjne oddziaływanie z Ziemią, czyli jego ciężar. Mierzy się ją w funtach. Jednak w znakomitej większości krajów ilość materii określa się prawidłowo w jednostkach masy, czyli **kilogramach**. Znajdujący się na powierzchni Ziemi kamień o masie 1 kilograma waży 2,2 funta. W systemie metrycznym jednostką siły jest **niuton**. Ciężar jednokilogramowego kamienia wynosi niecałe 10 niutonów (dokładniej: 9,8 niutona). Daleko od powierzchni Ziemi grawitacja jest mniejsza i tam kamień o masie jednego kilograma ma ciężar 1,6 niutona. Na planetach o większej grawitacji ciężar kamienia byłby większy. Masa jest wszędzie taka sama. Kamień wszędzie stawia taki sam opór przy przyspieszaniu lub hamowaniu: na Ziemi, Księżycu lub gdziekolwiek indziej. Nawet w stanie nieważkości na statku kosmicznym jego masa jest różna od zera i jest taka sama, jak na Ziemi. Waga może wskazywać zero, ale zdolność przeciwstawiania się zmianom stanu ruchu pozostaje nie zmieniona. Astronauta potrzebuje takiej samej siły, by wprawić kamień w ruch, poruszyć nim w przód i tył, jak i na Ziemi. Tyle samo energii musimy zużyć, by przyspieszyć (do tej samej prędkości) samochód na płaskiej powierzchni na Ziemi i na Księżycu. Natomiast siła potrzebna do podniesienia ciała (czyli jego ciężar) to odrębna sprawa. Masa i ciężar to różne pojęcia (patrz rys. 4.2 i 4.3).

Łatwo też pomylić dwie inne wielkości: masę i zajmowaną przez nią przestrzeń, a dokładniej — **objętość**. Najczęściej, mówiąc o obiektach masywnych, mamy na myśli obiekty o dużych rozmiarach, zajmujących dużą objętość. Ale są obiekty masywne, które zajmują małą przestrzeń, jak np. akumulator samochodowy. Nieporozumienie to bierze się także stąd, że masa i objętość są często do siebie proporcjonalne, przynajmniej dla ciał wykonanych z jednego materiału. Na przykład 2 kilogramy cukru wypełniają dwa razy większą torebkę niż 1 kilogram. To jednak nie znaczy, że masa jest równoważna z objętością. Z tego, że 2 kilogramy cukru mają dwukrotnie większą „moc słodzenia”, nie wynika, że masa jest równoważna z „mocą słodzenia”. Dwie kromki chleba mogą mieć jednakową objętość, ale różne masy. Objętość kromki można zmniejszyć (np. przez zgniecenie), ale jej masa nie ulega przy tym zmianie. Jak widzimy, masa nie musi być równoważna ani z wagą, ani z objętością ciała.

Chociaż pojęcie bezwładności wprowadził Galileusz, to jego istotę w pełni zrozumiał dopiero Newton. Prawo bezwładności odzwierciedla ruch naturalny oraz określa rodzaj ruchu pod wpływem przyłożonej siły. Arystoteles utrzymywał, że do podtrzymania lotu strzały z łuku potrzebna jest stała siła. Natomiast zasada bezwładności Newtona mówi coś odwrotnego: lot strzały jest naturalnym sposobem ruchu. Jeśli nie występuje tarcie ani opór powietrza, to strzała porusza się po linii prostej, ze stałą prędkością; do tego nie jest potrzebna żadna siła. Z kolei Arystoteles i jego następcy uważali, że ruch ciał niebieskich po orbitach kołowych jest ruchem naturalnym, nie wymagającym żadnych sił. W rzeczywistości ruch taki jest niemożliwy bez udziału sił zewnętrznych. Gdyby takich sił nie było, to ciała niebieskie powinny — wbrew spekulacjom starożytnych i średnio-wiecznych astronomów — uciekać w przestrzeń kosmiczną, lecąc po liniach prostych. Newton utrzymywał, że ich ruch po liniach zakrzywionych jest skutkiem działania jakichś sił. Jak zobaczymy w następnych rozdziałach, poszukiwania tych sił doprowadziły go do odkrycia prawa powszechnej grawitacji.

Pytania

1. Krążek hokejowy początkowo ślizga się po lodzie, a w końcu zatrzymuje się. Jak zachowanie to wyjaśniłby Arystoteles? Jak Galileusz i Newton? A jakie jest twoje zdanie!
2. Czy dwukilogramowy kawałek żelaza ma dwukrotnie większą bezwładność niż kawałek jednokilogramowy? Czy ma dwukrotnie większą masę? Czy ma dwukrotnie większy ciężar? Czy ma dwukrotnie większą objętość?
3. Czy łatwiej podnieść samochód na Ziemi, czy na Księżycu?

Druga zasada dynamiki



Rys. 4.4. Im większa masa, tym większa siła jest potrzebna, by wywołać takie samo przyspieszenie

Codziennie obserwujemy ciała, których ruch ulega zmianom. Jedne rozpoczynają ruch, inne kończą go, zatrzymując się, jeszcze inne zmieniają tor ruchu. Zmiany ruchu są zjawiskiem powszechnym, a ich przyczyną jest działanie jednej lub więcej sił. Suma tych sił, niezależnie od ich pochodzenia, powoduje przyspieszenie. Związek między przyspieszeniem a przyłożoną siłą określa druga zasada dynamiki Newtona.

II zasada dynamiki: Przyspieszenie ciała jest wprost proporcjonalne do wypadkowej siły działającej na ciało oraz odwrotnie proporcjonalne do jego masy. Kierunek przyspieszenia jest zgodny z kierunkiem tej siły.

Można to zapisać w bardziej skrótowej postaci:

$$\text{przyspieszenie} \sim \frac{\text{wypadkowa siła}}{\text{masa}}$$

lub też w zapisie symbolicznym:

$$a \sim \frac{F}{m}.$$

Znak \sim znaczy tu proporcjonalność. Ostatnią równość czytamy w ten sposób: przyspieszenie a jest wprost proporcjonalne do wypadkowej siły F oraz odwrotnie

Odpowiedzi

1. Arystoteles prawdopodobnie powiedziałby, że krążek porusza się tak, by osiągnąć swój stan naturalny, jakim jest stan spoczynku. Galileusz i Newton prawdopodobnie powiedzieliby, że naturalny jest ruch jednostajny, zatem do zatrzymania krążka pozerbna jest pewna siła, którą w istocie jest tarcie krążka o lód. Tarcie to jest dużo mniejsze niż w ruchu po drewnianej podłodze, dlatego też krążek porusza się po lodzie znacznie szybciej. Na ostatnie pytanie odpowiedzieć możesz tylko ty sam.
2. Na wszystkie pytania odpowiedź jest pozytywna. Kawałek dwukilogramowy ma dwa razy więcej atomów, niż jednokilogramowy, dlatego też zawiera on dwukrotnie więcej materii i ma dwukrotnie większą masę. W tym samym miejscu ma też dwa razy większy ciężar. A ponieważ oba kawałki mają tę samą gęstość (czyli stosunek masy do objętości), więc objętość pierwszego kawałka też jest dwa razy większa, niż drugiego.
3. Łatwiej podnieść samochód na Księżycu, gdyż tam grawitacja jest mniejsza niż na Ziemi. Podnosząc jakieś ciało, pokonujemy siłę grawitacji (czyli ciężar). Masa jest wszędzie taka sama, natomiast grawitacja na Księżycu jest 6 razy mniejsza. Zatem nasz wysiłek włożony w podnoszenie jest tam 6 razy mniejszy. Z drugiej strony, ruch w kierunku poziomym nie wymaga pokonania siły grawitacyjnej. Jeśli jedynym czynnikiem stawiającym opór przy wprawianiu ciała w ruch poziomy jest masa, to takie samo przyspieszenie wymaga takiej samej siły, niezależnie od tego, czy ciało jest na Ziemi, czy na Księżycu.

sila ręki powoduje przyspieszenie cegły



dwie razy większa siła powoduje dwa razy większe przyspieszenie



dwie razy większa siła przy dwukrotnie większej masie powoduje takie samo przyspieszenie



Rys. 4.5. Przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do siły

proporcjonalne do masy m . Oznacza to, że jeśli siła F się zwiększa, to tyle samo zwiększa się przyspieszenie (gdy F zwiększy się 2 razy, to a również się podwoi); ale jeśli m zmniejsza się, to w ten sam sposób zwiększy się a (gdy m ulegnie podwojeniu, a zmniejszy się dwukrotnie). Jeśli odpowiednio dobierzemy jednostki, to proporcjonalność możemy zastąpić równością

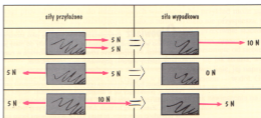
$$a = \frac{F}{m}$$

Kierunek przyspieszenia jest zgodny z kierunkiem działającej siły. Jeśli siła ta działa w kierunku ruchu, to powoduje wzrost prędkości ciała. Jeśli działa w kierunku przeciwnym, prędkość ulega zmniejszeniu. Działając prostopadle, powoduje jedynie zakrzywienie toru. Przy innych kątach występują jednocześnie oba te efekty: zmiana prędkości i zakrzywienie toru. W każdym przypadku przyspieszenie ciała następuje w kierunku działającej na nie siły wypadkowej.

Najprostszym wyobrażeniem pojęcia siły to pchanie lub ciągnięcie. Siły mogą być różnego rodzaju: grawitacyjne, elektryczne, magnetyczne, czy też napięcie mięśni. Druga zasada dynamiki Newtona precyzuje pojęcie siły, wiążąc je z przyspieszeniem przez nią wywołanym. Określa ona siłę jako coś, co wywołuje przyspieszenie ciała. Mówi też, że większe siły wywołują większe przyspieszenia. Dla ustalonego obiektu siła dwa razy większa powoduje dwa razy większe przyspieszenie, siła trzy razy większa — to trzy razy większe przyspieszenie itd. Przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do przyłożonej siły (rys. 4.5).

Cały czas mówimy o sile wypadkowej, ponieważ najczęściej mamy do czynienia z więcej niż jedną siłą. Wyjaśnimy dokładniej to pojęcie. Jeśli we dwóch pchacie jakiś przedmiot w tę samą stronę, to wypadkowa siła działająca na przedmiot jest dwa razy większa od siły każdego z was. Przyspieszenie tego przedmiotu będzie dwa razy większe niż w przypadku siły pojedynczej. Jeśli jednak obaj działacie w przeciwną stronę, przedmiot w ogóle nie będzie przyspieszał. Obie siły wywierane na przedmiot znoszą się, gdyż mają przeciwne kierunki. Każda z sił może być traktowana jako przeciwieństwo drugiej. Ich suma algebraiczna równa jest zeru. Wypadkowa siła (siła „netto”) znika.

Załóżmy teraz, że pchasz jakieś ciało siłą 20 niutonów, a twój kolega pcha to ciało w przeciwną stronę siłą równą 15 niutonom. Przyspieszenie ciała będzie takie, jakbyś na niego działał w pojedynkę siłą równą 5 niutonom. Te 5 niutonów to wartość siły wypadkowej. Jeśli siły mają ten sam kierunek, to się dodają, jeśli ich kierunki są przeciwne, to się odejmują (rys. 4.6). Przyspieszenie ciała określone jest przez siłę wypadkową.



Rys. 4.6. Siła wypadkowa

sila ręki nadaje cegle
pewne przyspieszenie



ta sama siła, działając na dwie
cegły, powoduje dwa razy
mniejsze przyspieszenie



w przypadku trzech cegieł
przyspieszenia jest 3 razy
mniejsze



Rys. 4.7. Przyspieszenie jest odwrotnie proporcjonalne do masy

Każda siła ma określoną wartość i kierunek. Jest więc wielkością wektorową. Gdy na ciało działa jednocześnie dwie lub więcej sił, dodają się one w sposób wektorowy. Jedyne gdy są równoległe (o kierunkach zgodnych lub przeciwnych), to dodają się algebraicznie. Jeśli jednak ich kierunki nie są równoległe, lecz tworzą różne kąty, to ich dodawanie należy przeprowadzić zgodnie z regułą równoległoboku, którą omówiliśmy w rozdziale 3. Aby nie komplikować zbytnio naszego kursu fizyki, w tym rozdziale nie będziemy rozpatrywać sił ustawionych ukośnie względem siebie. Takie przypadki opisane są w dodatku D oraz w książce *Conceptual Physics Practice Book*.

Siła i masa wywierają przeciwstawne działanie (rys. 4.7). Im masywniejsze ciało, tym wolniej przyspiesza. Przy tej samej sile dwukrotne zwiększenie masy powoduje dwa razy mniejsze przyspieszenie; trzy razy większa masa oznacza trzykrotnie mniejsze przyspieszenie. Zwiększanie masy zmniejsza przyspieszenie. Na przykład, jeśli silnik samochodu ford zamontować w cadillacu i taki sam silnik w hondzie civic, to należy oczekiwać różnych przyspieszeń, mimo że w obu samochodach działa taka sama siła. Samochód o większej masie (cadillac) stawia większy opór przy przyspieszaniu niż mały samochód (honda). Aby uzyskać większe przyspieszenie w cadillacu, zależy w nim umieścić silnik o większej mocy. Większa masa wymaga odpowiednio większej siły, by uzyskać to samo przyspieszenie. Mówimy, że przyspieszenie jest odwrotnie proporcjonalne do masy.*

Reasumując, przyspieszenie ciała zależy i od przyłożonej siły i od jego masy.

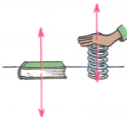
Pytanie W rozdziale 2 definiowaliśmy przyspieszenie jako szybkość zmian prędkości, tzn. $a = \Delta v / \Delta t$. Czy można powiedzieć, że przyspieszenie to stosunek siły do masy, $a = F/m$? Co jest więc definicją przyspieszenia?

Ruch bez przyspieszenia — równowaga

Gdy przyspieszenie ciała wynosi zero, mówimy o **równowadze mechanicznej**. Przyłożenie siły powoduje wytrącenie z równowagi. Wypadkowa siła działająca na ciało znajdujące się w równowadze jest równa zeru. Książka leżąca nieruchomo na stole jest w równowadze, ponieważ nie przyspiesza. Ta sama książka ślizgająca się ze stałą prędkością po gładkiej powierzchni także jest w stanie równowagi, gdyż ona nie przyspiesza. W obu przypadkach wypadkowa siła działająca na książkę jest równa zeru. Na początku zajmujemy się równowagą w stanie spoczynku, którą nazywa się **równowagą statyczną**.

Odpowiedź Przyspieszenie definiuje się jako stosunek przyrostu prędkości do czasu. Jest ono wywołane działaniem siły. Stosunek siły do masy jest przyczyną określającą wartość tych zmian. Przyspieszenie zostało więc zdefiniowane w rozdziale 2, natomiast w tym rozdziale podaliśmy warunki pojawienia się przyspieszenia.

* Masa może być zdefiniowana operacyjnie jako współczynnik proporcjonalności między siłą i przyspieszeniem, pojawiający się w drugiej zasadzie dynamiki. Można ją bowiem przepisać w postaci $m = F/a$. Jednostka masy to taka jej ilość, która dostaje jednostkowego przyspieszenia pod wpływem jednostkowej siły. Zatem 1 kg to masa takiego ciała, które przy działaniu siły równej 1 N przyspiesza 1 m/s². W przyszłości zobaczymy, że masa jest skoncentrowaną formą energii.



Rys. 4.8. (Z lewej) Stół działa na książkę siłą skierowaną w górę; jest ona równa skierowanemu w dół ciężarowi książki. (Z prawej) Sprężyna działa na dłoń siłą skierowaną do góry. Jest ona równa sile ściskania, jaką ręka wywiera na sprężynę w dół

Rozważmy ponownie książkę leżącą na stole. Jej przyspieszenie jest równe zeru. Zgodnie z drugą zasadą dynamiki wypadkowa siła działająca na nią też musi być równa zeru. Ciężar książki jest siłą działającą w dół, zatem musi istnieć druga siła działająca w górę. Tą siłą jest siła podtrzymująca książkę, która jest prostopadła („normalna”, jak często się mówi) do powierzchni stołu. Siła podtrzymująca skierowana jest w górę, a jej wartość jest równa sile grawitacji (ciężarowi) skierowanej w dół (rys. 4.8, po lewej).

Działanie stołu można lepiej zrozumieć przez porównanie ze zginiętą sprężyną (rys. 4.8, po prawej). Naciskając sprężynę (w dół), czujesz, jak ona naciska na rękę (w górę). Podobnie zachowuje się książka; leżąc na stole naciska na jego atomy, które zachowują się jak małe sprężynki wytwarzające siłę podtrzymującą. Ponieważ książka jest w stanie równowagi, więc siła podtrzymująca musi być równa ciężarowi książki. Mrówka znajdująca się między książką i stołem odczułaby obie te siły: z góry uciskałby ją ciężar książki, z dołu — reakcja stołu.

Stojąc na wadze łazienkowej, wywierasz na jej sprężynę nacisk z góry (grawitacja). Podłoga naciska sprężynę z dołu. Dzięki odpowiedniemu wyskalowaniu ściśnięta sprężyna podaje twój ciężar. W ten sposób sprężyna mierzy reakcję stołu. Ponieważ w tym momencie jesteś w stanie równowagi, wypadkowa siła równa jest zeru. Siła reakcji i twój ciężar muszą więc mieć tę samą wartość. Jeśli nie ma przyspieszenia, to albo nie ma żadnej siły, albo istniejące siły tworzą taką kombinację, że ich wypadkowa jest równa zeru. Zerowanie się wypadkowej sił w stanie równowagi prowadzi niekiedy do interesujących wniosków. Na przykład może się zdarzyć, że widać jakąś siłę działającą na ciało, a mimo to ciało nie przyspiesza. Oznacza to, że musi istnieć inna siła, o identycznej wartości i przeciwnie skierowana. Wypadkowa siła działająca na ciało w stanie równowagi musi być zawsze równa zeru.

Jeśli wiesz na linie, jej atomy nie są ściśnięte, lecz rozsunięte od siebie. Wewnątrz liny powstaje napięcie. Napięta lina zachowuje się jak struna, wydając dźwięk przy szarpaniu. Kiedy wiesz nieruchomo na pionowej linie, jej napięcie jest równe twojemu ciężarowi. Lina ciągnie w górę, a twój ciężar — w dół. Gdy wiesz na dwóch linach pionowych (rys. 4.9), twój ciężar rozkłada się po połowie na obie liny. Jesteś wtedy w równowadze statycznej. Przypadek zawieszania na linach ukośnych omówiony jest w książce *Conceptual Physics Practice Book*.



Rys. 4.9. Suma sił obu kołeczek (działających w górę) równa jest ciężarowi dziewczynki

Pytania

1. Przypuśćmy, że stoisz jednocześnie na dwóch wagach łazienkowych tak, by twój ciężar rozkładał się jednakowo na obie nogi. Co wskażą obie wagi? Jak zmienią się ich wskazania, gdy obciążenia nóg nie będą jednakowe?
2. Naciągnij linę przymocowaną do ściany siłą 100 N. Jaka jest wypadkowa siła działająca na linę? Jakie jest napięcie liny? Dlaczego obie odpowiedzi się różnią?



Rys. 4.10. Po uderzeniu kijem krążek hokejowy ślizga się po lodzie praktycznie bez przyspieszenia

Równowaga dynamiczna występuje wtedy, gdy ciało porusza się bez przyspieszenia. Rozważmy krążek hokejowy, ślizgający się po lodzie ze stałą prędkością. Nie ma on przyspieszenia, gdyż wypadkowa siła jest równa zeru. Kula tocząca się ze stałą prędkością po poziomym torze kreglarskim jest w stanie równowagi dynamicznej aż do momentu uderzenia w kregle. Gdy jednostajnie pchaś pojemnik wzdłuż hali fabrycznej, wprawiasz go w stan równowagi dynamicznej. W tym przypadku siła, jaką ty wywierasz na pojemnik, jest zrównoważona przez siłę tarcia między pojemnikiem a podłogą. Sumaryczna siła jest równa zeru, dzięki czemu pojemnik nie przyspiesza. Ciało poruszające się bez przyspieszenia to ciało pozostające w stanie równowagi dynamicznej.

Brak przyspieszenia nie oznacza, iż prędkość jest równa zeru. Oznacza tylko to, że prędkość się nie zmienia; nie zwiększa się ani nie zmniejsza. Większość ciał porusza się w ośrodkach, które powodują tarcie; na jego pokonanie potrzebna jest dodatkowa siła.

TARCIE. Siła tarcia pojawia się wtedy, gdy jedna powierzchnia ślizga się po drugiej. Przyczyną tarcia są różne nierówności na styku tych powierzchni. Jego wartość zależy od rodzaju powierzchni i wzajemnego nacisku. Nawet powierzchnie wyglądające jako bardzo gładkie mają wiele nieregularności, które utrudniają ruch. W wielu punktach styku atomy przylegają do siebie. Podczas ruchu powierzchni trzeba albo pokonywać nierówności, albo odrywać atomy. W obu przypadkach potrzebna jest siła.

Odpowiedzi

1. Wskazania obu wag dają w sumie twój ciężar. Jest tak dlatego, że wskazania wag (równe sile reakcji podłogi) muszą zrównoważyć twój ciężar, tak by siła wypadkowa była równa zeru. Jeśli stoisz na obu wagach jednakowo, każda z nich wskaże połowę twego ciężaru. Jeśli pochyliš się w kierunku jednej z wag, to jej wskazanie będzie większe niż połowa twego ciężaru, a wskazanie drugiej wagi — mniejsze. Suma obu wskazań pozostanie nie zmieniona. Na przykład, jeśli jedna waga wskaże dwie trzecie ciężaru, to druga jedną trzecią. Zgadza się!
2. Sumaryczna siła działająca na linę równa jest zeru, gdyż pozostaje ona w spoczynku (linę jest rozciągana na obu końcach: na jednym przez twoją rękę, na drugim przez ścianę; suma obu sił jest równa zeru). Napięcie w linie działa w przeciwnych kierunkach i ma wartość 100 N, gdyż takie są siły rozciągające linę. Odpowiedzi są różne, gdyż różne są pytania. Pierwsze dotyczy sił zewnętrznych przyłożonych do liny i skutków ich działania, drugie dotyczy sił pojawiających się wewnątrz liny i będących reakcją na siły zewnętrzne.



Rys. 4.11. Pudło ślizga się w prawo pod wpływem siły 75 N. Siła tarcia o wartości 75 N działa w przeciwną stronę, wskutek czego siła wypadkowa równa jest zeru i pudło porusza się ze stałą prędkością (bez przyspieszenia)

Kierunek siły tarcia jest zawsze przeciwny do kierunku ruchu. Ciało zsuwające się po równi pochylonej doznaje tarcia skierowanego w górę równi. Ciało posuwające się w prawo doznaje tarcia skierowanego w lewo itd. Jeśli zatem ciało ma poruszać się ze stałą prędkością, to musi istnieć siła, która jest przeciwna do siły tarcia. Ich suma musi być równa zeru. Oznacza to brak przyspieszenia.

Gdy pojemnik się nie porusza, to nie ma siły tarcia. Pojawia się ona dopiero wtedy, gdy zaburzysz kontakt między powierzchniami i zaczniesz pchać pojemnik w kierunku poziomym. Jak duża? Dopóki pojemnik jest nadal w spoczynku, siła tarcia jest równa sile pchania, wskutek czego ruch pojemnika jest niemożliwy. Jeśli pchasz pojemnik siłą 70 niutonów, tarcie wynosi także 70 niutonów. Gdy zwiększysz siłę pchania do, powiedzmy, 100 niutonów, pojemnik może się znaleźć na granicy poślizgu. Tym razem tarcie przeciwstawia się ruchowi siłą 100 niutonów. Zwiększając jeszcze bardziej siłę pchania, przekraczasz tę granicę i pojemnik zaczyna się posuwać.

Jest rzeczą interesującą, że tarcie podczas ruchu jest nieco mniejsze niż tarcie tuż przed rozpoczęciem ruchu. W związku z tym fizycy i inżynierowie rozróżniają tarcie statyczne i poślizgowe. Nie będziemy rozwijać tego tematu, by nie przeładować materiału, wspomnimy jedynie o jednym przykładzie — nagłym hamowaniu samochodu. Kierowca nie powinien naciskać pedału hamulca tak mocno, by zablokować koła. W takim przypadku koła się ślizgają, a wtedy siła tarcia jest mniejsza niż przy toczeniu. Kiedy koła się toczą, ich powierzchnie stykają się z jezdnią bez poślizgu; tarcie jest wtedy tarcie statycznym, większym niż podczas poślizgu. Różnica między tymi rodzajami tarcia jest widoczna również wtedy, gdy zbyt szybko „bierziesz” zakręt. Gdy koła zaczynają się ślizgać, tarcie ulega zmniejszeniu i samochód wypada z zakrętu.

Siła tarcia nie zależy od prędkości. Samochód jadący powoli „odczuwa” podobne tarcie, jak samochód jadący szybko. Jeśli na pojemnik przesuwany z małą prędkością działa tarcie 90 niutonów, to podobne tarcie pojawi się i przy większych prędkościach. Ono może być większe, gdy pojemnik spoczywa lub gdy zaczyna się poruszać. Podczas ruchu tarcie już się praktycznie nie zmienia.

Jeszcze ciekawszą cechą tarcia jest to, że nie zależy ono od wielkości stykających się powierzchni. Jeśli będziesz przesuwal pojemnik ustawiony na mniejszym boku, to jego ciężar skoncentrujesz na mniejszej powierzchni, ale siła tarcia pozostaje taka sama. Szerokie opony stosowane w niektórych samochodach nie dają większego tarcia niż węższe. Szersze opony rozkładają ciężar samochodu na większej powierzchni i zmniejszają proces ogrzewania oraz zużycia się opon. Podobnie tarcie wywierane na samochód ciężarowy nie zależy od tego, czy ma on 4 koła, czy 18! Dzięki większej liczbie kół ciężar samochodu rozkłada się na większą powierzchnię i zmniejsza się ciśnienie w kołach. Droga hamowania też nie zależy od liczby kół. Zależy natomiast szybkość zużycia się opon — im więcej kół, tym dłuższy ich żywot.

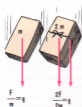
Tarcie występuje nie tylko w przypadku ciał stałych. Występuje także w cieczach i gazach, zwanych ogólnie **plynami** (ponieważ mogą płynąć). Tarcie między powierzchniami sztywnymi zależy od rodzaju powierzchni, natomiast tarcie w płynach — od ich rodzaju. Jest większe w wodzie niż w powietrzu. Ponadto tarcie w płynach zależy i od prędkości i od wielkości powierzchni styku, przeciwnie niż w przypadku ciał stałych. To wydaje się rozsądne, gdyż ilość płynu wypchniętego przez łódź lub samolot zależy od wielkości i kształtu pojazdu. Przy wolniejszym ruchu łodzi lub samolotu tarcie jest mniejsze niż przy ruchu szybszym. Szerokie obiekty wypychają więcej płynu niż węższe. W wodzie tarcie jest w przybliżeniu proporcjonalne do prędkości, o ile tylko nie jest ona zbyt duża. W powietrzu tarcie



Rys. 4.12. Siła tarcia między oponą i podłożem nie zależy od tego, jak szeroka jest opona. Stosowanie szerokich opon ma na celu zwiększenie kontaktu z jezdnią i przez to zmniejszenie wydzielonego ciepła i ścierania się opon

jest na ogół proporcjonalne do kwadratu prędkości. Jeśli zatem samolot zwiększa prędkość dwukrotnie, to tarcie (opór powietrza) rośnie cztery razy. Przy dużych prędkościach reguły te przestają obowiązywać; pojawiają się wtedy turbulencje, wiry lub fale uderzeniowe.*

Pytanie Odrzutowiec leci ze stałą prędkością 1000 km/h. Siła ciągu jego silników wynosi 100 000 N. Jakim jest jego przyspieszenie? Jaka jest siła oporu powietrza?



Rys. 4.13. Stosunek ciężaru (F) do masy (m) jest taki sam dla wszystkich ciał w danym obszarze i dlatego ich przyspieszenie jest (przy zaniedbaniu oporu powietrza) jednakowe

Ruch z przyspieszeniem g — spadek swobodny

Jak pamiętamy z rozdziału 2, Galileusz pierwszy zmierzył przyspieszenie i powiązał je ze spadaniem swobodnym. Wprowadził pojęcia przyspieszenia i bezwładności, ale nie potrafił znaleźć ich związku z siłą. Dlatego też nie był w stanie wyjaśnić, dlaczego ciała o różnych masach spadają z jednakowym przyspieszeniem. Dopiero druga zasada dynamiki Newtona umożliwiła wyjaśnienie tej zagadki.

Spadające ciała przyspieszają w kierunku Ziemi dzięki jej grawitacyjnemu przyciąganiu. Siłę tego przyciągania nazywamy ciężarem ciała.** Jeśli jest to jedyna siła działająca na ciało (co w praktyce oznacza, iż nie ma oporu powietrza), to ruch pod jej wpływem nazywamy **spadkiem swobodnym**.

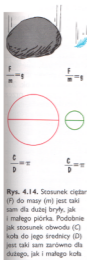
Cieęższe ciało jest przyciągane większą siłą niż lżejsze. Na przykład układ dwóch cegieł z rys. 4.13 jest przyciągany dwa razy silniej niż jedna cegła. Dlaczego więc układ dwóch cegieł nie spada dwa razy szybciej, jak sądził Arystoteles? Otóż dlatego, że przyspieszenie zależy nie tylko od siły (w tym przypadku — ciężaru), ale i od masy. Istotą siły jest zwiększanie przyspieszenia, masa zaś przeciwstawia się przyspieszaniu. Jeśli obie te wielkości zwiększą się jednocześnie dwa razy, to przyspieszenie nie zmieni się, tzn. jest takie samo jak w przypadku siły dwa razy mniejszej, przyłożonej do dwa razy mniejszej masy. Przyspieszenie wywołane siłą grawitacyjną jest równe g .

Stosunek ciężaru do masy jest stały dla wszystkich ciał. Podobnie jak stały jest stosunek długości okręgu do jego średnicy, czyli π . Stosunek ciężaru do masy jest taki sam dla ciał ciężkich i lekkich. Podobnie jak stosunek długości okręgu do średnicy nie zależy od wielkości okręgu (rys. 4.14), przyspieszenie w spadku swobodnym zawsze wynosi g . Używamy tu symbolu g , a nie a , aby odróżnić przyspieszenie grawitacyjne od innych rodzajów przyspieszenia.

Odpowiedź Przyspieszenie odrzutowca jest równe zero, bo jego prędkość jest stała. Ponieważ przyspieszenie nie występuje, więc zgodnie z drugą zasadą dynamiki wypadkowa sił jest równa zero. Oznacza to, że opór powietrza musi być równy sile ciągu (100 000 N) i mieć przeciwny kierunek niż ta siła. (Zauważ, że nie musimy znać prędkości, by znaleźć odpowiedź na powyższe pytania. Wystarczy wiedzieć, że prędkość jest stała. Wynika stąd, że przyspieszenie, a w konsekwencji i wypadkowa sił są równe zero).

* Większość pojęć fizycznych nie jest tak skomplikowana, jakby się mogło wydawać. Tarcie jest tu wyjątkiem. Jest to bardzo skomplikowane zjawisko, które opisuje się głównie językiem empirycznym, bazując na wynikach pomiarowych. Jego teoria jest również bardzo uproszczona, w dużym stopniu uzależniona od danych doświadczalnych.

** Masa i ciężar są do siebie proporcjonalne, a współczynnikiem proporcjonalności jest g . Możemy to wyrazić równością: ciężar = mg . Tak więc $9,8 \text{ N} = (1 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)$.



Rys. 4.14. Stosunek ciężaru (F) do masy (m) jest taki sam dla dużej bryły, jak i małego piórka. Podobnie jak stosunek obwodu (C) koła do jego średnicy (D) jest taki sam zarówno dla dużego, jak i małego koła

Jak widzimy, przyspieszenie w spadku swobodnym nie zależy od ciężaru. Głaz, który jest 100 razy cięższy od małego kamyczka, spada z identycznym przyspieszeniem jak kamyczek. Mimo że działa na niego siła 100 razy większa (jego ciężar), to jego bezwładność (opór stawiany tej sile) też jest 100 razy większa. Większa siła jest kompensowana przez tyle samo większą masę.

Pytanie W próżni piórko i moneta spadają równocześnie. Czy wynika z tego, że działają na nie jednakowe siły grawitacyjne?

Przyspieszenie mniejsze niż g — spadek z tłumieniem

W próżni wszystkie ciała są na równych prawach. A jak wygląda ich spадanie w powietrzu, co jest bardziej naturalne? Piórko i moneta spadają teraz zupełnie inaczej niż w próżni. Co na ten temat mówią zasady dynamiki Newtona? Odpowiedź brzmi: prawa Newtona stosują się do wszystkich ciał, zarówno spadających swobodnie, jak i spadających w ośrodkach stawiających opór. Jednak przyspieszenia w obu przypadkach są różne. Istotną sprawą jest posługiwanie się pojęciem siły wypadkowej. W próżni (i wszędzie tam, gdzie opór powietrza jest do zaniedbania) jedyną siłą działającą na ciało jest jego ciężar i jest to zarazem siła wypadkowa. W powietrzu siła wypadkowa jest różnicą między ciężarem ciała i siłą oporu powietrza.*

Siła oporu powietrza zależy głównie od dwóch czynników. Pierwszy — to wielkość spadającego ciała, od którego zależy ilość wypieranego powietrza. Drugim jest prędkość spadania. Im większa prędkość, tym większa liczba napotykanym cząsteczek w jednostce czasu i tym większa siła wywierana przez nie w wyniku zderzeń ze spadającym ciałem. Opór powietrza zależy więc od rozmiarów ciała i jego prędkości.

Piórko upuszczone w powietrzu przyspiesza powoli, w końcu „plynie” ze stałą prędkością. Siła oporu stopniowo rośnie, w miarę jak rośnie prędkość, i w końcu osiąga wartość równą ciężarowi (kierunki obu sił są przeciwne). Od tego momentu

Odpowiedź Nie, nie, po stołrocz nie! Ciała te spadają równocześnie nie dlatego, że działają na nie jednakowe siły, lecz dlatego, że stosunek siły do masy jest dla obu ciał taki sam. W próżni nie ma sił oporu powietrza, ale siły grawitacji tam iścień (mógłbyś to sprawdzić wkładając rękę do komory próżniowej). Jeśli twoja odpowiedź na to pytanie brzmi „tak”, to jest to dzwonek alarmowy, żebyś ostrożnie podchodził do problemów fizycznych!

* W języku matematycznym

$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{mg - R}{m},$$

gdzie mg oznacza ciężar, a R — opór powietrza. Jeśli $R = mg$, to $a = 0$; w tym przypadku ciało spada bez przyspieszenia, ze stałą prędkością. Stosując proste przekształcenia algebraiczne, otrzymamy więc:

$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{mg - R}{m} = g - \frac{R}{m}.$$

Widzimy stąd, że w obecności oporu powietrza spадanie zachodzi z przyspieszeniem mniejszym niż g . Jedyne dla $R = 0$ przyspieszenie $a = g$.

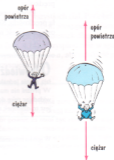


Rys. 4.15. Dopóki ciężar ciała mg jest większy od siły oporu powietrza R , dopóty ciało spada ruchem przyspieszonym. W miarę wzrostu prędkości, R również rośnie. Gdy $R = mg$, przyspieszenie znika i worek spada z prędkością graniczną

wypadkowa siła równa jest zeru i ciało przestaje przyspieszać. Piórko jest bardzo lekkie i ma stosunkowo dużą powierzchnię, dzięki czemu zrównanie obu sił następuje dość szybko. Podobnie zachowują się inne ciała spadające w powietrzu. Początkowo ich prędkość przyrasta, odpowiednio rośnie też siła oporu. Po pewnym czasie osiąga ona wartość równą ciężarowi ciała. Od tego momentu siła wypadkowa równa jest zeru, ciało przestaje przyspieszać, a jego prędkość stabilizuje się. Prędkość tę nazywamy **prędkością graniczną**. Czasami trzeba też uwzględnić wektorowy charakter (kierunek) tej prędkości. Graniczna prędkość dla piórka jest rzędu kilku centymetrów na sekundę. Dla podniebnego akrobaty wynosi ona ok. 200 kilometrów na godzinę. Skoczek taki może zmieniać prędkość graniczną przez zmianę swego położenia. Lecąc z głową lub stopami wysuniętymi do przodu, napotyka mniejszy opór, co prowadzi do większej prędkości granicznej. Lecąc z rozpostartymi kończynami niczym latająca wiewiórka, osiąga najmniejszą prędkość.

Rozpatrzmy teraz skaczących jednocześnie dwoje spadochroniarzy: mężczyznę i kobietę (rys. 4.16). Przypuśćmy, że mężczyzna jest dwa razy cięższy, a ich spadochrony (o tej samej wielkości) są otwarte. Mając jednakową wielkość, parasole „odczuwają” (przy tej samej prędkości) jednakowy opór powietrza; opór wywierany na samego skoczka jest znacznie mniejszy i może być pomijany. Kto pierwszy upadnie na ziemię: cięższy mężczyzna czy lżejsza kobieta? Odpowiedź brzmi: ta osoba, która ma większą prędkość graniczną. Może się wydawać, że obie prędkości graniczne są takie same (gdyż parasole są identyczne) i że obie osoby dotrą do ziemi jednocześnie. Ale nie jest to prawda, gdyż opór powietrza zależy również od prędkości. Kobieta osiąga prędkość graniczną wtedy, gdy opór wywierany na spadochron zrówna się z jej ciężarem. W tym samym czasie opór wywierany na spadochron mężczyzny jest mniejszy od jego ciężaru. Gdy ona osiągnie stan równowagi, on będzie nadal przyspieszał. Zatem on spadnie wcześniej, gdyż opór powietrza ma do pokonania większy ciężar.* Prędkość graniczna jest większa dla osób cięższych i takie osoby szybciej spadają na ziemię.

Rys. 4.16. Cięższy spadochroniarz musi spadać szybciej, gdyż opór powietrza musi pokonać większy ciężar



* Prędkość graniczna mężczyzny o wadze dwa razy większej jest ok. 41% większa niż graniczna prędkość kobiety. Siła hamująca jest bowiem proporcjonalna do kwadratu prędkości ($v_1^2/v_2^2 = 1,41^2 = 2$).



Pytanie Akrobatka podniebna skacze z wysoko lecącego helikoptera. Jak zmienia się jej przyspieszenie w czasie lotu: rośnie, maleje, czy pozostaje stałe?

Rozpatrzmy dwie piłeczki tenisowe: jedną normalną (pustą w środku) i drugą wypełnioną żelaznymi kulkami. Ich rozmiary są jednakowe, jednak druga ma znacznie większy ciężar. Jeśli je upuścisz jednocześnie znad głowy, to na pierwszy rzut oka obie spadną jednocześnie. Ale jeśli je upuścisz z większej wysokości, np. z dachu domu, to zobaczysz, że piłeczka cięższa upadnie wcześniej. Dlaczego? W pierwszym wypadku czas spadania jest zbyt krótki, by ich prędkości osiągnęły znaczniejsze wartości. Opór powietrza pozostaje mały w porównaniu z ciężarami piłeczek (nawet tej normalnej piłeczki). Subtelnej różnicy czasów spadania nie daje się zauważyć. Natomiast przy spadku z dużej wysokości prędkość znacząco rośnie, powodując odpowiedni wzrost oporu powietrza. Przy tej samej prędkości obie piłeczki odczuwają ten sam opór, gdyż ich rozmiary są identyczne. Gdy opór ten jest już porównywalny z ciężarem normalnej piłeczki, nadal jest dużo mniejszy od ciężaru drugiej (podobnie jak w przypadku spadochroniarzy z rys. 4.16). Przy tym samym oporze przyspieszenia są różne. Wynika stąd ważny moral: ilekroć określasz czyjeś przyspieszenie, używaj jako przewodnika drugiej zasady dynamiki, mówiącej, że przyspieszenie jest stosunkiem siły wypadkowej do masy. W omawianym przypadku przyspieszenie maleje, gdyż maleje siła wypadkowa. Gdy siła oporu osiągnie wartość równą ciężarowi, przyspieszenie znika.



Rys. 4.17. Zdjęcia stroboskopowe spadającej w powietrzu piłki golfowej (po lewej) oraz kuli styropianowej (po prawej). Dla cięższej piłki golfowej opór powietrza jest pomijalny i jej przyspieszenie wynosi g . Dla kuli styropianowej opór powietrza jest istotny i jej ruch wkrótce się ustala, gdy kula osiąga prędkość graniczną

Odpowiedź Jej przyspieszenie maleje, gdyż maleje siła wypadkowa. Siła ta równa się różnicy między ciężarem akrobatki i oporem powietrza. Ponieważ opór rośnie ze wzrostem prędkości, więc przyspieszenie maleje. Zgodnie z drugim prawem dynamiki mamy

$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{mg - R}{m},$$

gdzie mg jest ciężarem akrobatki, R — oporem powietrza. Gdy R rośnie, a maleje. Gdy jej prędkość osiągnie dostatecznie dużą wartość, $R = mg$; wtedy $a = 0$ i spадanie odbywa się ze stałą prędkością.