

WYDANIE
AKTUALNE

NOWA
EDYCJA

FIZYKA

PODRĘCZNIK • LICEUM I TECHNIKUM • ZAKRES PODSTAWOWY



 WSiP

1

Autorzy: **Ludwik Lehman, Witold Polesiuk, Grzegorz F. Wojewoda**

Podręcznik dopuszczony do użytku szkolnego przez ministra właściwego do spraw oświaty i wychowania i wpisany do wykazu podręczników przeznaczonych do kształcenia ogólnego do nauczania fizyki, na podstawie opinii rzeczoznawców: **dr. Jerzego Brojana, mgr. Waldemara Reńdy, prof. dr. hab. Jerzego Podrackiego**

Etap edukacyjny: III

Typ szkoły: szkoła ponadpodstawowa (liceum ogólnokształcące i technikum)

Zakres kształcenia: podstawowy

Rok dopuszczenia: 2022

Numer ewidencyjny w wykazie: 999/1/2022/z1

Podręcznik wpisany do wykazu podręczników MEiN dopuszczonych do użytku szkolnego, uwzględniających podstawę programową kształcenia ogólnego określoną w rozporządzeniu z dnia 30 stycznia 2018 r. (Dz.U. poz. 467 oraz z 2020 r. poz. 1248 i z 2021 r. poz. 1537).

© Copyright by Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne
Warszawa 2019, 2022

Wydanie IV zmienione, 1/2025

ISBN 978-83-02-21507-0 – podręcznik w wersji elektronicznej (flipbook)

ISBN 978-83-02-22943-5 – podręcznik w wersji drukowanej

Opracowanie merytoryczne i redakcyjne: **Agnieszka Drzazgowska** (redaktor koordynator, redaktor merytoryczny), **Piotr Lubis** (redaktor koordynator, redaktor merytoryczny), **Roman Wosiek** (współpraca redakcyjna)

Redakcja językowa: **Zespół**

Redakcja techniczna: **Janina Soboń**

Projekt okładki: **Marta Staniszevska**

Projekt graficzny: **Ewa Pawłńska, Hanna Michalska-Baran**

Opracowanie graficzne: **Stefan Drewiczewski, Katarzyna Wojewoda** (skecznotki)

Koncepcja powtórzeń (skecznotek): **Katarzyna Wojewoda**

Fotoedycja: **Ignacy Składowski**

Skład i łamanie: **TomMaster Studio**

Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna

00-807 Warszawa, Aleje Jerozolimskie 96

KRS: 0000595068

Infolinia: **801 220 555**

www.wsip.pl

Spis treści

Jak korzystać z podręcznika	4
Kinematyka	5
1. Niepewności pomiarowe. Cyfry znaczące	6
2. Opis ruchu	12
3. Ruch zmienny	23
4. Droga w ruchu jednostajnym i zmiennym	32
Powtórzenie działu	40
Dynamika	45
5. Siły wokół nas. III zasada dynamiki	46
6. Siła wypadkowa. I zasada dynamiki	55
7. II zasada dynamiki	63
8. Opory ruchu	71
9. Spadanie ciał	80
10. Ruch po okręgu	86
11. Siły bezwładności	93
12. Zasady dynamiki – przykłady	101
Powtórzenie działu	110
Energia i jej przemiany	115
13. Zasada zachowania energii	116
14. Praca i moc	121
15. Energia grawitacji i energia kinetyczna	127
16. Zasada zachowania energii mechanicznej	134
17. Energia sprężystości	140
18. Energia mechaniczna w sporcie	146
Powtórzenie działu	152
Grawitacja i astronomia	157
19. Układ Słoneczny	158
20. Prawo grawitacji	164
21. Satelity. Prędkość orbitalna	170
22. Wyznaczanie mas planet i gwiazd	177
23. Nieważkość i przeciążenie	181
24. Budowa Wszechświata	189
25. Ewolucja Wszechświata	195
Powtórzenie działu	202
Scenariusze doświadczeń	207
Niezbędnik matematyczny	216
Teksty popularnonaukowe	222
Odpowiedzi i wskazówki do zadań	230
Stałe fizyczne i astronomiczne	235
Indeks rzeczowy polsko-angielski	236



Treści usunięte według podstawy programowej z 2024 roku.



Treści fakultatywne według podstawy programowej 2024.

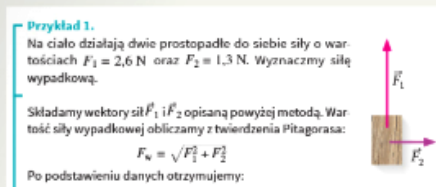
JAK KORZYSTAĆ Z PODRĘCZNIKA

Przeczytaj, zrozum, dowiedz się więcej



zasadniczą część wykładu

Ćwicz i rozwiązuj zadania



szczegółowo rozwiązane zadania

III zasada dynamiki

Oddziaływania ciał są zawsze wzajemne. Dwa ciała działają na siebie nawzajem siłami tego samego rodzaju, o tej samej wartości, lecz o przeciwnych zwrotach.

$$F_g = m \frac{v^2}{r}$$

ważne wnioski, prawa oraz definicje sformułowane słownie lub za pomocą wzorów

WARTO WIEDZIEĆ

Ciekawostki i materiały rozszerzające podstawową wiedzę

Pytania i zadania

- I. Wszyscy poruszamy się po okręgu, ponieważ uczestniczymy w ruchu obrotowym Ziemi. Oblicz prędkość, jaką mają w ruchu obrotowym Ziemi wokół jej osi:
- człowiek stojący na biegunie,
 - człowiek stojący na równiku.
- Przyjmij, że promień Ziemi jest równy 6400 km, a jej okres obrotu wynosi 24 h.

pytania i zadania na zakończenie rozdziału

Uporządkuj swoją wiedzę i sprawdź umiejętności

POWTÓRZENIE DZIAŁU

powtórzenie wiadomości – teoria

POWTÓRZENIE DZIAŁU

ćwiczenie umiejętności – pytania i zadania

Korzystaj z oznaczeń kolorystycznych

SCENARIUSZE DOŚWIADCZEŃ

TEKSTY POPULARNONAUKOWE

NIEZBĘDNIK MATEMATYCZNY

ODPOWIEDZI I WSKAZÓWKI DO ZADAŃ

s. 211 odniesienia do stron z Scenariuszami doświadczeń

s. 216 odniesienia do stron Niezbędnika matematycznego

s. 77 s. 16 odniesienia do stron rozdziału

Pamiętaj: odpowiedzi do wszystkich zadań zamieszczonych w podręczniku zapisuj w zeszyte przedmiotowym.



KINEMATYKA

Kiedy przyspieszenie smartfonu jest większe?
W trakcie spadania czy w chwili uderzenia w poduszkę?
Odpowiedzi na takie pytania dostarcza opisująca ruch **KINEMATYKA**.



1. Niepewności pomiarowe. Cyfry znaczące

- Rozdzielczość przyrządu pomiarowego
- Niepewność pomiarowa
- Cyfry znaczące

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o niepewności pomiarowej i cyfrach znaczących.

Największą rewolucją w naukach przyrodniczych było odkrycie w XVII wieku **metody naukowej**. Dzięki niej wynaleziono niemal wszystkie urządzenia, które zasadniczo zmieniły życie ludzi. U podstaw metody naukowej stosowanej w fizyce leżą dwa podstawowe przekonania:

1. Świat należy opisywać teoriami sformułowanymi językiem matematyki.
2. Wyniki doświadczeń i pomiarów są ostatecznym kryterium potwierdzającym lub obalającym teorię.

Fizyka jest nauką doświadczalną, więc w dużej mierze dzięki doświadczeniom i pomiarom będziemy zdobywać wiedzę na lekcjach. Naukę fizyki zaczniemy od zapoznania się z zasadami dokonywania pomiarów i opracowywania ich wyników.

Niepewność pomiarowa

Wielkości fizyczne to właściwości ciał lub zjawisk, które mierzymy odpowiednimi przyrządami. Na przykład długość można zmierzyć linijką, a czas stoperem. Większość telefonów komórkowych jest wyposażona w stoper, który zazwyczaj pokazuje czas z dokładnością do setnych części sekundy. **Rozdzielczość przyrządu pomiarowego** to najmniejsza zmiana mierzonej wielkości, jaką można odczytać na przyrządzie. Wobec tego rozdzielczość wspomnianego stopera wynosi 0,01 s. Czy to znaczy, że jeśli używamy go do ręcznych pomiarów czasu, to osiągamy taką dokładność? Niestety, nie.

Ryc. 1.1. Termometr cieczowy jest przykładem analogowego przyrządu pomiarowego, a stoper w telefonie komórkowym – cyfrowego



DOŚWIADCZENIE 1.

Włączaj i natychmiast wyłączaj stoper, starając się zmierzyć jak najkrótszy czas. Czy udało ci się zatrzymać stoper pokazujący czas równy 0,01 s?

Niepewność pomiarowa pogarsza dokładność pomiaru. Przyjmuje się, że dla pojedynczego pomiaru ręcznym stoperem niepewność pomiaru wynosi około 0,2 s, między innymi z powodu czasu reakcji człowieka. Bardzo ważne jest uświadomienie sobie, że **każdy pomiar jest obciążony niepewnością pomiarową**.

DOŚWIADCZENIE 2.

Doświadczenie wykonajcie w grupie kilku osób. Niech jedna osoba puszcza kulkę lub inny przedmiot z ustalonej wysokości, a pozostałe osoby mierzą czas spadania. Pomiar należy powtórzyć kilkukrotnie, a wyniki zapisać w tabeli.

W tabeli podane są przykładowe wyniki z doświadczenia 2.

Numer pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Czas t (s)	0,63	0,49	0,59	0,67	1,09	0,58	0,53	0,70	0,61	0,73

Oczywiście, wyniki się różnią. Jak ustalić końcowy **wynik pomiaru**? Nie możemy założyć, że jeden z tych wyników jest poprawny, a pozostałe błędne. Jeśli któryś z nich wyraźnie odbiega od pozostałych, można uznać, że jest obciążony **błędem grubym** (bo np. ktoś zbyt późno wyłączył stoper), i go odrzucić. W powyższej tabeli podejrzany jest wynik nr 5, więc go pominiemy. Wszystkie pozostałe traktujemy jako wiarygodne. W tej sytuacji najbliższa rzeczywistej wartości jest średnia arytmetyczna pomiarów:

$$t_{\text{sr}} = \frac{0,63 + 0,49 + 0,59 + 0,67 + 0,58 + 0,53 + 0,70 + 0,61 + 0,73}{9} \approx 0,61 \text{ (s)}$$

To jest wynik pomiaru czasu spadania kulki. Wynik podaliśmy z taką samą dokładnością, z jaką dokonaliśmy pomiarów. Oprócz wyniku pomiaru powinniśmy również podać jego niepewność pomiarową. W tej sytuacji niepewność pomiarową można oszacować na przykład poprzez odjęcie od każdego pomiaru wartości średniej (w tym przypadku 0,61 s), a następnie wyznaczenie wartości bezwzględnych otrzymanych wyników.

Numer pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Czas t (s)	0,63	0,49	0,59	0,67	1,09	0,58	0,53	0,70	0,61	0,73
Różnica $ t - t_{\text{sr}} $ (s)	0,02	0,12	0,02	0,06	0,48	0,03	0,08	0,09	0,00	0,12

Oszacowaną przez nas niepewnością pomiarową będzie średnia arytmetyczna tych różnic (również odrzucimy pomiar nr 5):

$$\Delta t = \frac{0,02 + 0,12 + 0,02 + 0,06 + 0,03 + 0,08 + 0,09 + 0,00 + 0,12}{9} = 0,06 \text{ (s)}$$

Ostateczny wynik pomiaru czasu spadania kulki zapisujemy w postaci:

$$t = t_{\text{śr}} \pm \Delta t, \text{ czyli } t = (0,61 \pm 0,06) \text{ s}$$

Znak $\pm$ oznacza, że mierzony przez nas czas zawiera się w przedziale od $0,61 \text{ s} - 0,06 \text{ s} = 0,55 \text{ s}$ do $0,61 \text{ s} + 0,06 \text{ s} = 0,67 \text{ s}$. Pamiętajmy, że najprawdopodobniej wynosi on $0,61 \text{ s}$. Nie tylko pomiar czasu daje wynik z niepewnością pomiarową. Wyznaczanie długości za pomocą linijki również obarczone jest niepewnością pomiaru. Rozdzielczość linijki to 1 mm , czyli $0,001 \text{ m}$, ale... linijka nie jest wykonana idealnie, może być wykrzywiona, a na odczytany wynik ma też wpływ kąt, pod jakim patrzymy (ryc. 1.2).



Ryc. 1.2. Kąt, pod jakim patrzymy na taśmę mierniczą, ma znaczenie podczas pomiaru długości

W tym przypadku wynik pomiaru wynosi:

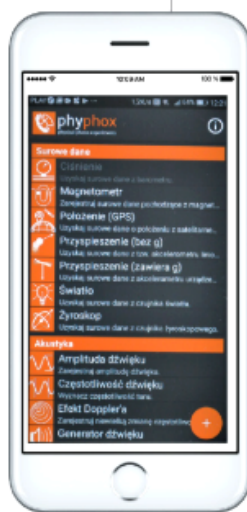
$$l = l_{\text{pom}} \pm \Delta l = (24,4 \pm 0,1) \text{ cm}$$

W pomiarach chodzi o ustalenie najbardziej prawdopodobnej wartości mierzonej wielkości fizycznej oraz przedziału niepewności, w którym mieści się rzeczywista wartość tej wielkości.

WARTO WIEDZIEĆ

Smartfon jako narzędzie pomiarowe

Podczas lekcji fizyki warto używać telefonu komórkowego nie tylko jako stopera. Zainstalowanie na smartfonie (z systemem operacyjnym Android lub iOS) np. aplikacji Phyphox pozwoli na wykonanie wielu pomiarów. Aplikacja ta wykorzystuje czujniki, które są w wyposażeniu przeciętnego smartfona. Na przykład każdy smartfon ma czujnik światła, dzięki któremu telefon „wie”, że został przyłożony do ucha i może wygasić ekran. Dzięki aplikacji Phyphox ten czujnik światła może uruchamiać oraz zatrzymywać pomiar czasu. Niepewność pomiaru czasu za pomocą stopera zainstalowanego w telefonie wynosi ok. $0,2 \text{ s}$, a zastosowanie czujnika światła zmniejsza tę niepewność do ok. $0,01 \text{ s}$. Innym czujnikiem w telefonie jest akcelerometr. Dzięki niemu możliwe jest automatyczne poziome lub pionowe ustawianie widoku ekranu. Aplikacja Phyphox wykorzystuje ten czujnik do pomiaru przyspieszenia, z jakim porusza się smartfon. To tylko dwa przykłady wykorzystania czujników zamontowanych w smartfonie do pomiaru wielkości fizycznych. Zachęcamy do zainstalowania tej aplikacji w smartfonach i projektowania doświadczeń umożliwiających lepsze poznanie zjawisk zachodzących w przyrodzie. Warto jednak pamiętać, że wyniki podawane przez tę aplikację też są obarczone niepewnościami pomiarowymi.



Niepewność względna

Zmierzymy długość i grubość smartfona za pomocą linijki o rozdzielczości 1 mm . Zmierzona długość pewnego smartfona to $l_1 = (143 \pm 1) \text{ mm}$, a grubość to $l_2 = (7 \pm 1) \text{ mm}$. Czy precyzja tych pomiarów jest taka sama? W przypadku pomiaru grubości niepewność pomiarowa stanowi $1/7$ wyniku, a w przypadku pomiaru długości jest to zaledwie $1/143$. O precyzji pomiaru świadczy stosunek niepewności pomiarowej do zmierzonej wartości (często wyrażany w procentach), który nazywamy **niepewnością względną**:

$$\Delta l_{\text{wzgl}} = \frac{\Delta l}{l_{\text{pom}}} \cdot 100 \%$$

Im mniejsza niepewność względna, tym pomiar jest bardziej precyzyjny. By uniknąć nieporozumień, „zwykłą” niepewność pomiaru (np. Δl) nazywa się często **niepewnością bezwzględną**.

W naszym przypadku niepewność względna pomiaru grubości smartfona jest równa ok. 14% , a jego długości – ok. $0,7 \%$. Widzimy, że im mierzona wartość jest większa, tym niepewność względna jest mniejsza, przy tej samej niepewności bezwzględnej.

Porównanie niepewności względnej pozwala na odpowiednie dobranie przyrządów pomiarowych. Na przykład do pomiaru grubości smartfona nie należy używać taśmy mierniczej o podziale centymetrowej (ryc. 1.3).

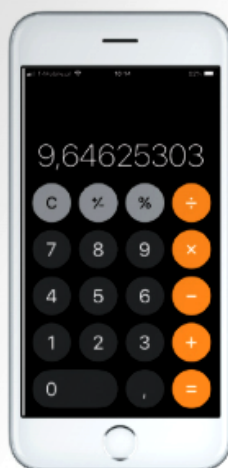


Ryc. 1.3. Trzydziestometrowa taśma miernicza

Cyfry znaczące

Niektóre źródła podają wyznaczone wartości razem z niepewnością. Na przykład promień Słońca według Wikipedii wynosi $r = (696\,342 \pm 65) \text{ km}$, a masa Słońca to $M = (1,98855 \pm 0,00025) \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

Eksperymentalne wyznaczenie jakiegokolwiek wielkości w sposób absolutnie dokładny jest niemożliwe. Ten fakt należy uwzględnić podczas obliczeń z wykorzystaniem zmierzonych wartości. Przypuśćmy, że na podstawie wyników doświadczenia 2. chcemy wyznaczyć przyspieszenie ziemskie. W tym celu należy zmierzyć również wysokość, z jakiej puszczaliśmy kulkę, a otrzymane wartości wstawić do odpowiedniego wzoru.



Dokonujemy obliczeń na kalkulatorze i na ekranie uzyskujemy np. wartość 9,64625303. Nie ma sensu zapisywać jej z taką dokładnością, bo wprowadzone do obliczeń dane były znacznie mniej dokładne. Nie podaje się wyniku pomiaru lub obliczeń z większą dokładnością niż niepewność wprowadzonych danych.

O liczbie cyfr znaczących decyduje precyzja pomiarów. Jeśli w doświadczeniu 2. otrzymaliśmy $t = 0,61$ s, to w wyniku mamy dwie cyfry znaczące: 6 i 1. Jeśli wyrazimy czas w milisekundach $t = 610$ ms, również mamy te same dwie cyfry znaczące. Jeśli używalibyśmy bardziej precyzyjnego stopera, moglibyśmy otrzymać wynik 610,7 ms. Taki wynik jest zapisany z dokładnością do czterech cyfr znaczących.

W podanej wyżej wartości przyspieszenia ziemskiego jest dziewięć cyfr znaczących, tymczasem wynik obliczeń po-

winniśmy podać tylko z dwiema cyframi znaczącymi, z zastosowaniem zasad zaokrąglania, czyli jako równy 9,6.

Zasady zaokrąglania wyników do odpowiedniej liczby cyfr znaczących należy stosować również podczas rozwiązywania zadań. Jeśli np. dane w zadaniu mają trzy cyfry znaczące, a w wyniku obliczeń otrzymamy $\sqrt{2}$, nie powinniśmy tak podawać wyniku – to by oznaczało, że znamy go z absolutną dokładnością. Wynik powinno się zapisać z trzema cyframi znaczącymi, czyli 1,41. Pośrednie obliczenia powinno się wykonywać z dokładnością większą o jedną cyfrę znaczącą niż podawany wynik końcowy.

PODSUMOWANIE

- ▶ Każdy pomiar wielkości x jest obarczony **niepewnością pomiarową** Δx . Wynik pomiaru zawsze podajemy w postaci:

$$x = x_{\text{pom}} \pm \Delta x$$

- ▶ **Rozdzielczość** przyrządu pomiarowego to najmniejsza zmiana mierzonej wielkości, jaką można odczytać na przyrządzie.
- ▶ Wartości liczbowe wielkości fizycznych zawsze zapisujemy w postaci rozwinięcia dziesiętnego z liczbą cyfr znaczących wynikającą z dokładności pomiaru.

PYTANIA I ZADANIA

1. Pięcioro uczniów mierzyło długość boku zeszytu do fizyki. Do pomiarów używano linijki z podziałką milimetrową. Wyniki pomiarów zapisano w tabeli.

Numer pomiaru	1	2	3	4	5
Długość (cm)	21,2	21,3	21,1	21,3	21,2

- a) Zapisz wynik pomiaru wraz z niepewnością pomiarową.
- b) Oszacuj niepewność względną pomiaru długości boku zeszytu.

2. Na fotografii przedstawiono wskazania woltomierza. Na podstawie danych odczytanych z tej fotografii zapisz:

- a) wynik pomiaru,
- b) rozdzielczość woltomierza,
- c) zakres pomiarowy, czyli przedział wartości, jakie można mierzyć woltomierzem w danym ustawieniu.



3. Na fotografii przedstawiono wskazania termometru. Na podstawie danych odczytanych z tej fotografii zapisz:
 - a) wskazywaną temperaturę,
 - b) rozdzielczość termometru,
 - c) zakres pomiarowy, czyli przedział temperatur, które można mierzyć tym termometrem.
4. Zmierzono długość boiska piłkarskiego i długość ławki szkolnej. Długość boiska wynosiła 110 m, a długość ławki była równa 0,92 m. Załóżmy, że niepewność względna obu pomiarów była równa 2 %. Porównaj niepewności bezwzględne obu pomiarów.
5. Uczniowie wyznacali gęstość pewnego przedmiotu. W wyniku pomiaru uzyskano objętość równą 12 cm^3 (czyli $0,000\,012 \text{ m}^3$) i masę 32,8 g. Oblicz gęstość przedmiotu. Wynik zapisz w kg/m^3 z odpowiednią liczbą cyfr znaczących.

2. Opis ruchu

- Wektor przemieszczenia i wektor prędkości
- Prędkość średnia i prędkość chwilowa
- Ruch jednostajny

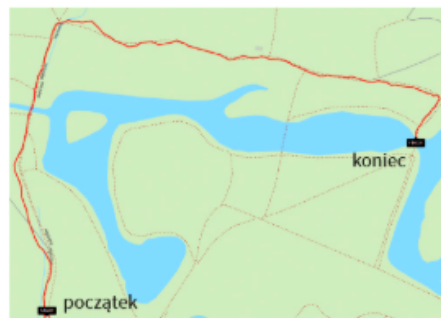
→ **Przypomnij sobie** wiadomości o prędkości i ruchu jednostajnym.

Ruch jest najbardziej podstawowym zjawiskiem w otaczającym nas świecie. Poznawanie praw przyrody zaczniemy zatem od **kinematyki**, czyli analizy ruchu ciał.

Opis ruchu

Ruch dostrzegamy, gdy jedno ciało zmienia swoje położenie względem innego ciała. Oznacza to, że **ruch jest względny**. Na przykład gdy siedzimy w pociągu i zauważamy drugi pociąg ruszający na sąsiednim torze, często okazuje się, że to jednak ruszył nasz pociąg, a tamten nadal stoi.

Na początku będziemy opisywać ruch ciał względem powierzchni Ziemi, bo to najbardziej naturalny **układ odniesienia**. Aplikacje na urządzenia mobilne umożliwiające rejestrowanie różnych parametrów ruchu wyznaczają taki właśnie ruch. Jedną z aplikacji umożliwiających wyznaczanie zmian położenia ciała względem Ziemi jest Sports Tracker.



Ryc. 2.1. Zapis ruchu spacerowicza

Na rycinie 2.1 przedstawiono zrzut ekranu ze szczegółowymi informacjami na temat przebiegu spaceru z włączoną aplikacją. Możemy odczytać m.in. przebytą drogę oraz prędkość marszu. Czerwona linia na tym rysunku jest torem ruchu spacerowicza.

Tor ruchu to linia, którą zakreśla w przestrzeni poruszający się obiekt. Długość toru jest **drogą** przebytą przez ten obiekt.

Prędkość (chwilową) obliczamy jako stosunek drogi przebytej przez poruszający się obiekt do bardzo krótkiego czasu, w którym ta droga została przebyta:

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

Jeśli czas t będzie dłuższy, to obliczoną wielkość nazwiemy **prędkością średnią**.

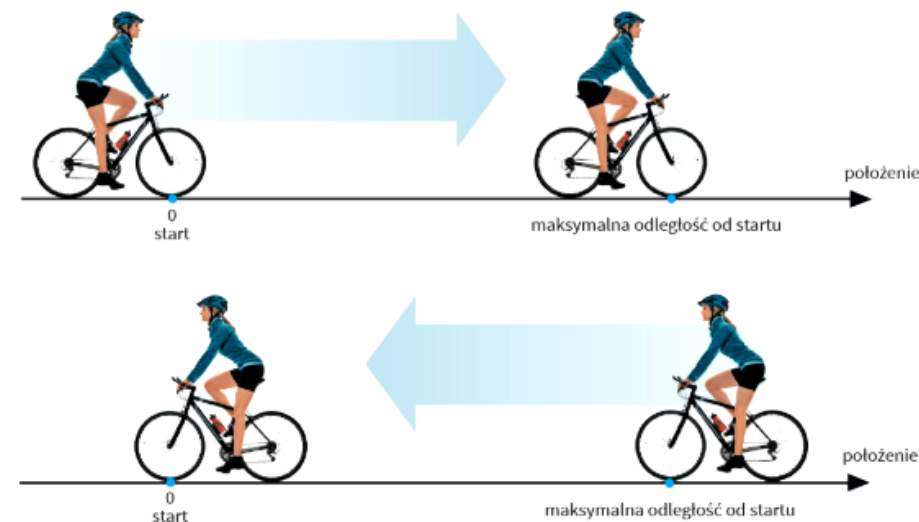
Podstawową jednostką prędkości jest 1 m/s, ale powszechnie używa się również km/h.

W rowerach wyposażonych w prędkościomierz podstawową jednostką drogi stosowaną do pomiaru prędkości jest obwód koła. Do ramy roweru przymocowany jest czujnik pola magnetycznego, a do szprychy koła – mały magnes. Gdy rower jedzie, koło się obraca, a magnes raz na jeden obrót koła znajduje się w pobliżu czujnika. Czas jednego obrotu koła jest z reguły dość krótki. Na podstawie obwodu koła oraz czasu jednego pełnego obrotu prędkościomierz wyznacza prędkość chwilową, z jaką porusza się rower. Z wykorzystaniem liczby obrotów koła licznik rowerowy wyznacza również drogę przebytą przez rower.



Ryc. 2.2. Koło rowerowe z systemem do pomiaru prędkości

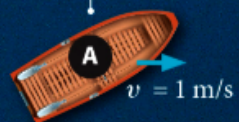
Rozważmy ruch rowerzystki wzdłuż linii prostej. Rowerzystka po wystartowaniu jechała ze stałą prędkością w jedną stronę, a następnie zawróciła i pojechała w przeciwną stronę.



Ryc. 2.3. Rowerzystka jedzie najpierw w jedną stronę, a potem w przeciwną

Względność ruchu

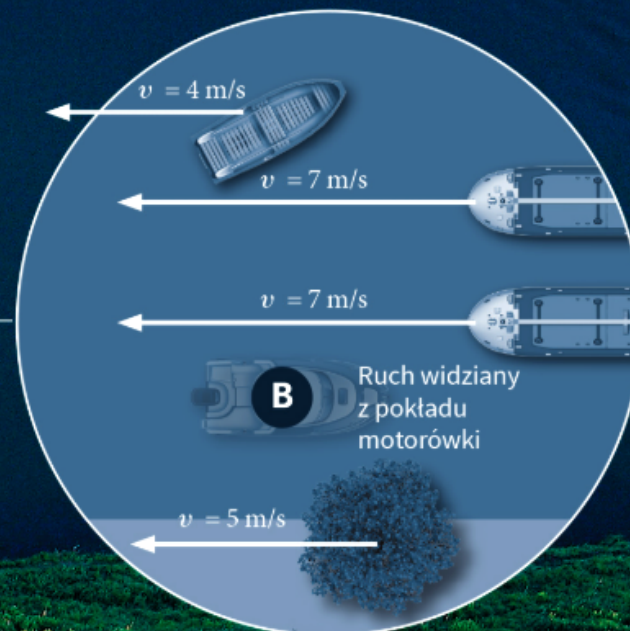
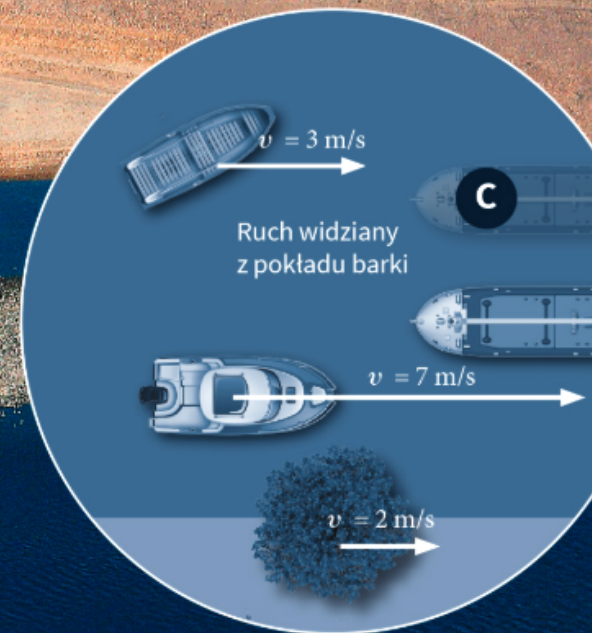
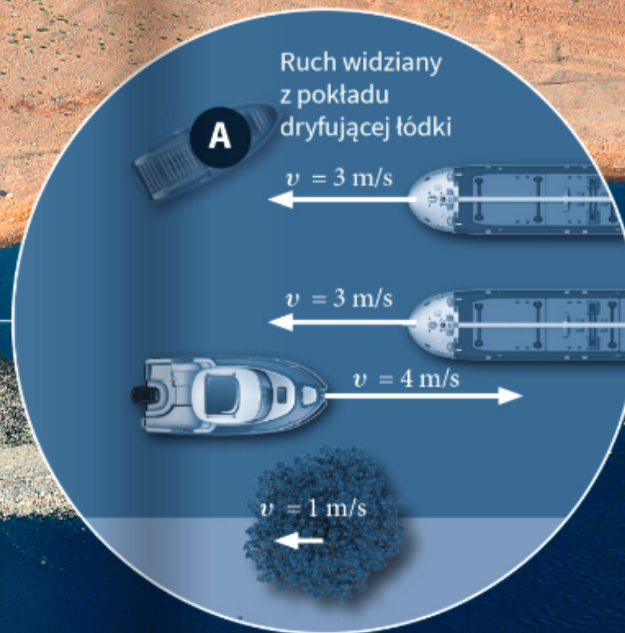
Ruch jest względny. Oznacza to, że opis ruchu danego obiektu zależy od obserwatora, który ten ruch rejestruje. Prędkości łodzi, motorówki lub barki poruszających się po wodzie zależą od układu odniesienia, względem którego mierzymy te prędkości.



nurt rzeki
 $v = 1 \text{ m/s}$

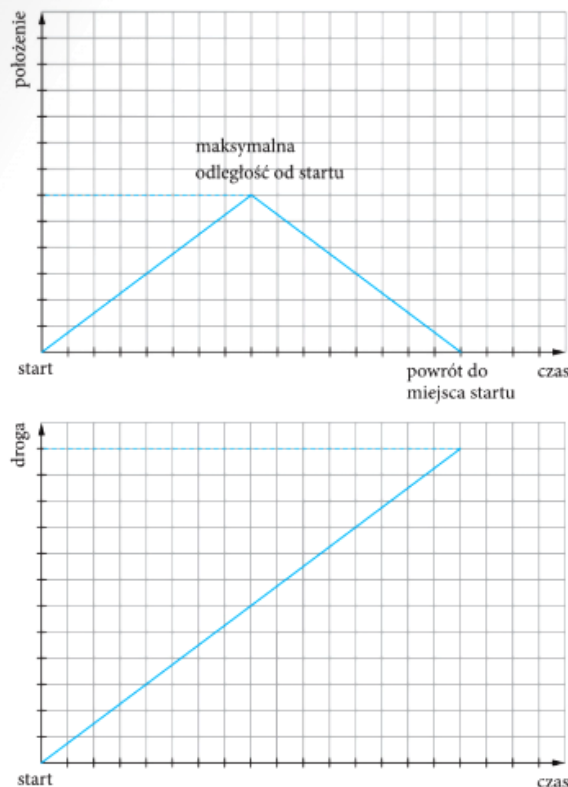


Tak wygląda ruch na rzece
z nieruchomego względem
brzegu drona:



s. 216

Jej ruch przedstawiono na dwóch wykresach: zależności położenia od czasu i zależności drogi od czasu (ryc. 2.4). Informacje na temat odczytywania wykresów znajdziesz w niezbędniku matematycznym na stronie 216. Rowerzystka jedzie po linii prostej, więc jej położenie możemy określić jako współrzędną na pewnej osi liczbowej. Droga to długość toru, po którym rowerzystka się porusza. Gdy rowerzystka wraca do położenia początkowego, to współrzędna położenia maleje, ale droga cały czas rośnie. W przypadku ruchu odbywającego się tylko w jedną stronę wykresy zależności położenia od czasu oraz drogi od czasu wyglądają tak samo.



Ryc. 2.4. Wykresy zależności położenia od czasu i drogi od czasu dla rowerzystki jadącej ze stałą prędkością

PRZYKŁAD 1.

W prognozie pogody podano, że prędkość wiatru będzie równa 10 m/s. Rowerzystka jedzie z prędkością 20 km/h. Która z podanych prędkości jest większa?

Aby porównać podane prędkości, należy zapisać je w tych samych jednostkach. Zapiszmy zatem, ile wynosi 1 m/s w km/h.

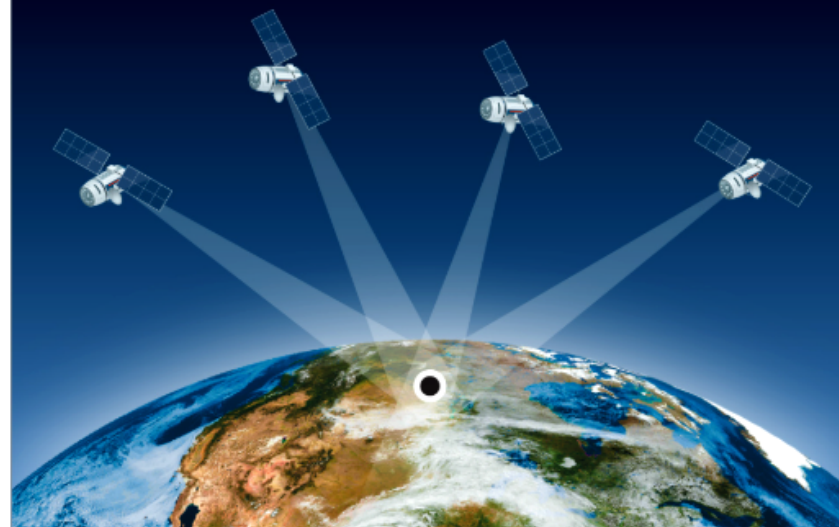
$$1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1 \cdot \frac{1000 \text{ km}}{3600 \text{ h}} = 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

W takim razie 10 m/s = 36 km/h. Prędkość wiatru jest większa od prędkości rowerzysty.

WARTO WIEDZIEĆ

System GPS

Pozycję telefonu komórkowego (smartfona) można wyznaczyć dwiema metodami. Jedną z nich wykorzystuje lokalizację na podstawie analizy sygnałów docierających do aparatu ze stacji bazowych systemu telefonii komórkowej. Druga dotyczy telefonów wyposażonych w moduł GPS (*Global Positioning System*). Do ustalenia pozycji wykorzystują one sygnały pochodzące z kilku satelitów krążących wokół Ziemi po orbicie o promieniu ok. 25 tys. km. Odbiornik zamontowany w telefonie porównuje sygnały docierające do niego w postaci fal elektromagnetycznych o częstotliwościach ok. 1600 MHz oraz 1200 MHz, oblicza różnice czasowe i na ich podstawie ustala swoją pozycję.



Wektory

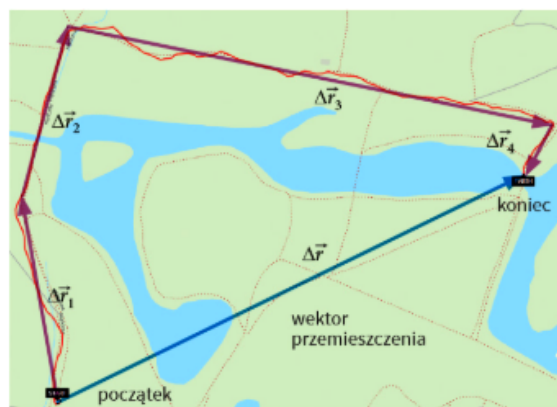
Niektóre wielkości fizyczne, takie jak masa czy temperatura, mają tylko wartość liczbową (np. $m = 5 \text{ kg}$) – są to **skalarne wielkości fizyczne**. Gdy jakaś wielkość fizyczna oprócz wartości ma kierunek i zwrot, mówimy, że jest to **wektorowa wielkość fizyczna**. Przykładem wielkości wektorowej jest prędkość.

Wielkości wektorowe oznaczamy symbolem ze strzałką, np. $\vec{v}$, a na rysunkach przedstawiamy je jako strzałkę (ryc. 2.5). Wartość wektora to symbol bez strzałki, np. $v = 70 \text{ km/h}$. Gdy piszemy: „Oblicz prędkość...”, to oznacza, że szukamy wartości wektora prędkości.



Ryc. 2.5. Prędkość jest przykładem wektorowej wielkości fizycznej

Rower, samochód i każdy inny obiekt poruszają się zawsze w określonym kierunku. Dlatego prędkość chwilową można traktować jako wektor określający chwilowy kierunek ruchu. Aby to lepiej zrozumieć, musimy wprowadzić pojęcie **przemieszczenia**, czyli wektor łączący położenie początkowe i położenie końcowe ciała.



Ryc. 2.6. Skomplikowany kształt rzeczywistego toru ruchu można przybliżyć za pomocą prostych odcinków

Jak widać na rycinach 2.1 i 2.6, tor spacerowicza jest dość skomplikowaną krzywą. Gdy połączymy punkt startu z położeniem końcowym, to uzyskamy przemieszczenie $\Delta \vec{r}$ (ryc. 2.6). Jednak taki wektor nie zawiera informacji o pośrednich etapach ruchu spacerowicza. Nieco lepiej będzie, gdy przybliżymy tor ruchu za pomocą kilku wektorów przemieszczenia: $\Delta \vec{r}_1$, $\Delta \vec{r}_2$ itd. Im mniejszy jest odstęp czasu, w którym nastąpiło przemieszczenie, tym wektor przemieszczenia będzie lepiej odzwierciedlać rzeczywisty tor ruchu, np. długość wektora $\Delta \vec{r}_4$ jest bardzo bliska drodze przebytej w tym czasie.

Prędkość jest wielkością wektorową. Gdy zależy nam na dokładnym opisie ruchu, to wyznaczamy wektory przemieszczeń, które nastąpiły w jak najmniejszych odstępach czasu. Wektor prędkości chwilowej jest skierowany tak jak chwilowe przemieszczenie, czyli przemieszczenie w ciągu tego samego krótkiego przedziału czasu (ryc. 2.5 i ryc. 2.7). Wartość prędkości chwilowej obliczamy jako stosunek drogi do czasu, gdy czas pomiaru jest bardzo krótki; wówczas przebyta droga jest równa wartości chwilowego przemieszczenia ciała.



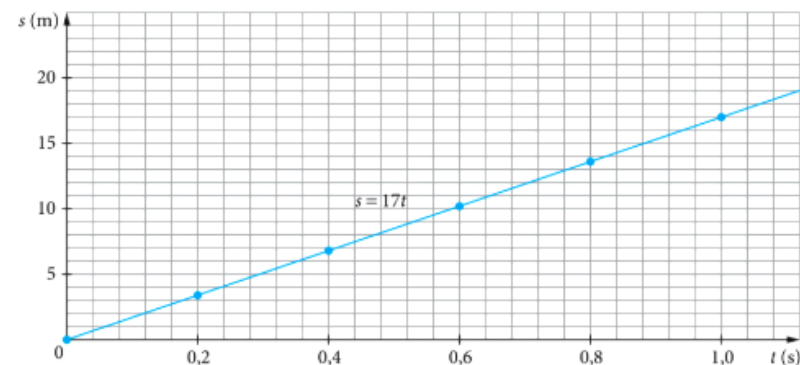
Ryc. 2.7. Prędkość i przemieszczenie to wielkości wektorowe, droga to wielkość skalarna

Ruch jednostajny

Ruch, w którym prędkość ma stałą wartość, nazywamy **ruchem jednostajnym**. W tym ruchu w jednakowych odstępach czasu ciało pokonuje równe odległości. Na rycinie 2.8 przedstawiony jest wykres zależności drogi przebytej przez pewien samochód od czasu trwania ruchu. Co 0,2 s odległość od początku obserwacji wzrastała o 3,4 m, więc punkty pomiarowe układają się wzdłuż linii prostej. Wyznaczona z tych danych prędkość samochodu jest stała i wynosi 17 m/s. Uzyskaną dla ruchu samochodu zależność drogi od czasu możemy uogólnić dla innych poruszających się obiektów. Wzór (1) możemy przekształcić do następującej postaci:

$$s = v \cdot t$$

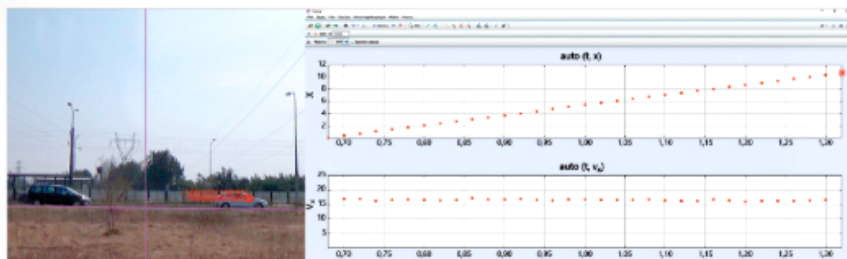
Ten wzór wskazuje, że droga jest wprost proporcjonalna do czasu. Wykresem takiej zależności jest linia prosta przechodząca przez początek układu współrzędnych (jak na ryc. 2.8).



Ryc. 2.8. Wykres zależności drogi przebytej przez samochód od czasu trwania ruchu

Ruch, w którym prędkość ma stałą wartość, nazywamy **ruchem jednostajnym**. W tym ruchu przebyta droga jest wprost proporcjonalna do czasu.

Do analizy rzeczywistych ruchów odbywających się w naszym otoczeniu może służyć program Tracker. Program ten jest darmowy i można go bez problemu znaleźć w internecie. Dzieli on film z poruszającym się obiektem na poszczególne klatki. Jednostką czasu jest w tym przypadku czas między poszczególnymi klatkami filmu. Jeśli film został nakręcony z częstotliwością 50 klatek na sekundę, to odstęp czasowy między klatkami wynosi 0,02 s. Bardzo ważną rzeczą, którą musimy zaznaczyć na pierwszej klatce filmu, jest wzorec odległości. Może nim być np. odstęp między kołami auta itp.



Ryc. 2.9. Zrzut ekranu programu Tracker podczas analizy ruchu samochodu. Górny wykres przedstawia zależność położenia od czasu, a dolny – prędkości od czasu

W przykładzie przedstawionym na rycinie 2.9 samochód poruszał się wzdłuż linii prostej wyznaczonej przez ulicę. Ustawiliśmy układ współrzędnych w taki sposób, aby droga przebyta przez samochód pokrywała się ze współrzędnymi osi x . Na podstawie danych uzyskanych z analizy zmian położenia pojazdu na poszczególnych klatkach filmu możemy wyznaczyć prędkość, z jaką poruszał się samochód.

Dzięki porównywaniu kolejnych klatek filmu program wyznacza położenie samochodu w poszczególnych chwilach. Położenie ciała można określić przez podanie odległości od punktu początkowego, w tym przypadku mierzonej wzdłuż osi x , czyli drogi przebytej od początku obserwacji.

Gdy kierunek wektora prędkości się nie zmienia, ruch jest **prostoliniowy**. Gdy ten kierunek się zmienia, ruch jest **krzywoliniowy**. Gdy wartość prędkości jest stała, ruch jest **jednostajny**. Gdy wartość prędkości się zmienia, mamy do czynienia z ruchem **zmiennym**.

PRZYKŁAD 2.

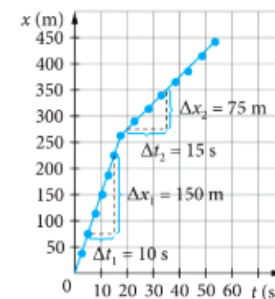
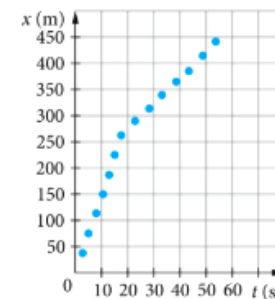
Samochód jechał wzdłuż prostego odcinka szosy. Na wykresie przedstawiono zależność położenia tego samochodu od czasu.

Na podstawie wykresu obliczmy prędkość samochodu w kolejnych fazach ruchu.

Kreślimy dwa odcinki najlepiej pasujące do punktów na wykresie, czyli fragmenty prostych najlepszego dopasowania. Z wykresu wynika, że ruch odbywał się z dwiema różnymi prędkościami, bo otrzymaliśmy dwa odcinki różnych prostych. Odczytujemy z wykresu odpowiednie dane i obliczamy wartości prędkości.

W pierwszej fazie ruchu przez np. 10 s samochód przebył drogę 150 m, zatem prędkość w tej fazie miała wartość $v_1 = 15$ m/s. W drugiej fazie ruchu przez zaznaczony na wykresie odstęp czasu 15 s samochód przebył drogę 75 m, więc jego prędkość wynosiła $v_2 = 5$ m/s.

Można zauważyć, że fragment prostej w pierwszej fazie ruchu jest nachylony pod większym kątem do osi czasu niż w drugiej. Im większy jest kąt nachylenia prostej będącej wykresem $x(t)$ do osi czasu, tym większa jest prędkość ciała.



PODSUMOWANIE

- ▶ **Tor ruchu** to linia, którą zakreśla w przestrzeni poruszający się obiekt.
- ▶ Długość toru jest **drogą** przebytą przez ciało.
- ▶ **Prędkość** (chwilową) obliczamy jako stosunek drogi przebytej przez poruszający się obiekt do bardzo krótkiego czasu, w którym ta droga została przebyta:

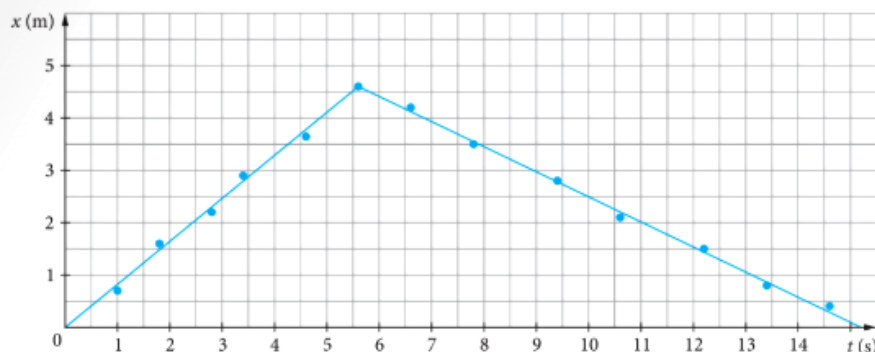
$$v = \frac{s}{t}$$

Jeśli czas t będzie dłuższy, to obliczoną wielkość nazwiemy **prędkością średnią**.

- ▶ **Prędkość chwilowa jest wektorem** wskazującym kierunek ruchu w danym momencie.
- ▶ **Ruch jest jednostajny**, gdy droga przebyta przez ciało jest wprost proporcjonalna do czasu trwania ruchu.
- ▶ Wykres zależności położenia od czasu jest tym bardziej stromy, im większa jest prędkość ciała.

PYTANIA I ZADANIA

1. Gdy koło rowerowe jest napompowane zgodnie z instrukcją, prędkościomierz zamontowany w rowerze wskazuje poprawne wartości prędkości. Jakie będą wskazania prędkościomierza – prawidłowe, za duże czy za małe – gdy ciśnienie powietrza w oponach będzie zbyt małe? Uzasadnij odpowiedź.
2. Pojazd jechał wzdłuż linii prostej. Na wykresie przedstawiono kolejne położenia tego pojazdu w trakcie ruchu. Na podstawie wykresu oblicz prędkość pojazdu podczas odalania się od punktu startu oraz podczas powrotu.



3. Autostrada A1 z Torunia do Gdańska (węzeł Rusocin) ma 152 km długości. Na tym odcinku autostrady istnieje odcinkowy pomiar prędkości. Gdy pobieramy bilet na bramce wjazdowej w Toruniu, to system odnotowuje czas startu, a następnie oblicza, w jakim najkrótszym czasie możemy dotrzeć do miejsca zjazdu bez przekraczania przepisów ruchu drogowego. Maksymalna dopuszczalna prędkość jazdy samochodu osobowego na autostradzie wynosi 140 km/h. Pewien samochód wjechał na autostradę w Toruniu. Oblicz najkrótszy czas, w jakim może dojechać do zjazdu w Rusocinie, aby nie przekroczyć maksymalnej dopuszczalnej prędkości jazdy. Wynik podaj z dokładnością do jednej minuty.
4. Według mapy Google'a ze Świnoujścia do Przemyśla jest 999 km. Autostradą można pokonać 600 km, drogą ekspresową 50 km, a na pozostałych odcinkach trzeba jechać drogami krajowymi oraz wojewódzkimi. Zakładamy, że prędkość średnia na autostradzie wynosi 120 km/h, na drodze ekspresowej 100 km/h, a na pozostałych odcinkach 70 km/h. Co około dwie godziny ustalamy 20-minutową przerwę w podróży. Oblicz czas podróży ze Świnoujścia do Przemyśla.
5. Gdy planujemy podróż samochodem osobowym, możemy szacować, że prędkość średnia jazdy drogą krajową będzie wynosić 70 km/h. Oblicz drogę, jaką pokonamy w czasie 2 h 40 min, jeśli będziemy jechać z taką prędkością.



3. Ruch zmienny

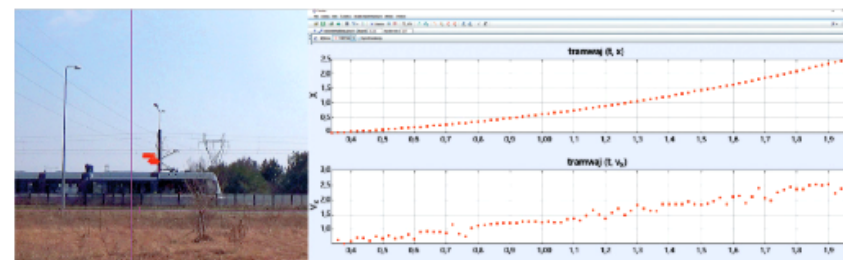
- Analiza ruchu jednostajnie przyspieszonego
- Analiza ruchu jednostajnie opóźnionego

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o przyspieszeniu i sprawdź, ile wynosi wartość przyspieszenia ziemskiego.

Poruszające się ciała często zmieniają swoją prędkość. Prędkość spadającego kamienia rośnie, a hamującego samochodu – maleje. W tym rozdziale opiszemy te dwa przypadki ruchu prostoliniowego, w którym prędkość się zmienia.

Ruch przyspieszony

Gdy prędkość ciała rośnie, jego ruch nazywamy przyspieszonym. Zwykle ruch przyspieszony trwa krótko – ułamek sekundy (np. piłka w momencie kopnięcia), czasem kilka sekund (np. rozpędzający się samochód). Skorzystajmy z programu Tracker i przeanalizujmy ruch tramwaju ruszającego z przystanku.



Ryc. 3.1. Zrzut ekranu programu Tracker podczas analizy ruchu tramwaju ruszającego z przystanku

Na pierwszym wykresie przedstawiono zależność położenia tramwaju od czasu. Jak widać, punkty pomiarowe nie leżą na linii prostej, tak jak było to w przypadku ruchu jednostajnego, lecz tworzą pewną krzywą. Można zauważyć, że w kolejnych jednakowych odstępach czasu tramwaj pokonuje coraz większą drogę.

Na drugim wykresie przedstawiono zależność prędkości tramwaju od czasu. Punkty pomiarowe na wykresie grupują się wzdłuż linii prostej. Im dłużej trwa ruch, tym większa jest prędkość tramwaju. Można zauważyć, że w kolejnych jednakowych odstępach czasu prędkość wzrasta o tę samą wartość.

Ruch, w którym prędkość wzrasta o taką samą wartość w jednakowych odstępach czasu, nazywamy **ruchem jednostajnie przyspieszonym**.

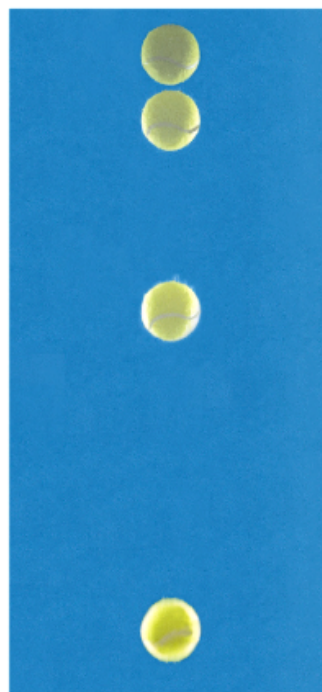
Na rycinie 3.2 przedstawiono zdjęcie stroboskopowe spadającej piłki. W ruchu jednostajnym odległości między poszczególnymi położeniami piłki byłyby jednakowe. Tu natomiast możemy zauważyć, że podczas spadania odległości między poszczególnymi położeniami piłki były coraz większe. Oznacza to, że ruch spadającej piłki był przyspieszony.

Przyspieszenie

Wiadomo, że rozpędzanie się pociągu i samochodu osobowego wygląda inaczej. Oba pojazdy mogą uzyskać prędkość np. 120 km/h, ale samochód tę prędkość osiągnie w krótszym czasie. Mówimy, że **przyspieszenie** samochodu jest większe.

Przyrost prędkości (oznaczany jako Δv) to różnica prędkości końcowej i początkowej. Jeżeli na początku pojazd miał na liczniku 50 km/h, a po rozpędzeniu się ma 90 km/h, to przyrost prędkości wynosi 40 km/h.

Gdy prędkość końcowa jest większa od początkowej, przyrost prędkości jest dodatni. Jeśli prędkość końcowa jest mniejsza od początkowej, przyrost prędkości jest ujemny.

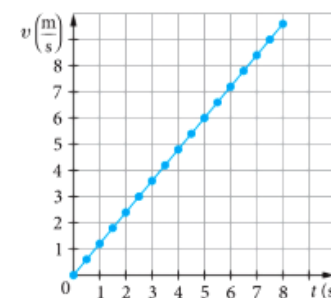


Ryc. 3.2. Podczas spadania piłka była podświetlana w równych odstępach czasu. Odległości, które pokonywała między poszczególnymi położeniami, były coraz większe

Wartość przyspieszenia w ruchu prostoliniowym obliczamy jako stosunek dodatniej wartości zmiany prędkości $|\Delta v|$ do czasu t , w którym ta zmiana nastąpiła:

$$a = \frac{|\Delta v|}{t} \quad (1)$$

Jednostką przyspieszenia jest 1 m/s^2 .



Ryc. 3.3. Wykres zależności prędkości od czasu w ruchu jednostajnie przyspieszonym od momentu ruszenia z miejsca

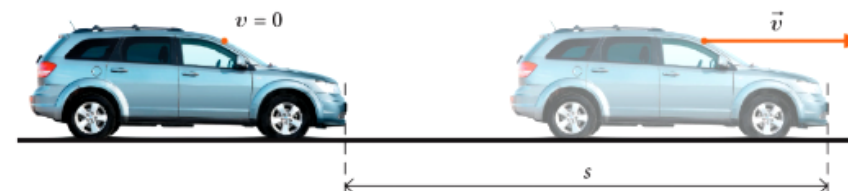
Na rycinie 3.3 przedstawiono wykres zależności prędkości od czasu w sytuacji, gdy ciało ruszyło z miejsca i poruszało się ze stałym przyspieszeniem. Przyspieszenie w tym przypadku było równe $1,2 \text{ m/s}^2$. Oznacza to, że w każdej sekundzie prędkość ciała rosła o $1,2 \text{ m/s}$. Na przykład po 5 s ruchu prędkość tego ciała była równa:

$$v = 1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5 \text{ s} = 6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Obliczenia te można zapisać w postaci symboli wielkości fizycznych:

$$v = a \cdot t \quad (2)$$

Uzyskaliśmy wzór pozwalający obliczyć prędkość końcową ciała v po upływie czasu t , gdy ciało ruszyło z miejsca z przyspieszeniem a .



Ryc. 3.4. Rozpędzanie samochodu na drodze s

PRZYKŁAD 1.

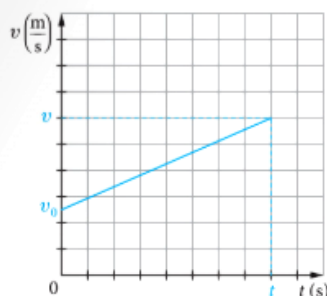
Samochód ruszający z miejsca rozpędził się (mając stałe przyspieszenie) do prędkości 70 km/h w czasie 12 s . Obliczmy przyspieszenie tego auta.

Zmiana prędkości samochodu wynosi: $\Delta v = 70 \text{ km/h} \approx 19 \text{ m/s}$.

Przyspieszenie auta:

$$a = \frac{|\Delta v|}{t} = \frac{19 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{12 \text{ s}} \approx 1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Możemy spotkać się z sytuacjami, w których jakiś obiekt zaczyna przyspieszać od pewnej prędkości początkowej v_0 . Tak jest np. wtedy, gdy samochód wjeżdża na autostradę. Gdy przyspieszenie podczas tego ruchu jest stałe, to zmiany prędkości takiego pojazdu można przedstawić za pomocą wykresu pokazanego na rycinie 3.5.



Ryc. 3.5. Wykres zależności prędkości od czasu w ruchu jednostajnie przyspieszonym od prędkości początkowej v_0

Prędkość końcową w takim ruchu można obliczyć ze wzoru:

$$v = v_0 + a \cdot t$$

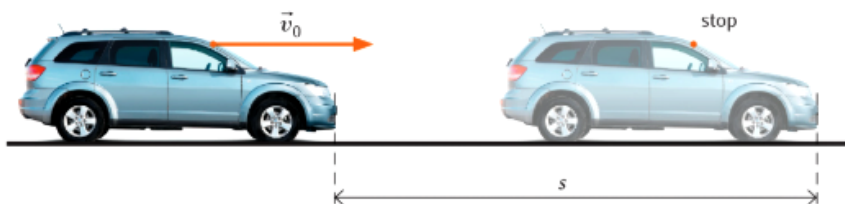
(3)

gdzie:

v – prędkość końcowa ciała,
 v_0 – prędkość początkowa ciała,
 a – przyspieszenie ciała,
 t – czas ruchu.

Ruch opóźniony

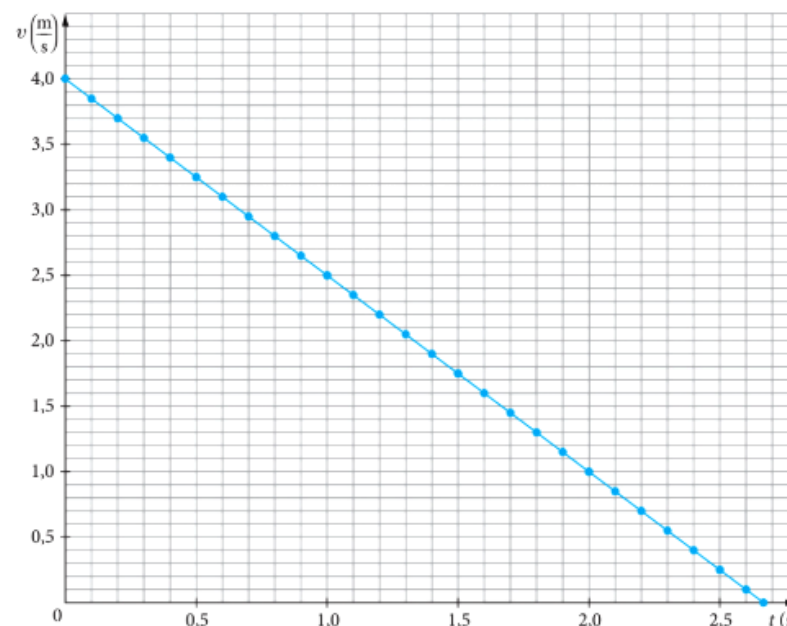
Ruchem opóźnionym nazywamy ruch, w którym prędkość ciała maleje. Wszystkie pojazdy, które się zatrzymują, muszą się wcześniej poruszać ruchem opóźnionym i pokonują w tym czasie jakąś drogę. Podobnie ciało podrzucone do góry porusza się ruchem opóźnionym, zanim osiągnie najwyższe położenie.



Ryc. 3.6. Hamowanie samochodu na drodze s

Rozważmy najprostszy przypadek ruchu opóźnionego, gdy wykres zależności prędkości od czasu jest linią prostą – oznacza to, że w jednakowych odstępach czasu prędkość maleje o tę samą wartość.

Ruch, w którym prędkość maleje o taką samą wartość w jednakowych odstępach czasu, nazywamy **ruchem jednostajnie opóźnionym**.



Ryc. 3.7. Wykres zależności prędkości od czasu w ruchu jednostajnie opóźnionym

Na rycinie 3.7 przedstawiona jest zależność prędkości od czasu hamującego samochodu. Z wykresu odczytujemy, że prędkość początkowa (czyli prędkość w momencie, gdy zaczęliśmy analizę ruchu) wynosiła $v_0 = 4 \text{ m/s}$. Odczytujemy również, że w ciągu każdej sekundy prędkość samochodu malała o $1,5 \text{ m/s}$, czyli przyspieszenie samochodu podczas hamowania wynosiło $1,5 \text{ m/s}^2$.

Możemy zatem obliczyć prędkość auta po upływie np. 2 s :

$$v = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \text{ s} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Uogólnijmy otrzymany wzór na każdy przypadek ruchu jednostajnie opóźnionego:

$$v = v_0 - a \cdot t$$

(4)

gdzie:

v – prędkość końcowa ciała,
 v_0 – prędkość początkowa ciała,
 a – przyspieszenie ciała,
 t – czas ruchu.

Z tego wzoru wynika, że im dłużej trwa ruch, tym prędkość ciała jest mniejsza.

Gdy ciało się zatrzymuje po pewnym czasie t , wzór ten przyjmuje postać:

$$0 = v_0 - a \cdot t$$

Po przeniesieniu wyrażenia $a \cdot t$ na lewą stronę mamy:

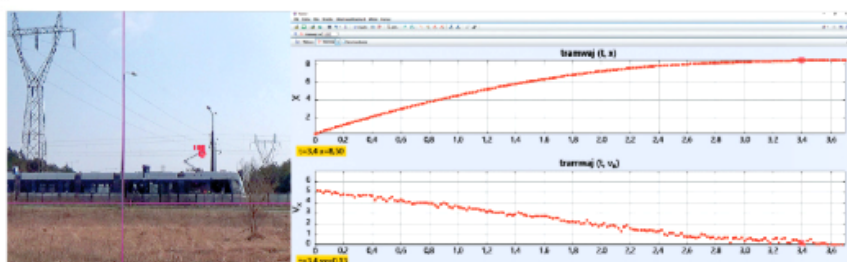
$$a \cdot t = v_0 \quad (5)$$

Po przekształceniu uzyskujemy:

$$t = \frac{v_0}{a} \quad (6)$$

Z tego wzoru można obliczyć czas hamowania ruchem jednostajnie opóźnionym do zatrzymania się ciała poruszającego się początkowo z prędkością v_0 .

Prześledźmy z wykorzystaniem programu Tracker rzeczywisty ruch tramwaju, który hamował przed zatrzymaniem się na przystanku.



Ryc. 3.8. Zrzut ekranu programu Tracker podczas analizy ruchu tramwaju hamującego przed zatrzymaniem się na przystanku

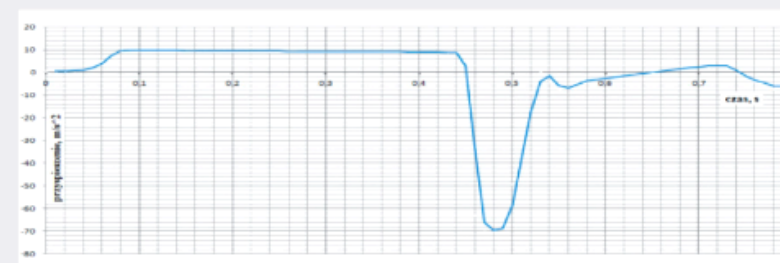
Z wykresu zależności położenia od czasu można odczytać, że kolejnym jednakowym odstępom czasu odpowiadają coraz krótsze odcinki drogi przebytej przez tramwaj. Na wykresie zależności prędkości od czasu punkty pomiarowe układają się w przybliżeniu wzdłuż linii prostej – możemy zatem uznać, że ruch tramwaju był jednostajnie opóźniony.

Ruch opóźniony to jakby odwrócenie w czasie ruchu przyspieszonego. Gdybyśmy puścili do tyłu film z hamującym tramwajem, zobaczylibyśmy ruch przyspieszony. Dlatego wzór (5) jest podobny do wzoru (2), a wykresy dla tego ruchu są podobne do wykresów na ryc. 3.1.

Tak jak w przypadku prędkości można rozróżnić przyspieszenie średnie i chwilowe. Wartość przyspieszenia chwilowego obliczamy ze wzoru (1), gdy czas zmiany prędkości jest bardzo mały.

WARTO WIEDZIEĆ

Pomiar przyspieszenia za pomocą smartfona



Przyspieszenie można mierzyć za pomocą smartfona z aplikacją Phyphox. Smartfon mierzy tylko swoje przyspieszenie chwilowe, więc podczas pomiarów musi poruszać się razem z badanym ciałem. Jednym z ciekawszych pomiarów jest wyznaczenie przyspieszenia telefonu spadającego na miękkie poduszki. Na wykresie przedstawiono wyniki takiego pomiaru. Gdy puścimy smartfona swobodnie, to przez pewien czas będzie poruszał się z przyspieszeniem zbliżonym do przyspieszenia ziemskiego, czyli $9,8 \text{ m/s}^2$. Zmierzona wartość przyspieszenia spadania w naszym doświadczeniu rzeczywiście wynosiła ok. 10 m/s^2 . Jak można zauważyć, podczas ruchu, w którym prędkość rośnie, przyspieszenie było dodatnie. W momencie, w którym smartfon zetknął się z poduszką, ruch przestał być przyspieszony. Podczas ruchu opóźnionego smartfon wskazywał, że przyspieszenie było ujemne. We wzorze (4) mamy znak „-”, który stosujemy, gdy prędkość maleje. Oznacza to, że aplikacja uwzględnia, iż prędkość maleje, przez podanie ujemnego przyspieszenia. Warto zwrócić uwagę na to, jak duże przyspieszenie miał smartfon lądujący na miękkiej poduszce. Gdyby spadł na podłogę, przyspieszenie byłoby jeszcze większe, bo krótszy byłby czas hamowania. Duże przyspieszenia są bardzo niebezpieczne dla ludzi i urządzeń. W przypadku ludzi grożą obrażeniami wewnętrznymi, w przypadku urządzeń – ich zniszczeniem.

PRZYKŁAD 2.

Autobus jedzie z prędkością 40 km/h. W celu zapewnienia komfortu podróżnym przyspieszenie autobusu nie powinno przekraczać $1,4 \text{ m/s}^2$. Obliczmy, jak długo będzie hamował autobus przed przystankiem, gdy będzie jechał ruchem jednostajnie opóźnionym z maksymalnym dopuszczalnym przyspieszeniem.

Podstawiamy dane do wzoru (6), pamiętając o zamianie jednostek prędkości, i otrzymujemy:

$$t = \frac{v_0}{a} = \frac{40 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}}}{1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 7,9 \text{ s}$$

**PODSUMOWANIE**

- **Wartość przyspieszenia** w ruchu prostoliniowym obliczamy jako stosunek dodatniej wartości zmiany prędkości $|\Delta v|$ do czasu t , w którym ta zmiana nastąpiła:

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

- **Ruch jednostajnie przyspieszony** to ruch, w którym prędkość wzrasta o taką samą wartość w jednakowych odstępach czasu. Przyspieszenie w tym ruchu jest stałe. Zależność prędkości od czasu w ruchu jednostajnie przyspieszonym to:

$$v = v_0 + a \cdot t$$

gdzie v_0 – prędkość początkowa.

Gdy $v_0 = 0$, to:

$$v = a \cdot t$$

- **Ruch jednostajnie opóźniony** to ruch, w którym prędkość maleje o taką samą wartość w jednakowych odstępach czasu. Przyspieszenie w tym ruchu jest stałe. Zależność prędkości od czasu w ruchu jednostajnie opóźnionym to:

$$v = v_0 - a \cdot t$$

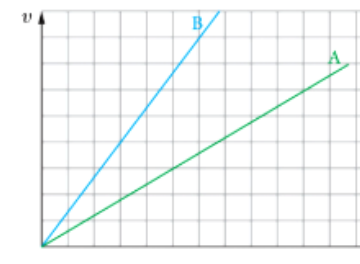
gdzie v_0 – prędkość początkowa.

- **Czas hamowania** podczas ruchu jednostajnie opóźnionego od prędkości początkowej v_0 do zatrzymania się obliczamy ze wzoru:

$$t = \frac{v_0}{a}$$

PYTANIA I ZADANIA

1. Na wykresie przedstawiono zależności prędkości od czasu dla dwóch pojazdów. Zapisz, który z nich poruszał się z większym przyspieszeniem.



2. Samochód rusza z miejsca ze stałym przyspieszeniem. Po pewnym czasie porusza się ruchem jednostajnym, a następnie hamuje aż do zatrzymania się. Podczas hamowania przyspieszenie jest większe niż podczas rozpędzania. Naskicuj wykres zależności prędkości tego auta od czasu. Porady dotyczące przedstawiania danych na wykresie znajdziesz w niezbędniku matematycznym.
3. Do osiągnięcia prędkości 100 km/h bolidom Formuły 1 wystarczy 1,7 s, a prędkość 200 km/h pojazdy te osiągają w czasie 3,8 s od momentu ruszenia. Oblicz średnie przyspieszenie bolidu podczas rozpędzania się:
- od 0 do 100 km/h,
 - od 100 km/h do 200 km/h.
4. Pociąg jedzie z prędkością 160 km/h. Przyspieszenie podczas hamowania tego pociągu jest stałe i ma wartość $0,90 \text{ m/s}^2$. Oblicz, po jakim czasie pociąg się zatrzyma.
5. Samochód jedzie z prędkością 50 km/h. Oblicz, jakie musiałoby być przyspieszenie tego samochodu, aby mógł się on zatrzymać w czasie 1 s. Porównaj otrzymany wynik z przyspieszeniem ziemskim.

s. 216

4. Droga w ruchu jednostajnym i zmiennym

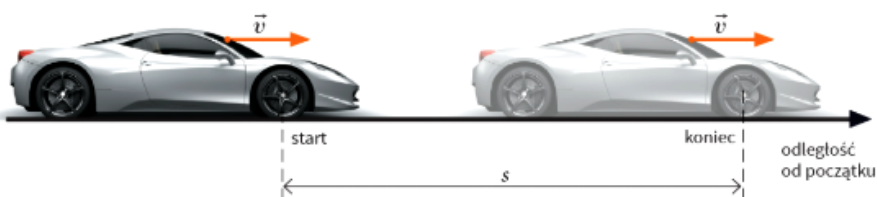
- Droga w ruchu jednostajnym
- Droga w ruchu jednostajnie przyspieszonym
- Droga w ruchu jednostajnie opóźnionym

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o ruchu jednostajnym i ruchu jednostajnie zmiennym.

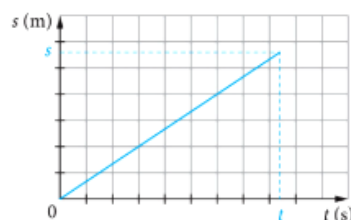
Przy opisie ruchu ciał przydatna jest umiejętność obliczania prędkości oraz drogi przebytej przez ciało po pewnym czasie.

Ruch jednostajny

Rozważmy ruch jednostajny samochodu (ryc. 4.1).



Ryc. 4.1. Podczas ruchu ze stałą prędkością droga rośnie wprost proporcjonalnie do czasu



Ryc. 4.2. Wykres zależności drogi od czasu w ruchu jednostajnym

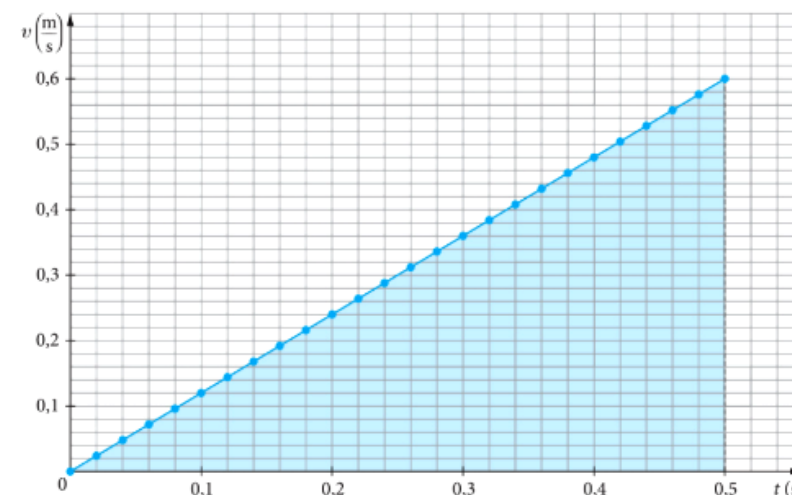
Jeśli drogę przebytą przez samochód będziemy mierzyć od miejsca, w którym samochód był w momencie rozpoczęcia obserwacji, to wykres zależności drogi lub położenia od czasu będzie wyglądał tak jak na rycinie 4.2.

Droga w ruchu jednostajnym jest wprost proporcjonalna do czasu trwania tego ruchu:

$$s = v \cdot t$$

gdzie v – prędkość poruszającego się obiektu.

Ruch przyspieszony



Ryc. 4.3. Wykres zależności prędkości od czasu w ruchu jednostajnie przyspieszonym

Analizę ruchu jednostajnie przyspieszonego ograniczymy do sytuacji, w których ciało rusza z miejsca. Zależność prędkości od czasu dla takiego przypadku przedstawiono na wykresie (ryc. 4.3). Z poprzedniego rozdziału wiemy, że w tym przypadku:

$$v = a \cdot t$$

Z rozdziału 2. wiemy, że prędkość średnia to stosunek całkowitej drogi przebytej przez poruszający się obiekt do czasu trwania ruchu:

$$v_{sr} = \frac{s}{t}$$

Wynika stąd, że droga pokonana przez ciało jest równa iloczynowi prędkości średniej i czasu ruchu:

$$s = v_{sr} \cdot t$$

Można udowodnić, że prędkość średnia w ruchu jednostajnie przyspieszonym jest średnią arytmetyczną prędkości początkowej (równej 0 w przypadku ciała ruszającego z miejsca) i końcowej, a zatem:

$$v_{sr} = \frac{0 + v}{2} = \frac{v}{2}$$

Podstawiamy tę zależność do wzoru na drogę:

$$s = \frac{v}{2} \cdot t = \frac{1}{2} v \cdot t$$

Drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej można obliczyć ze wzoru:

$$s = \frac{1}{2} v \cdot t \quad (1)$$

gdzie v – prędkość końcowa.

Z ryciny 4.3 można wywnioskować, że droga wyrażona wzorem (1) jest liczbowo równa polu powierzchni zaznaczonego trójkąta.

PRZYKŁAD 1.

Alina jedzie rowerem z prędkością 11 m/s. Gdy mija stojącego ze skuterem Bartka, ten rusza w pogoń ze stałym przyspieszeniem $0,5 \text{ m/s}^2$. Obliczmy, kiedy i z jaką prędkością Bartek będzie mijał Alinę.

Przedstawmy na wykresie zależności prędkości pojazdów od czasu.

W momencie, gdy Bartek dogania Alinę, drogi przebyte przez oba pojazdy w czasie pościgu były takie same. Możemy więc zapisać:

$$s_A = s_B$$

Zauważmy przy tym, Bartek poruszał się ruchem przyspieszonym, a Alina jednostajnym. Podstawiamy wzory na drogi w ruchu jednostajnym i przyspieszonym:

$$v_A \cdot t = \frac{1}{2} \cdot v_B \cdot t$$

Dzielimy obie strony równania przez czas t i otrzymujemy:

$$v_A = \frac{1}{2} \cdot v_B$$

Stąd prędkość Bartka w momencie mijania Aliny:

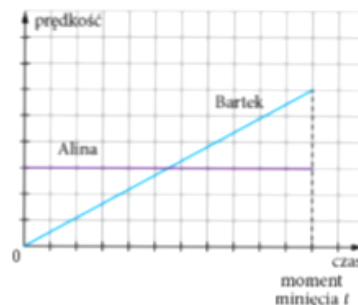
$$v_B = 2 \cdot v_A$$

Po podstawieniu danych uzyskujemy:

$$v_B = 2 \cdot 11 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Obliczmy teraz, jak długo trwał pościg. Prędkość Bartka:

$$v_B = a \cdot t$$



Stąd czas pościgu:

$$t = \frac{v_B}{a}$$

Po podstawieniu danych uzyskujemy:

$$t = \frac{22 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 44 \text{ s}$$

Jeśli do wzoru (1) wstawimy jako prędkość końcową $v = a \cdot t$, otrzymamy inny wzór na przebytą drogę:

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

Drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym można obliczyć jeszcze z innego wzoru.

Jeśli ze wzoru $v = a \cdot t$ wyznaczmy $t = \frac{v}{a}$ i wstawimy do równania drogi w ruchu jednostajnie przyspieszonym (1), otrzymamy:

$$s = \frac{1}{2} v \cdot \frac{v}{a} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{a}$$

Po przekształceniu powyższego równania otrzymamy:

$$2as = v^2 \quad (2)$$

W powyższym wzorze nie występuje czas. Ta zależność jest pomocna przy rozwiązywaniu wielu zadań.

PRZYKŁAD 2.

Pociąg po ruszeniu ze stacji jechał ruchem jednostajnie przyspieszonym i po przejechaniu drogi 500 m osiągnął prędkość 95 km/h. Obliczmy czas potrzebny na przebycie tej drogi.

Z przekształconego wzoru (1) na drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym otrzymujemy:

$$t = \frac{2s}{v}$$

Po podstawieniu danych do wzoru uzyskujemy:

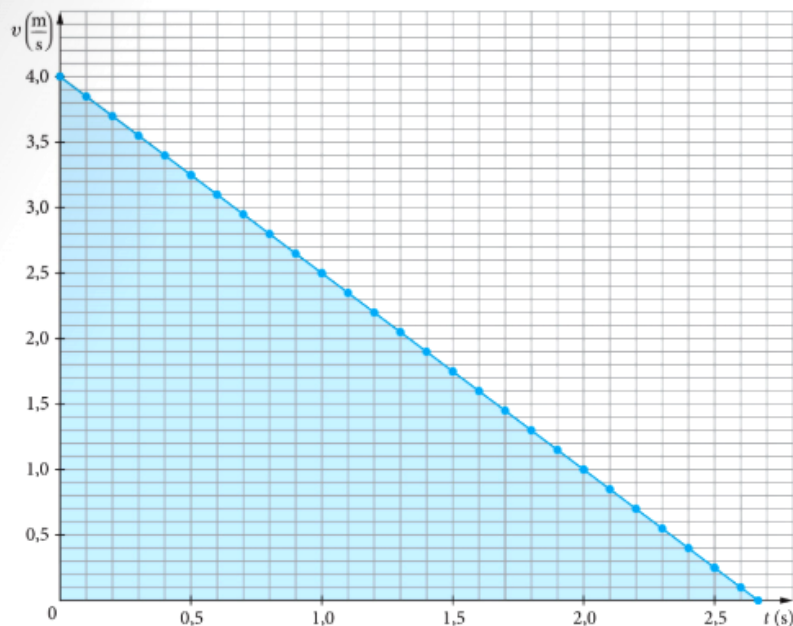
$$t = \frac{2 \cdot 500 \text{ m}}{95 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}}} \approx 38 \text{ s}$$



Ruch opóźniony

Rozważmy ruch jednostajnie opóźniony pojazdu, który hamuje, aż do zatrzymania się. Zależność prędkości od czasu w takim ruchu jest fragmentem linii prostej (ryc. 4.4). Prędkość średnia w tym przypadku jest równa połowie prędkości początkowej:

$$v_{\text{sr}} = \frac{v_0}{2}$$



Ryc. 4.4. Wykres zależności prędkości od czasu w ruchu jednostajnie opóźnionym

Drogę w ruchu jednostajnie opóźnionym podczas hamowania od prędkości początkowej v_0 do momentu zatrzymania się można obliczyć ze wzoru:

$$s = \frac{1}{2} v_0 \cdot t \quad (3)$$

gdzie v_0 – prędkość początkowa.

Z ryciny 4.4 wynika, że droga wyrażona wzorem (3) jest także równa polu powierzchni zaznaczonego trójkąta. Okazuje się, że w każdym ruchu pole figury ograniczonej wykresem zależności prędkości od czasu oraz osiami t i v określa drogę przebytą przez ciało. Warto zwrócić uwagę, że wzory dla ruchu jednostajnie przyspieszonego od momentu ruszenia z miejsca i dla ruchu jednostajnie opóźnionego do momentu zatrzymania się mają taką samą postać.

WARTO WIEDZIEĆ

Przyspieszenia na co dzień

W celu zapewnienia komfortu oraz bezpieczeństwa podróżnych przyspieszenia pojazdów kołowych – autobusów, tramwajów, pociągów – zarówno w ruchu przyspieszonym, jak i opóźnionym zwykle nie są większe niż 1 m/s^2 . Aby wyobrazić sobie wartość takiego przyspieszenia, posłużmy się przykładem.

Gdyby w hamującym z przyspieszeniem 10 m/s^2 pociągu zawiesić na nitce kulkę, to nitka odchyliłaby się o kąt 45° . Gdy kulka jest zawieszona na nitce wewnątrz pojazdu jadącego z przyspieszeniem 1 m/s^2 , to odchyła się o kąt ok. 5° .

Znacznie większe przyspieszenia występują podczas zderzeń pojazdów. Strefa kontrolowanego zgniotu dla większości samochodów osobowych jest nie większa niż 1 m . Wyobraźmy sobie pojazd jadący z prędkością 90 km/h .

Gdyby podczas zderzenia został on zatrzymany na drodze 1 m , to jego przyspieszenie przekroczyłoby 300 m/s^2 . W takim przypadku nawet najlepsze zabezpieczenia pasażera w postaci poduszek powietrznych, pasów bezpieczeństwa itp. mogłyby nie wystarczyć, żeby uchronić go przed poważnymi obrażeniami. Pojazdami pasażerskimi, które osiągają największe przyspieszenia, są rakiety kosmiczne. Podczas lotu na orbitę, który odbył Mirosław Hermaszewski, polski kosmonauta, przyspieszenie rakiety nie przekraczało 55 m/s^2 . Przyspieszenia amerykańskich promów kosmicznych wynosiły ok. 35 m/s^2 .



PRZYKŁAD 3.

Samochód gwałtownie zahamował przed przejściem dla pieszych. Podczas hamowania trwającego 4 s pojazd przejechał drogę 40 m i się zatrzymał. Oblicz prędkość początkową tego samochodu, jeśli można założyć, że ruch był jednostajnie opóźniony.



Po przekształceniu równania na drogę w ruchu jednostajnie opóźnionym (3) otrzymujemy:

$$v_0 = \frac{2s}{t}$$

Po podstawieniu danych do wzoru uzyskujemy:

$$v_0 = \frac{2 \cdot 40 \text{ m}}{4 \text{ s}} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

PODSUMOWANIE

► Zależność drogi od czasu **w ruchu jednostajnym** dana jest wzorem:

$$s = v \cdot t$$

gdzie v – stała prędkość.

► Zależność drogi od czasu **w ruchu jednostajnie przyspieszonym** od momentu ruszenia dana jest wzorem:

$$s = \frac{1}{2} v \cdot t$$

gdzie v – prędkość końcowa.

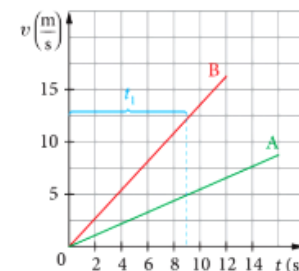
► Zależność drogi od czasu **w ruchu jednostajnie opóźnionym** do momentu zatrzymania się dana jest wzorem:

$$s = \frac{1}{2} v_0 \cdot t$$

gdzie v_0 – prędkość początkowa.

PYTANIA I ZADANIA

1. Odległość między Wałbrzychem a Głogowem wynosi 120 km. Zakładamy, że prędkość średnia samochodu na trasie łączącej te miasta wynosi 55 km/h. Oblicz, o której godzinie powinno się wyjechać z Wałbrzycha, aby dotrzeć do Głogowa o godz. 13.00.
2. Na wykresie przedstawiono zależności prędkości od czasu dla dwóch pojazdów.
 - a) Wskaż, który z nich poruszał się z większym przyspieszeniem.
 - b) Oszacuj stosunek dróg przebytych przez pojazdy A i B w czasie t_1 .



3. Z Poznania w kierunku Wrocławia o godz. 10.00 wyjechał autobus. Prędkość tego autobusu była równa 60 km/h. Jakiś czas później z Poznania w tę samą stronę wyruszył samochód osobowy jadący z prędkością 80 km/h. Samochód dogonił autobus po czasie 0,5 h. Oblicz, po jakim czasie od chwili wyruszenia autobusu wyjechał samochód osobowy.
4. Samochód ruszył z miejsca i ruchem jednostajnie przyspieszonym przebył drogę 300 m. W tym momencie jego prędkość była równa 70 km/h. Oblicz przyspieszenie samochodu podczas rozpędzania.
5. Pociąg jedzie z prędkością 160 km/h. Można przyjąć, że maksymalne przyspieszenie podczas hamowania pociągu nie powinno przekraczać 2 m/s^2 . Oblicz minimalną drogę hamowania pociągu, nim ten zatrzymał się przed sygnalizatorem świetlnym.

KINEMATYKA



ruch jednostajny

Prędkość jest stała.



PREDKOŚĆ

$$v = \frac{s}{t}$$

PREDKOŚĆ ŚREDNIA
stosunek przebytej drogi do czasu ruchu



W ruchu prostoliniowym w jedną stronę droga jest równa długości wektora przemieszczenia.

PREDKOŚĆ CHWILOWA
prędkość ciała w danym momencie (czas pomiaru bardzo krótki)

PRZYSPIESZENIE

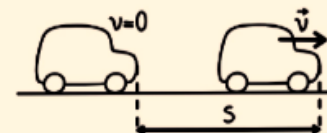
$$a = \frac{|\Delta v|}{t}$$



RODZAJE RUCHU

przyspieszenie jest stałe

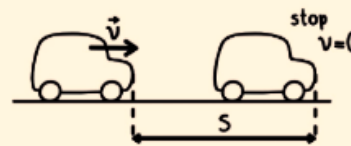
ruch przyspieszony



ruch jednostajnie przyspieszony

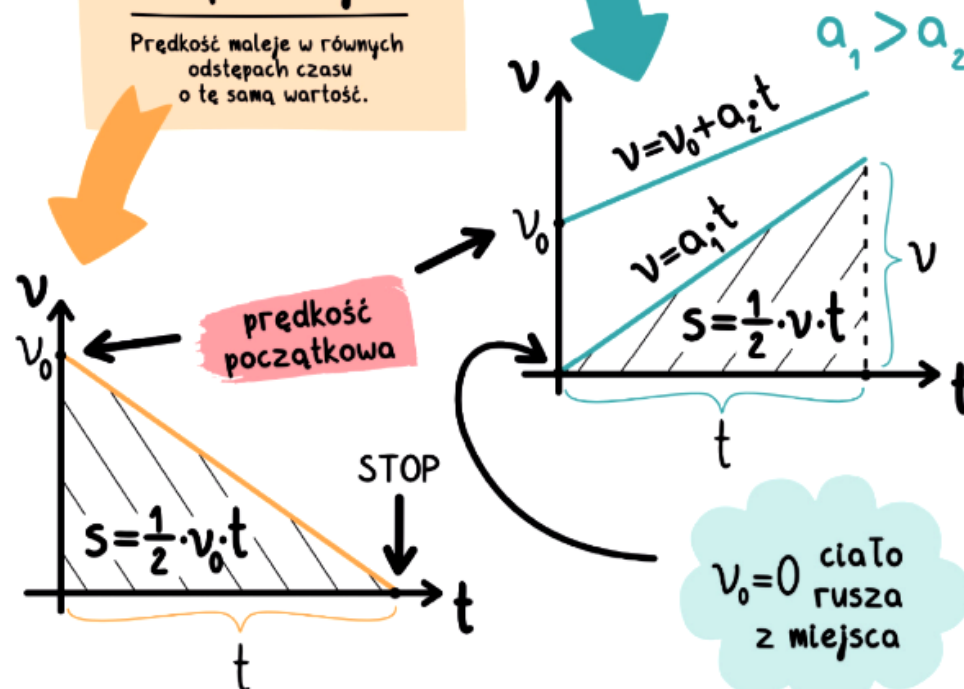
Prędkość rośnie w równych odstępach czasu o tę samą wartość.

ruch opóźniony



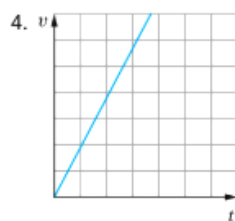
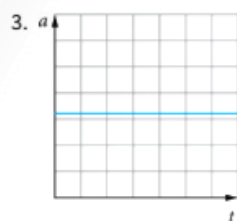
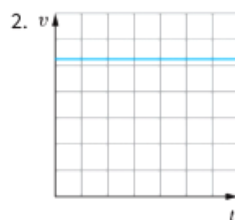
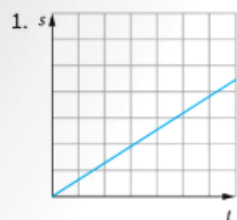
ruch jednostajnie opóźniony

Prędkość maleje w równych odstępach czasu o tę samą wartość.



PYTANIA I ZADANIA

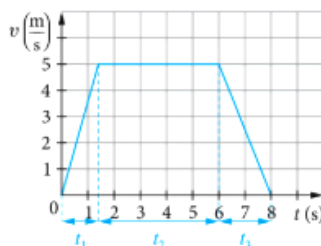
1. Na wykresach przedstawiono zależności $s(t)$, $v(t)$ i $a(t)$.



Przyporządkuj numery wykresów do rodzaju ruchu. Uwaga, każdy z wykresów pasuje do jednej z wymienionych możliwości.

- A. Ruch jednostajny.
B. Ruch jednostajnie przyspieszony.

2. Na wykresie przedstawiono zależność prędkości wagonika od czasu.



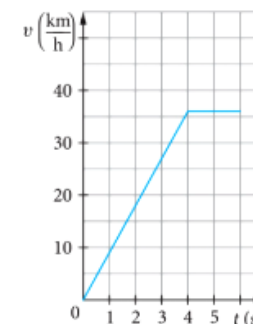
Wybierz właściwe dokończenie zdania spośród A–C oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–3.

Ruch, w którym przyspieszenie było równe zero, odbywał się w przedziale czasu

A.	t_1 ,	ponieważ wówczas	1.	prędkość się nie zmieniła.
B.	t_2 ,		2.	wartość prędkości wzrastała.
C.	t_3 ,		3.	wagonik hamował.

3. Na wykresie przedstawiono zależność prędkości sprintera od czasu w biegu na 100 m w ciągu pierwszych 6 s ruchu. Przyjmij, że do mety prędkość sprintera już się nie zmieniła.

- a) Opisz ruch sprintera na poszczególnych etapach.
b) Oblicz czas, jaki uzyskał sprinter w biegu na 100 m.



4. Odległość między stacjami Gdynia Główna i Sopot jest równa 9 km. Zgodnie z rozkładem jazdy pociąg pospieszny potrzebuje 8 min na przebycie tego odcinka.

Oceń prawdziwość zdań. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe.

1.	Pociąg pokonuje tę trasę z prędkością średnią ok. 68 km/h.	P	F
2.	Maksymalna prędkość pociągu może być równa 98 km/h.	P	F

5. Zosia jedzie rowerem ruchem jednostajnym z prędkością 4 m/s. Staszek jedzie samochodem z prędkością 20 m/s i dogania Zosię. W momencie, w którym zrównuje się z Zosią, zaczyna hamować ruchem jednostajnie opóźnionym i zatrzymuje się po 8 s. Po pewnym czasie Zosia dociera do miejsca postoju Staszka.

- a) W jednym układzie współrzędnych sporządź dwa wykresy zależności prędkości od czasu od momentu, gdy Staszek mija Zosię, do momentu, gdy się spotykają. Na jednym wykresie przedstaw ruch Staszka, a na drugim – Zosi.
b) Oblicz, jak długo Staszek będzie czekał na Zosię.

6. Kilukrotnie zmierzono długość krzywoliniowego toru saneczkowego. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli.

Numer pomiaru	1	2	3	4	5
Długość toru (m)	276,5	275,4	276,1	276,5	277,0

Jaka długość toru wynika z pomiarów?

7. Łódź motorowa płynęła Wisłą z Torunia do Bydgoszczy i z powrotem. Odległość między tymi miastami liczona wzdłuż rzeki wynosi 40 km. Prędkość łodzi względem brzegu podczas ruchu z prądem rzeki wynosiła 15 km/h, a pod prąd – 10 km/h. Oblicz całkowity czas ruchu łodzi w opisanej sytuacji.

8. W momencie zapalenia się zielonego światła auto osobowe rusza ze skrzyżowania. Samochód ten w ciągu 5 s uzyskuje prędkość 14 m/s. Jednocześnie przez skrzyżowanie przejeżdża tramwaj, poruszający się w tę samą stronę co auto ruchem jednostajnym z prędkością 12 m/s.
 - a) Ile wynosi przyspieszenie samochodu osobowego, a ile przyspieszenie tramwaju?
 - b) Który z tych pojazdów pokona większą drogę w czasie 5 s?
9. Samochód jedzie z prędkością 54 km/h. Czas reakcji kierowcy tego auta na zdarzenie na szosie jest równy 1,2 s. Przyspieszenie samochodu podczas hamowania może być równe co najwyżej 8 m/s².
 - a) W jakiej najmniejszej odległości od przejścia dla pieszych kierowca musi zauważyć pieszego na przejściu, żeby skutecznie zahamować?
 - b) Ile wynosi najkrótszy czas, który upłynie od chwili dostrzeżenia pieszego do momentu całkowitego zatrzymania się samochodu?
10. Podczas biegu na 60 m sprinter poruszał się ruchem jednostajnie przyspieszonym przez połowę dystansu, a pozostałą część dystansu poruszał się ruchem jednostajnym. Sprinter w ten sposób uzyskał czas 7,2 s.
 - a) Oblicz wartość prędkości, jaką miał sprinter pod koniec dystansu.
 - b) Oblicz wartość przyspieszenia sprintera podczas rozpędzania się.

Najważniejsze pojęcia w dziale

- cyfry znaczące [*significant digits*] 9
- droga [*distance*] 12, 34, 36
- niepewność pomiarowa [*measurement uncertainty*] 7
- położenie [*position*] 16, 18
- prędkość [*velocity*] 13
- przemieszczenie [*displacement*] 18
- przyspieszenie [*acceleration*] 24
- rozdzielczość [*resolution*] 6
- ruch jednostajny [*uniform motion*] 19, 20, 32
- ruch zmienny [*non-uniform motion*] 23
- tor ruchu [*trajectory*] 12
- układ odniesienia [*frame of reference*] 12
- wektor [*vector*] 17



DYNAMIKA

Dlaczego akrobata chodzący po linie rozkłada ręce i balansuje całym ciałem? Czy przy przeciąganiu liny ważniejsze są silne ręce, czy silne nogi? Na takie pytania można odpowiedzieć dzięki analizie sił działających na ciała. Tym właśnie zajmuje się DYNAMIKA.



5. Siły wokół nas.

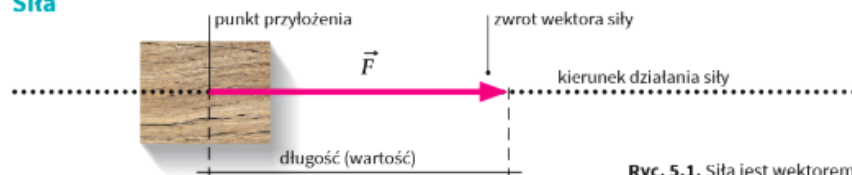
III zasada dynamiki

- Wektor siły
- III zasada dynamiki
- Rodzaje sił
- Siły wewnętrzne i zewnętrzne

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o sile i III zasadzie dynamiki.

Przyczyną prawie wszystkich zmian obserwowanych w przyrodzie jest oddziaływanie ciał. Oddziaływanie jest zawsze wzajemne, a jego miarą jest **siła**. Żeby opisać zjawiska zachodzące wokół nas, powinniśmy znać siły działające w naszym otoczeniu. W tym rozdziale poznamy siły, z którymi mamy do czynienia najczęściej.

Siła



Ryc. 5.1. Siła jest wektorem

Siła działa zawsze w określonym kierunku, zatem jest wielkością wektorową. Jednostką siły jest **niuton** (1 N). Wartość siły możemy zmierzyć za pomocą siłomierza.

DOŚWIADCZENIE 1.

Do skonstruowania siłomierza będą potrzebne: strzykawka lekarska z gumowym tłokiem (o pojemności 2 ml), sprężynka z długopisu, mocny klej, wytrzymała nić, flamaster.

- Najpierw wyjmij tłok z cylindra strzykawki i zdemontuj z niego gumową uszczelkę – zapewni to swobodny ruch tłoka wewnątrz strzykawki.
- Jeden koniec sprężynki przymocuj do tłoka, a do drugiego jej końca przywiąż mocną nić.
- Koniec nici przeciągnij przez otwór strzykawki, a następnie przyklej sprężynkę do denka strzykawki, tak jak na fotografii.
- Tak zbudowany siłomierz trzeba jeszcze wyposażyć w skalę. Początkowe ustawienie tłoka to 0 N. Zawieś na nici obciążnik o masie 100 g i przy nowym ustawieniu tłoka zaznacz na strzykawce 1 N. Gdy zawieszisz na nici inne obciążniki, uzyskasz pełniejszą skalę.

Skalowanie siłomierza za pomocą obciążnika o masie 100 g

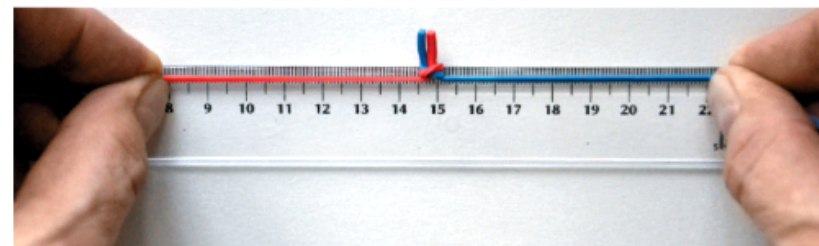


Sił nie da się bezpośrednio obserwować. O ich istnieniu dowiadujemy się poprzez obserwację skutków ich działania, takich jak odkształcenie ciała lub zmiana jego prędkości. **Każda siła wywiera skutek tylko na ciało, na które działa.** Dlatego zwykle rysujemy początek wektora siły (tzw. punkt przyłożenia) w ciele, na które ona działa (ryc. 5.1). Podstawową cechą wszystkich oddziaływań opisuje III zasada dynamiki.

III zasada dynamiki

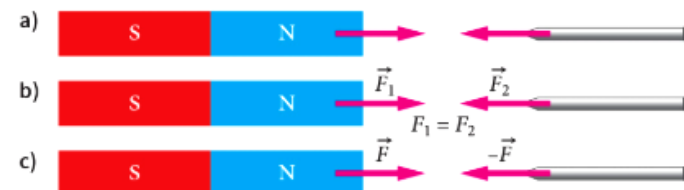
Oddziaływania ciał są zawsze wzajemne. Dwa ciała działają wzajemnie na siebie siłami tego samego rodzaju, o tej samej wartości, lecz o przeciwnych zwrotach.

DOŚWIADCZENIE 2.



Zwiąż ze sobą dwie jednakowe gumki o tej samej długości. Chwyc wolny koniec każdej gumki ręką i ciągnij w przeciwnie strony (fot.). Czy gumki wydłużają się tak samo? Jaki będzie wynik doświadczenia, gdy jedna ręka nie będzie zmieniać swojego położenia?

Gdy przedstawiamy siły oddziaływania między dwoma ciałami, rysujemy dwa różniące się tylko zwrotem wektory, każdy przyłożony do jednego z ciał (ryc. 5.2a).



Ryc. 5.2. Siły przedstawiamy za pomocą wektorów. Wektory powinny różnić się oznaczeniami

Są to różne wektory. Mimo że mają tę samą wartość i ten sam kierunek, to mają przeciwne zwroty. Możemy je oznaczać różnymi indeksami lub literami. Jednak trzeba wtedy dopisać, że wartości obu wektorów są takie same (ryc. 5.2b).

Inny sposób oznaczania sił pokazano na ryc. 5.2c. Wektor $-\vec{F}$ jest przeciwny do wektora $\vec{F}$. Oba wektory mają tę samą wartość F , a znak „minus” oznacza przeciwny zwrot. To, który z wektorów przeciwnych oznaczmy jako $\vec{F}$, a który jako $-\vec{F}$, jest kwestią wyboru.

Tę konwencję oznaczania sił będziemy stosować w podręczniku, ponieważ bez zapisywania równań widać, że oba wektory mają tę samą wartość, która jest zawsze dodatnia.

Aby zrozumieć, dlaczego wektory $\vec{F}$ i $-\vec{F}$ nazywamy przeciwnymi, najłatwiej prześledzić poniższy przykład z wektorami przemieszczenia (ryc. 5.3). Jeśli turysta najpierw przeszedł z punktu A do B, a następnie z punktu B do A, to wrócił do punktu wyjścia. Ostatecznie w ogóle się nie przemieścił. Wobec tego oba wektory przemieszczenia są przeciwne – jeden jest odwróceniem drugiego. Analogicznie mówimy o liczbach przeciwnych. Przykładowo liczby 3 i -3 są przeciwne, a mają tę samą wartość bezwzględną.

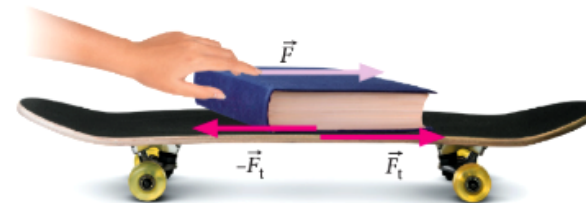


Rys. 5.3. Przemieszczenie turysty na trasie A-B-A jest równe zero

Siły wokół nas

Rozpatrzmy teraz siły najczęściej występujące w naszym otoczeniu. Jeśli siedzimy na krześle, to działamy na nie siłą nacisku, która odkształca krzesło (można to łatwo zaobserwować, gdy siedzisko jest miękkie). Tę siłę na ryc. 5.4 oznaczono $\vec{F}_n$. Zgodnie z III zasadą dynamiki krzesło naciska na nas siłą przeciwną. Ta siła $-\vec{F}_n$ powoduje odkształcenie naszych ud i pośladków, co bezpośrednio czujemy. Te dwie siły tworzą parę **sił nacisku**. Obie działają na różne ciała (jedna na osobę, a druga na krzesło) w punkcie styku, ale nie łączymy ich na rysunku. Chcemy wyraźnie pokazać, że każda z nich działa na inne ciało. Często przy omawianiu tego zagadnienia siłę nacisku działającą na krzesło nazywa się **siłą akcji**, a siłę działającą na osobę **siłą reakcji podłoża**. Warto pamiętać, że **siły nacisku są zawsze prostopadłe do powierzchni styku obu ciał**.

Ryc. 5.4. Gdy siedzisz, to krzesło i ty naciskacie na siebie wzajemnie. Siły nacisku mają tę samą wartość, ale przeciwne zwroty



Ryc. 5.5. Siły tarcia też występują parami

Jeśli przesuwamy po stole książkę, czujemy pewien opór, ponieważ działa na nią **siła tarcia**. Zgodnie z III zasadą dynamiki książka również działa na stół siłą tarcia skierowaną przeciwnie (czyli w kierunku ruchu książki). Łatwo zaobserwować skutki działania obu sił tarcia, gdy położymy książkę na deskorolce i spróbujemy ją przesunąć (ryc. 5.5). Siła $\vec{F}_t$ (akcja) wprawia w ruch deskorolkę, zaś siła $-\vec{F}_t$ (reakcja) hamuje ruch książki. **Siły tarcia są zawsze równoległe do powierzchni styku obu ciał**.



Ryc. 5.6. Powietrze działa na piłkę, a piłka działa na powietrze

Na lecącą piłkę działa **siła oporu**. Jest to siła oporu powietrza, przez które piłka musi się przedzierać. Natomiast poruszająca się piłka też pcha powietrze przed sobą, czyli działa na nie pewną siłą. Zgodnie z III zasadą dynamiki siła, z jaką powietrze stawia opór, i siła, z jaką jest pchane, to siły o tej samej wartości, lecz skierowane przeciwnie (ryc. 5.6). Obydwie wywierają skutki na ciała, na które działają. Siła $\vec{F}_{op}$ wprawia w ruch powietrze, a siła $-\vec{F}_{op}$ hamuje ruch piłki. **Siła oporu działa na każde ciało poruszające się w cieczy lub gazie i jest skierowana przeciwnie do prędkości ciała**.

Na każde ciało zanurzone w cieczy lub gazie działa **siła wyporu** skierowana w górę.



Ryc. 5.7. Na ciało zanurzone w wodzie działa siła skierowana w górę, na wodę działa siła skierowana w dół

Na ryc. 5.7 siła $\vec{F}$ działa na wodę i powoduje jej wypchnięcie spod dziewczyny, zaś siła $-\vec{F}$ działa na dziewczynę i unosi ją w górę.



Ryc. 5.8. Ziemia i człowiek przyciągają się wzajemnie siłami grawitacji

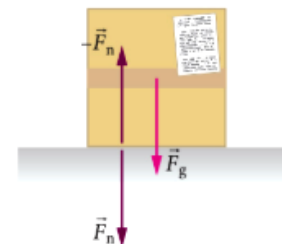
Na wszystkie ciała w naszym otoczeniu, także na nas, działa **siła grawitacji** pochodząca od Ziemi i skierowana w dół. Ta siła powoduje spadanie ciał. Gdy jakieś podłoże uniemożliwia spadanie, pojawia się siła nacisku (siła reakcji podłoża). Czyżby nie było siły

przeciwnej do siły grawitacji, wynikającej z III zasady dynamiki? Oczywiście, że jest, ale trudno zaobserwować jej skutki. Skoro Ziemia przyciąga nas, także i my przyciągamy Ziemię siłą grawitacji o tej samej wartości, lecz skierowaną przeciwnie (ryc. 5.8). Siła grawitacji przyłożona jest w punkcie ciała nazywanym środkiem ciężkości. W przypadku linijki czy jednorodnej kulki środek ciężkości znajduje się w ich geometrycznym środku. Środek ciężkości stojącego człowieka jest trochę poniżej pępka. Siłę, z jaką Ziemia przyciąga ciało, nazywamy często **siłą ciężkości** lub **ciężarem ciała**.

PRZYKŁAD 1.

Na podłodze leży paczka.
Przeanalizujmy siły działające na paczkę.

Ziemia przyciąga paczkę, działając na nią siłą grawitacji $\vec{F}_g$, zaś podłoga naciska na nią siłą $-\vec{F}_n$. Również paczka naciska na podłogę siłą $\vec{F}_n$. Innymi słowami, na paczkę działają dwie siły: $-\vec{F}_n$ oraz $\vec{F}_g$. Siły $-\vec{F}_n$ i $\vec{F}_g$ nie stanowią pary sił z III zasady dynamiki.



Siły wewnętrzne i zewnętrzne

Ciała działają na siebie siłami o tej samej wartości, skierowanymi przeciwnie. Takie siły działające na jedno ciało zawsze się równoważą. Jednak nie równoważą się siły przyłożone do różnych ciał – np. jedna z sił tarcia z ryc. 5.5 przeszkadza ruchowi książki, a druga może wprowadzić w ruch deskorolkę. Baron Münchhausen to malownicza postać z XVIII wieku, słynąca z wielu przechwałek. Między innymi baron ów twierdził, że gdy raz tonął w bagnie, podciągnął się w górę za włosy i w ten sposób się uratował (ryc. 5.9). Czy to możliwe?

Ryc. 5.9. Próba wyciągania się z bagna za własne włosy jest skazana na niepowodzenie



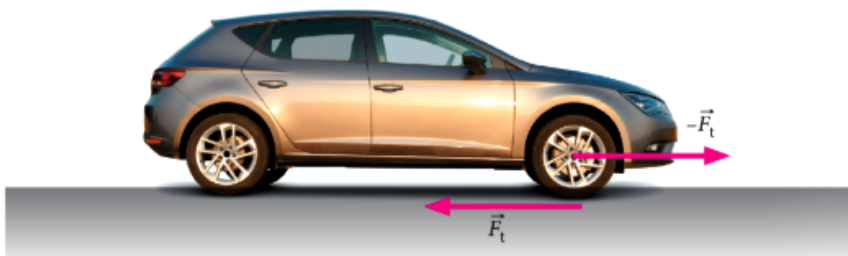
Wielu ludzi może działać na swoje włosy siłą większą od własnego ciężaru. Jednak zawsze mamy do czynienia z parą sił przeciwnych. Jeśli ręka ciągnie głowę w górę, głowa ciągnie rękę w dół. Na człowieka działają więc siły o takich samych wartościach, skierowane przeciwnie. Para takich sił nie może ruszyć go z miejsca (ryc. 5.9). Jeśli natomiast chwycimy się gałęzi i będziemy ją ciągnąć w dół, to gałąź będzie nas ciągnęła w górę. Te dwie siły działają na różne ciała, więc się nie równoważą i dzięki temu nasze szanse na ratunek rosną.

Tylko **siła zewnętrzna**, czyli pochodząca spoza ciała (układu ciał), może wprowadzić ciało (układ ciał) w ruch. Kajakarz musi pchnąć wiosłem wodę, żeby kajak zaczął płynąć (ryc. 5.10).



Ryc. 5.10. Kajakarza wprowadza w ruch siła pochodząca od wody

Koła samochodu muszą pchać podłoże, a podłoże pcha wówczas samochód (ryc. 5.11). Tak, to siła tarcia umożliwia poruszanie się samochodów i pociągów! Można się o tym przekonać poprzez obserwację samochodu w poślizgu. Gdy prawie nie ma tarcia, obrót kół nie powoduje ruchu pojazdu.



Ryc. 5.11. Tylko siła pochodząca spoza ciała może wprowadzić ciało w ruch

Także chodzenie polega na odpychaniu podłoża (ryc. 5.12). Tę możliwość zawdzięczamy sile tarcia, dlatego chodzenie po śliskim lodzie (gdy tarcie jest bardzo małe) jest takie trudne.

DOŚWIADCZENIE 1.

Deskorolkę połóż przy schodach równoległe do stopni, tak by przylegała do najniższego schodka. Stań jedną nogą na stopniu, a drugą na deskorolce. Ostrożnie próbuj ruszać z miejsca wzdłuż stopni, odpychając się od podłoża najpierw jedną, potem drugą nogą. W którym przypadku łatwiej ruszyć z miejsca? Dlaczego tak jest?



Ryc. 5.12. Możliwość chodzenia zawdzięczamy tarcia

To od nas zależy, co nazwiemy ciałem, a co układem ciał. Deskorolkę z książką z ryc. 5.5 możemy potraktować jako jedno ciało. Wtedy siły tarcia będą uznawane za wewnętrzne, a tylko siła pochodząca od ręki będzie siłą zewnętrzną działającą na to ciało.

Możemy też potraktować osobno książkę i deskorolkę. Wtedy stwierdzimy, że na książkę działają dwie siły (mamy na uwadze tylko te zaznaczone na ilustracji), a na deskorolkę jedna – i wszystkie one są siłami zewnętrznymi.

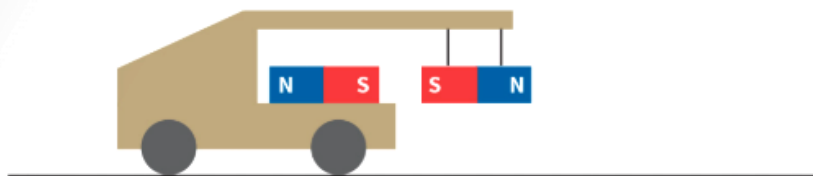
Każde ciało jest w istocie układem składającym się z miliardów atomów. Wszystkie atomy poruszają się i oddziałują z sąsiednimi atomami. Te miliardy par sił występujących między oddziałującymi atomami nie mają wpływu na ruch ciała jako całości, bo są to równoważące się wzajemnie siły wewnętrzne. Dlatego możemy tak niewiarygodnie skomplikowany układ rozważać jako jedno ciało, którego na ruch wpływają tylko siły zewnętrzne.

PODSUMOWANIE

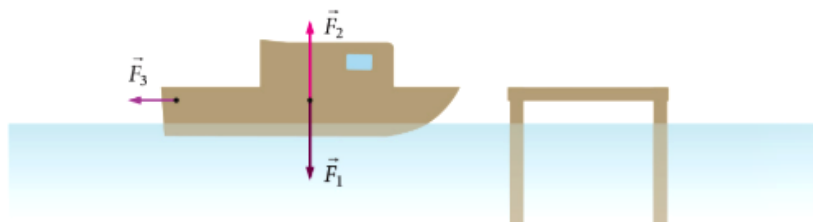
- ▶ **Siła** to wektorowa wielkość fizyczna będąca miarą oddziaływania między ciałami. Jednostką siły jest niuton (1 N).
- ▶ **III zasada dynamiki**
Oddziaływania ciał są zawsze wzajemne. Dwa ciała działają wzajemnie na siebie siłami tego samego rodzaju, o tej samej wartości, lecz o przeciwnych zwrotach.
- ▶ Tylko **siła zewnętrzna**, czyli pochodząca spoza ciała (układu ciał), może wprowadzić ciało (układ ciał) w ruch.

PYTANIA I ZADANIA

1. Ciągnik ciągnie przyczepę siłą 850 N. Jaką siłą przyczepa działa na ciągnik?
2. Gdy zbliżamy naelektryzowaną plastikową rurę do kawałków papieru, zauważamy, że są one przyciągane przez rurę. Wykonaj schematyczny rysunek i zaznacz na nim siły wzajemnego oddziaływania między kawałkami papieru a rurą.
3. Na wózku zamocowano magnes. Na sztywnym wieszaku zamocowanym do wózka powieszono drugi magnes. Opisana sytuacja została przedstawiona na rysunku. Wyjaśnij, czy taki układ magnesów może spowodować ruch wózka.



4. Łódź pod pływa do pomostu. Za pomocą wektorów przedstawiono siły działające na łódź.



- a) Nazwij siły pokazane za pomocą wektorów $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$.
 - b) Przerysuj rysunek do zeszytu i narysuj wektor siły działającej na wodę ze strony łodzi.
5. Na linie przymocowanej do sufitu wisi kulka. Przerysuj rysunek do zeszytu i dorysuj – zgodnie z III zasadą dynamiki – siły oddziaływania między kulką a linką oraz między linką a sufitem.



6. Siła wypadkowa. I zasada dynamiki

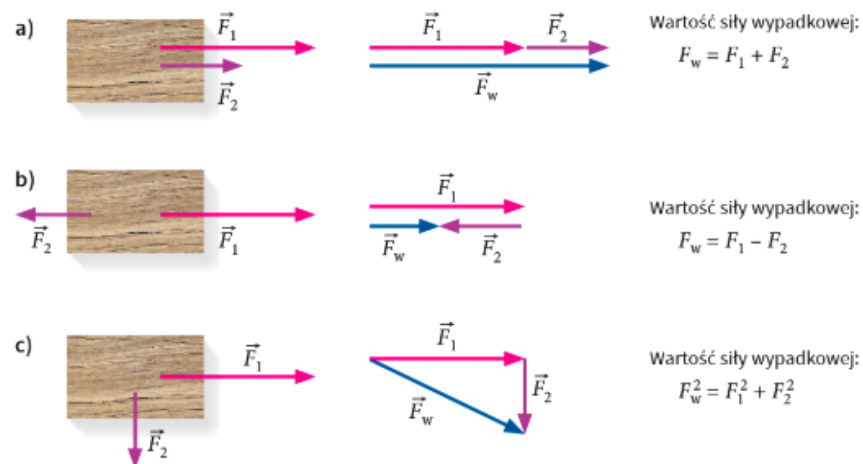
- Składanie sił
- I zasada dynamiki
- Inercjalne układy odniesienia

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o sile wypadkowej.

Siła jest przyczyną zmiany ruchu ciała. **Gdy na ciało działa kilka sił, o jego zachowaniu decyduje siła wypadkowa.** W tym rozdziale uwagę poświęcimy sytuacjom, w których siła wypadkowa działająca na dane ciało jest równa zeru.

Składanie sił

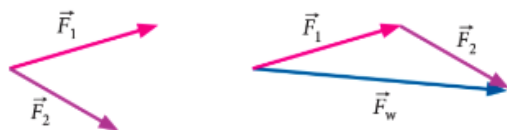
Wyobraźmy sobie, że na ciało działają dwie siły: $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$. Te dwie siły można zastąpić jedną – **siłą wypadkową**. Znajdowanie siły wypadkowej nazywamy **składaniem sił**. Sposób składania sił (dodawania wektorów sił) opisano poniżej. Jeden z wektorów przenosimy równolegle tak, by koniec pierwszego był zarazem początkiem drugiego. Łączymy początek pierwszego wektora z końcem drugiego i uzyskujemy wektor siły wypadkowej $\vec{F}_w$. Rozważmy trzy przypadki: siły skierowane są zgodnie, siły skierowane są przeciwnie oraz siły są prostopadłe do siebie.



Ryc. 6.1. Składanie sił. a) Siły działają wzdłuż jednego kierunku i mają zgodne zwroty. b) Siły działają wzdłuż jednego kierunku i mają przeciwnie zwroty. c) Siły są wzajemnie prostopadłe.

Z rysunków wynika, że wartość siły $\vec{F}_w$ obliczamy z różnych wzorów, w zależności od wyniku składania wektorowego. W przypadku wektorów leżących na jednej prostej wartości sił dodajemy, jeśli ich zwroty są zgodne, lub odejmujemy, jeśli są przeciwnie. W przypadku wektorów wzajemnie prostopadłych wartość siły wypadkowej obliczamy z twierdzenia Pitagorasa.

Opisaną tu metodę można stosować do składania sił o dowolnych kierunkach (ryc. 6.2), ale obliczenie wartości siły wypadkowej jest wówczas trudniejsze.



Ryc. 6.2. Składanie sił o dowolnych kierunkach

PRZYKŁAD 1.

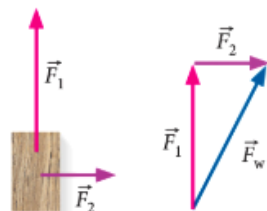
Na ciało działają dwie prostopadłe do siebie siły o wartościach $F_1 = 2,6 \text{ N}$ oraz $F_2 = 1,3 \text{ N}$. Wyznamy siłę wypadkową.

Składamy wektory sił $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ opisaną powyżej metodą. Wartość siły wypadkowej obliczamy z twierdzenia Pitagorasa:

$$F_w = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$F_w = \sqrt{(2,6 \text{ N})^2 + (1,3 \text{ N})^2} \approx 2,9 \text{ N}$$



Rozważmy przypadek samochodu jadącego po prostej drodze. W kierunku poziomym działają na niego tylko dwie siły: napędzająca $\vec{F}_{\text{nap}}$ oraz oporu ruchu $\vec{F}_{\text{op}}$. Załóżmy, że wartości tych sił są jednakowe, czyli na rysunku wektory sił mają taką samą długość. W tym przypadku siła wypadkowa jest równa zero. Inaczej mówimy, że siły te się **równoważą**.



Ryc. 6.3. Składanie sił działających na jadący samochód

I zasada dynamiki Newtona

Puszczona swobodnie foremka do babeczek po chwili porusza się ze stałą prędkością. Dlaczego nie spada ruchem jednostajnie przyspieszonym? Ruch foremki można wyjaśnić na podstawie I zasady dynamiki.

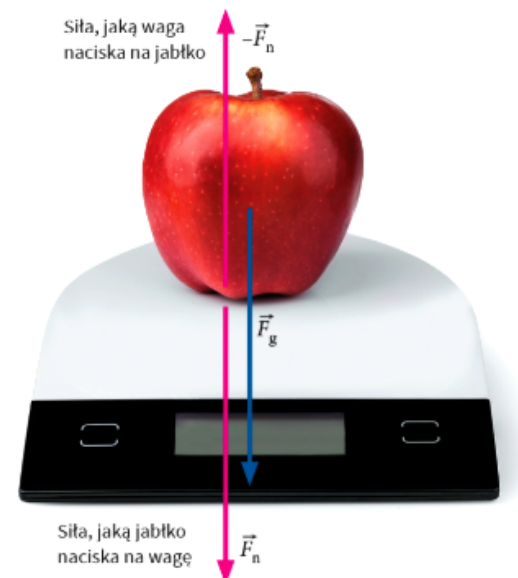
I zasada dynamiki

Ciało zachowuje swój stan spoczynku lub ruchu jednostajnego po linii prostej, gdy wypadkowa sił działających na nie jest równa zero.

Ciężar foremki jest równoważony przez siłę oporu powietrza, więc zgodnie z I zasadą dynamiki foremka porusza się ruchem jednostajnym.

Przeanalizujmy kilka sytuacji, w których stosujemy tę zasadę.

1. Spoczywające na wadze jabłko



Ryc. 6.4. Wążenie jabłka za pomocą wagi elektronicznej

Do wyznaczania masy używamy wagi. Na przykład aby zważyć jabłko, kładziemy je na wadze elektronicznej. Jabłko jest w spoczynku, więc z I zasady dynamiki możemy wysnuć wniosek, że siła nacisku równoważy ciężar jabłka.

WARTO WIEDZIEĆ

Ważenie ciał

Wagę kuchenną można traktować jako siłomierz. Trzeba jednak pamiętać, że jest ona wyskalowana w jednostkach masy. Aby uzyskać wartość siły w niutonach, należy odczytany w kilogramach wynik pomnożyć przez wartość przyspieszenia ziemskiego, czyli ok. $9,8 \text{ m/s}^2$.

Większość wag mierzy siłę, z jaką naciska na nią ciało położone na jej powierzchni. Jeśli ta powierzchnia jest pozioma, siła nacisku jest równa sile ciężkości. Jednak przyspieszenie ziemskie nie jest dokładnie takie samo w różnych miejscach na powierzchni Ziemi. Oznacza to, że wynik pomiaru zależy nie tylko od masy ciała, ale również od miejsca, w którym je ważymy. W niektórych przypadkach do pomiarów masy stosuje się nadal wagi szalkowe, które porównują siły ciężkości działające na ważone ciało i odważniki. Jeśli te siły są równe w jednym miejscu, będą równe po przeniesieniu do każdego innego miejsca, bo zmieniają się tak samo. Gdyby astronauta chciał ważyć młotek na powierzchni Księżyca, waga sprężynowa pokazałaby zupełnie inną masę niż szalkowa. Prawidłowy byłby odczyt z wagi szalkowej.

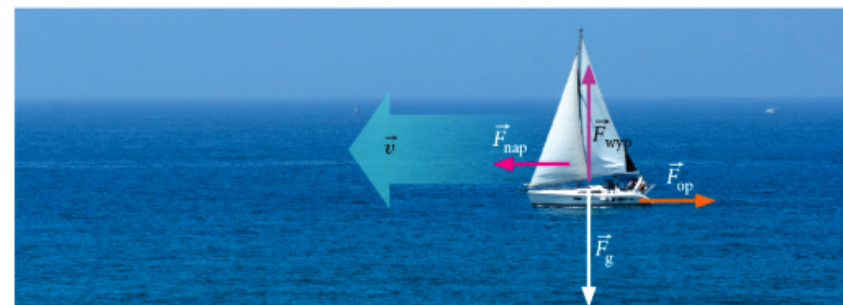
2. Ruch skoczka spadochronowego



Ryc. 6.5. Spadochroniarz opada ruchem jednostajnym, ponieważ siły na niego działające się równoważą

Tuż po otwarciu czaszy spadochronu bardzo zwiększa się siła oporu ruchu. Po chwili siła ciężkości F_g człowieka jest równoważona przez siłę F_s pochodzącą od spadochronu. Od tego momentu spadochroniarz spada ruchem jednostajnym. O tym, czy ciało porusza się, czy pozostaje w spoczynku, decyduje stan ruchu ciała tuż przed zrównoważeniem się sił.

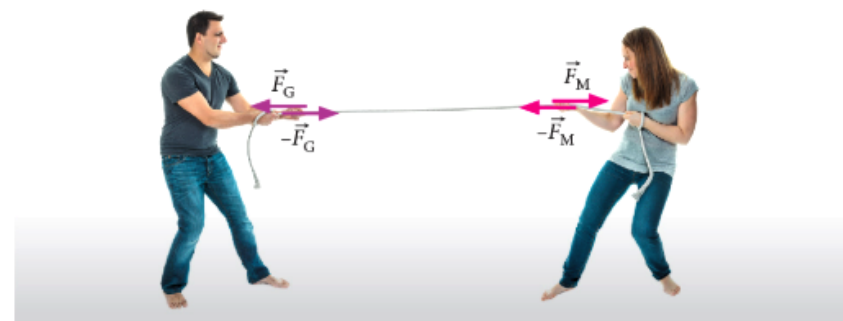
3. Ruch żaglówki płynącej po powierzchni jeziora ze stałą prędkością



Ryc. 6.6. Na płynącą żaglówkę działają siły wzajemnie się równoważące: siła napędzająca jest zrównoważona przez siłę oporu ruchu, a siła ciężkości – przez siłę wyporu

Na żaglówkę działają cztery siły. Z I zasady dynamiki wnioskujemy, że siła wypadkowa wynosi zero, jeśli żaglówka płynie ze stałą prędkością. Można też powiedzieć, że te cztery siły się równoważą. **Najprościej rozważyć osobno siły działające w kierunku pionowym oraz w kierunku poziomym.** W kierunku pionowym siła ciężkości F_g równoważy się z siłą wyporu F_{wyp} , ich wartości są takie same. Dwie siły działające w kierunku poziomym, czyli F_{nap} i F_{op} , też się równoważą. Wobec tego I zasada dynamiki pozwala w tym przypadku na stwierdzenie, że skoro prędkość jest stała, to $F_{wyp} = F_g$ oraz $F_{nap} = F_{op}$.

4. Przeciąganie liny



Ryc. 6.7. Siły działające wewnątrz układu Grzysiek–lina–Małgosia

Grzysiek i Małgosia ciągną linę z dwóch stron. Zgodnie z III zasadą dynamiki siły F_G , jaką Grzysiek ciągnie linę, towarzyszy siła $-F_G$, jaką linę ciągnie Grzysiek. Siły te mają jednakowe wartości. Małgosia i linę ciągną się wzajemnie siłami o wartości F_M . Dopóki Grzysiek i Małgosia ciągną linę siłami o jednakowych wartościach (czyli $F_G = F_M$), linę pozostaje nieruchoma. Wynika to z I zasady dynamiki. Opisane siły są siłami

wewnętrzny układ Grzesiek–lina–Małgosia. O tym, czy i w którą stronę poruszy się ten układ, zadecydują siły pochodzące z zewnątrz. Jeśli na przykład Małgosia mocniej oddepchnie się od podłoża niż Grzesiek, układ poruszy się w prawo.

I zasada dynamiki jest czasem nazywana **zasadą bezwładności**. **Ciało tak długo pozostaje nieruchome, aż jakaś siła nie spowoduje jego ruchu. Ciało tak długo się porusza, aż jakaś siła go nie zatrzyma.** Gdy obserwujemy zjawiska w otaczającym nas świecie, możemy dostrzec, że im większa jest masa ciała, tym większa musi być siła zmieniająca stan ruchu tego ciała lub tym dłużej musi działać siła o niewielkiej wartości. Na przykład trudniej zatrzymać jadący pociąg niż samochód – między innymi dlatego na przejazdach kolejowych są szlabany zatrzymujące samochody, a nie pociągi. Największe kontenerowce zbliżające się do portu w Gdańsku właśnie ze względu na swoją olbrzymią masę zaczynają zwalniać niedaleko Helu.

WARTO WIEDZIEĆ

Bezwładność ciał

Ciało porusza się tak długo, aż jakaś siła go nie zatrzyma. Widać to szczególnie dobrze podczas testów zderzeniowych. Podczas zderzenia ze ścianą na samochód działa siła pochodząca od ściany. Ale co z pasażerem? Początkowo pasażer porusza się dalej z prędkością początkową samochodu. Mogą go zatrzymać tylko siły pochodzące np. od pasów bezpieczeństwa, poduszek powietrznych czy siedzeń. Człowiek to skomplikowany układ różnych organów. Każdy z nich może być zatrzymany tylko przez oddziaływanie z innym organem, z którym bezpośrednio się styka. Jakie jest np. źródło siły zatrzymującej mózg człowieka w gwałtownie hamującym samochodzie? Mózg zatrzymuje się w wyniku oddziaływania z wewnętrzną stroną czaszki, którą zatrzymuje poduszka powietrzna amortyzująca uderzenie.

Podczas jazdy na rowerze, nartach czy też konno pamiętajmy o kaskach, które podobnie jak poduszka powietrzna w samochodzie chronią nasze głowy.



PRZYKŁAD 2.

Prostym odcinkiem szosy z prędkością 92 km/h jedzie motocykl o masie 150 kg. Suma sił oporów ruchu działających na ten motocykl wynosi 250 N. Ile wynosi siła napędzająca ten motocykl?

Zgodnie z I zasadą dynamiki pojazd porusza się ze stałą prędkością, gdy działające na niego siły się równoważą. W tym przypadku równoważą się siły napędu oraz oporu ruchu. Wynika stąd, że siła napędzająca ma wartość 250 N.

Inercjalne układy odniesienia

I zasada dynamiki nie jest spełniona we wszystkich układach odniesienia. Aby pasażer mógł pozostać nieruchomy w gwałtownie ruszającym lub hamującym autobusie, musi trzymać się poręczy. Wobec tego w układzie związanym z takim autobusem do pozostawania w spoczynku niezbędne jest działanie siły.

Układy inercjalne to układy, w których obowiązują zasady dynamiki.

Wszystkie układy odniesienia poruszające się ruchem jednostajnym prostoliniowym względem pewnego układu inercjalnego też są inercjalne.

Układ odniesienia związany z powierzchnią Ziemi jest z dużą dokładnością układem inercjalnym. Jadący po linii prostej ze stałą prędkością pociąg również stanowi taki układ. Wyobraźmy sobie, że w pociągu na stoliku stoi szklanka soku. Obok torów kolejowych znajduje się domek dróżnika, a w nim na stole – kubek z herbatą. Zachowanie się płynów w naczyniach znajdujących się w domku oraz w wagonie będzie identyczne. Co więcej, siedzący w pociągu pasażer będzie mógł twierdzić, że to on stoi w miejscu, a oddala się od niego domek dróżnika. Oczywiście mieszkaniec domku będzie twierdził, że jest odwrotnie. Ruch jest względny i w żadnym układzie odniesienia **nie można przeprowadzić doświadczenia rozstrzygającego, który z układów porusza się, a który spoczywa.**



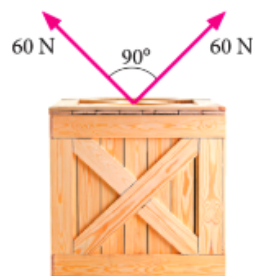
Ryc. 6.8. Sok w szklance zachowuje się tak samo, gdy wagon jest nieruchomy oraz gdy jedzie ze stałą prędkością po linii prostej

PODSUMOWANIE

- ▶ **Aby złożyć siły**, w końcu jednego wektora umieszczamy początek drugiego. Siła wypadkowa to wektor łączący początek pierwszego wektora z końcem drugiego.
- ▶ Jeśli siła wypadkowa działająca na ciało wynosi zero, mówimy, że **siły się równoważą**.
- ▶ **I zasada dynamiki**
Ciało zachowuje swój stan spoczynku lub ruchu jednostajnego po linii prostej, gdy wypadkowa sił działających na to ciało jest równa zero.
- ▶ **Układ inercjalny** to układ, w którym są spełnione zasady dynamiki.

PYTANIA I ZADANIA

1. Podczas jazdy ze stałą prędkością 85 km/h po poziomej drodze na samochód o masie 1500 kg działa siła napędzająca o wartości 1200 N. Jaka jest siła oporów ruchu działająca na ten pojazd? Uzasadnij odpowiedź.
2. Paweł trzyma siatkę wypełnioną zakupami. Masa siatki wynosi 4,5 kg. Naszkicuj opisaną sytuację i zaznacz siły działające na siatkę. Oblicz siłę, jaką Paweł działa na siatkę.
3. Kasia i Basia trzymają skrzynkę. Każda z nich działa na nią siłą wartości 60 N. Siły te są prostopadłe do siebie. Przerysuj szkic opisaną sytuację do zeszytu i zaznacz na nim siły działające na skrzynkę. Oblicz ciężar skrzynki.
4. Balon, na który działa siła wyporu powietrza o wartości 5600 N, opada ze stałą prędkością 0,5 m/s. Podczas tego ruchu na balon działa siła oporu powietrza o wartości 120 N.
Po wyrzuceniu części obciążenia balon wznosi się ze stałą prędkością 0,5 m/s. Podczas wznoszenia na balon działa siła oporu ruchu o takiej samej wartości jak podczas opadania.
 - a) Oblicz ciężar balonu podczas opadania.
 - b) Narysuj w zeszycie wznoszący się balon i zaznacz działające na niego siły ciężkości, wyporu oraz oporu ruchu. Oblicz ciężar balonu podczas lotu wznoszącego.
5. Wyjaśnij, na czym polega niebezpieczeństwo pozostawienia ciężkich przedmiotów na półce za tylnymi siedzeniami w samochodzie.



7. II zasada dynamiki

- Wektor przyspieszenia
- II zasada dynamiki

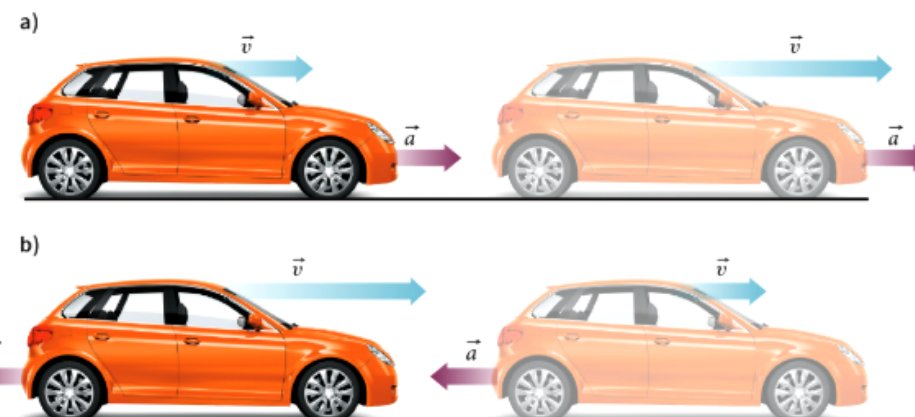


→ **Przypomnij sobie** wiadomości o ruchu zmiennym i o przyspieszeniu.

Do tej pory zajmowaliśmy się zagadnieniami, w których wypadkowa sił działających na ciało była równa zero. Teraz będziemy się zajmować sytuacjami, w których siła wypadkowa działająca na ciało jest różna od zera. Wyjaśnimy, co musi się stać, aby ciało mogło poruszać się ruchem zmiennym.

II zasada dynamiki

W rozdziale 2. wprowadziliśmy prędkość jako wielkość wektorową. Przyspieszenie określiliśmy jako zmianę prędkości zachodzącą w jednostce czasu. **Przyspieszenie też jest wielkością wektorową.** W ruchu prostoliniowym wektor przyspieszenia jest równoległy do wektora prędkości. Gdy prędkość rośnie, wektor przyspieszenia jest skierowany tak jak wektor prędkości (ryc. 7.1a). Gdy prędkość maleje, wektor przyspieszenia jest przeciwny do wektora prędkości (ryc. 7.1b).



Ryc. 7.1. Wektory prędkości i przyspieszenia. **a)** Samochód się rozpędza – wektor przyspieszenia jest skierowany tak samo jak wektor prędkości. **b)** Samochód hamuje – wektor przyspieszenia jest skierowany przeciwnie do wektora prędkości



Ryc. 7.2. Przyspieszenie ciężarówki pod działaniem siły mięśni człowieka jest bardzo małe

Ciało pozostaje nieruchome tak długo, aż jakaś siła nie spowoduje jego ruchu. Taki wniosek można wysnuć z I zasady dynamiki. **Tylko siła może nadać ciału przyspieszenie.** Jaki jest związek tych wielkości? Łatwo zauważyć, że do rozpędzenia ciała o dużej masie potrzeba większej siły niż do analogicznego rozpędzenia ciała o małej masie. Aby pociąg o masie kilkuset ton mógł ruszyć z przyspieszeniem, lokomotywa musi go ciągnąć wielką siłą.

Do ruchu rowerzysty z tym samym przyspieszeniem potrzebna jest o wiele mniejsza siła. Przyspieszenie osiągane przez ciężarówkę ciągniętą przez człowieka jest znikomo małe w porównaniu z ruchem pod wpływem siły pochodzącej z jej silnika (ryc. 7.2). Związek przyspieszenia z siłą opisuje sformułowana przez Izaaca Newtona II zasada dynamiki.

II zasada dynamiki

Przyspieszenie ciała jest wprost proporcjonalne do wypadkowej sił działających na to ciało, a odwrotnie proporcjonalne do jego masy:

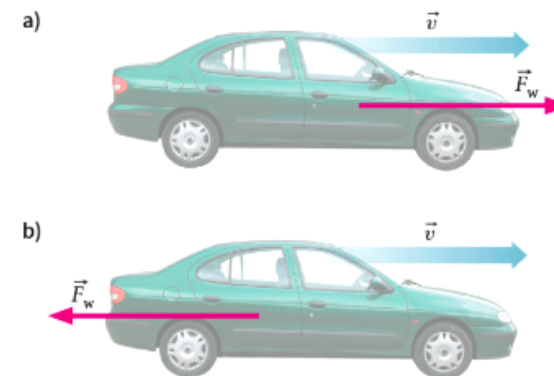
$$a = \frac{F_w}{m} \quad (1)$$

Przyspieszenie jest wektorem skierowanym tak samo jak siła wypadkowa.

Gdy siła wypadkowa i prędkość są skierowane tak samo, ruch ciała jest przyspieszony. Gdy siła wypadkowa jest skierowana przeciwnie do prędkości, ruch ciała jest opóźniony. Na podstawie II zasady dynamiki można zapisać:

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

Niuton (1 N) to wartość siły, która ciału o masie 1 kg nadaje przyspieszenie 1 m/s².



Ryc. 7.3. Wektory prędkości i sił. a) Rozpędzenie samochodu – wektor siły ma ten sam zwrot co wektor prędkości. b) Hamowanie samochodu – wektor siły ma zwrot przeciwny do wektora prędkości.

Ruch przyspieszony

Swobodne spadanie ciał to ruch przyspieszony spowodowany wyłącznie siłą ciężkości. W rozdziale 3. badaliśmy, jak spada smartfon z włączonym pomiarem przyspieszenia. Wyznaczone w ten sposób przyspieszenie ziemskie wynosiło ok. 10 m/s². Gdy zastosujemy II zasadę dynamiki do opisu tego ruchu, otrzymamy:

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

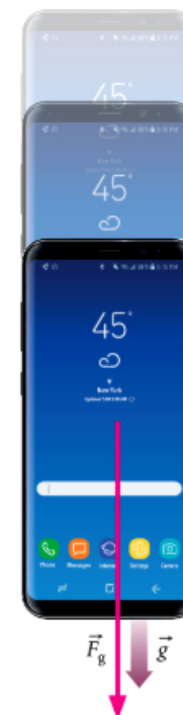
Ponieważ siła ciężkości jest równa:

$$F_g = m \cdot g$$

stąd przyspieszenie w tym ruchu wynosi:

$$a = \frac{m \cdot g}{m} = g$$

Wpływ masy na ruch można bardzo łatwo zauważyć podczas zakupów w supermarkecie. Gdy wózek na zakupy jest pusty, to zmiana jego prędkości nie wymaga od nas wysiłku. Gdy jest mocno obciążony, to jego rozpędzenie lub zahamowanie wymaga sporej siły (ryc. 7.5). Jednak nie tylko zmiana wartości prędkości wózka wymaga działania siły. Aby zmienić kierunek poruszania się wózka, również musimy działać na wózek pewną siłą.



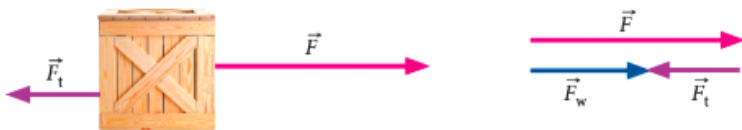
Ryc. 7.4. Ruch przyspieszony pod wpływem siły ciężkości



Ryc. 7.5. Aby rozpedzić wózek wypełniony zakupami, musimy działać na niego większą siłą niż na pusty wózek

PRZYKŁAD 1.

Drewniana, początkowo nieruchoma skrzynia o masie 240 kg jest ciągnięta siłą 860 N. Siła tarcia podczas przesuwania skrzyni ma wartość 640 N. Obliczmy przyspieszenie tej skrzyni oraz odległość, na jaką się ona przesunie w czasie 1,5 s.

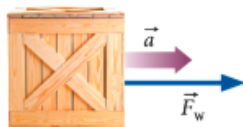


Wyznamy siłę wypadkową. Początek wektora siły tarcia $\vec{F}_t$ przenosimy na koniec wektora siły $\vec{F}$. Łączymy początek siły $\vec{F}$ z końcem siły $\vec{F}_t$ i otrzymujemy wektor siły wypadkowej $\vec{F}_w$. Siła wypadkowa wynosi:

$$F_w = F - F_t = 860 \text{ N} - 640 \text{ N} = 220 \text{ N}$$

Przyspieszenie pod wpływem siły wypadkowej obliczamy ze wzoru (1):

$$a = \frac{F_w}{m} = \frac{220 \text{ N}}{240 \text{ kg}} \approx 0,92 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



Aby obliczyć drogę przebytą przez skrzynię, wyznaczamy jej prędkość po czasie 1,5 s:

$$v = a \cdot t = 0,92 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1,5 \text{ s} \approx 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Drogę przebytą przez skrzynię obliczamy ze wzoru (1) podanego w rozdziale 4.

$$s = \frac{1}{2} v \cdot t = \frac{1}{2} \cdot 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,5 \text{ s} \approx 1,1 \text{ m}$$

Ruch opóźniony

Ryc. 7.6. Samochód porusza się ruchem opóźnionym – siła wypadkowa jest w tym przypadku skierowana przeciwnie do prędkości



Gdy siła wypadkowa jest skierowana przeciwnie do prędkości, ruch ciała jest opóźniony. Książka popchnięta na stole porusza się ruchem opóźnionym, bo hamuje ją siła tarcia skierowana przeciwnie do prędkości. Piłka podrzucona do góry porusza się ruchem opóźnionym, bo działa na nią siła ciężkości skierowana w dół. Na rycinie 7.6 przedstawiono jadący samochód, w którym nagle zgasł silnik. Porusza się on ruchem opóźnionym pod działaniem wypadkowej siły tarcia i oporu powietrza skierowanej przeciwnie do prędkości auta.

PRZYKŁAD 2.

Smartfon hamujący na poduszce porusza się z przyspieszeniem 70 m/s^2 (patrz rozdział 3.). Jego masa jest równa 170 g. Obliczmy siłę, jaką poduszka działała na smartfon podczas hamowania.

Podczas hamowania na smartfon działają dwie siły: ciężar $\vec{F}_g$ oraz siła pochodząca od poduszki $\vec{F}_p$. Gdy złożymy te siły, otrzymamy siłę wypadkową $\vec{F}_w$.

Z II zasady dynamiki wiemy, że:

$$F_w = m \cdot a$$

Podstawiamy dane do tego wzoru:

$$F_w = 0,17 \text{ kg} \cdot 70 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 11,9 \text{ N}$$

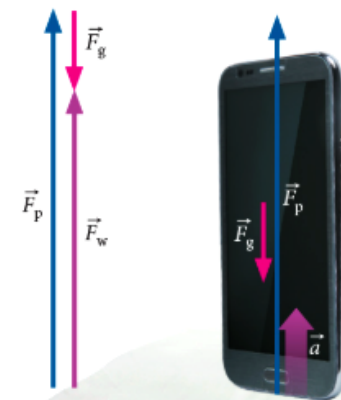
Ciężar smartfona jest równy:

$$F_g = m \cdot g = 0,17 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 1,7 \text{ N}$$

Z wektorowego składania sił wynika, że wartość siły, jaką poduszka działała na smartfon, była równa:

$$F_p = F_w + F_g = 11,9 \text{ N} + 1,7 \text{ N} \approx 14 \text{ N}$$

Oznacza to, że siła hamująca smartfon była ok. 8 razy większa od jego ciężaru. Przypominamy, że lądował on na miękkiej poduszce. Gdy taki sprzęt uderza o twarde podłoże, siły hamujące mają wielokrotnie większe wartości.



Środek masy

Każde ciało lub układ ciał ma swój **środek masy** (nazywany też środkiem ciężkości). Jednorodne symetryczne ciała mają go w środku symetrii. W układzie dwóch ciał środek masy jest zawsze między nimi, ale bliżej ciała cięższego, i może znajdować się w pustej przestrzeni.

W celu znalezienia położenia środka masy, np. linijki z przyklejonym kawałkiem plasteliny, można położyć linijkę na palcach wskazujących, a następnie zbliżać palce do siebie (ryc. 7.7). Szukamy takiego punktu, w którym podparta linijka nie będzie przechylała się w żadną stronę. W podobny sposób można wyznaczyć położenie środka masy innych niesymetrycznych przedmiotów. Położenie środka masy ma znaczenie przy zachowaniu równowagi i stabilności. Ciało jest stabilne, gdy jest podparte właśnie pod środkiem masy lub gdy punkt zawieszenia jest dokładnie nad środkiem masy.

II zasada dynamiki opisuje właśnie przyspieszenie środka masy. W rozważaniach dotyczących ruchu i sił stosujemy przybliżenie, zgodnie z którym całą masę ciała skupiamy w środku masy. Możemy stosować to przybliżenie, ponieważ podczas ruchu małych, nieobracających się ciał wszystkie ich punkty wykonują ten sam ruch. W przypadku układów skomplikowanych i obracających się jest inaczej. Gdy podrzucimy do góry małą kulkę, to widzimy, że porusza się po linii prostej ruchem najpierw opóźnionym, a potem przyspieszonym. Gdy podrzucimy np. łyżkę, to jej ruch będzie dość złożony. Jednak jeden punkt łyżki – jej środek masy – będzie się poruszać tak jak kulka.



Ryc. 7.7. Doświadczalne wyznaczanie środka masy układu ciał

WARTO WIEDZIEĆ

Równowaga na linie



Nad Brdą w Bydgoszczy znajduje się figura *Przechodzącego przez rzekę* zawieszona na cienkiej linie. Środek masy tej figury znajduje się poniżej punktu podparcia na linie i dlatego układ jest stabilny. To tylko figura, ale nad Brdą zawieszona jest również linia, po której chodzą ludzie. Gdy człowiek stoi wyprostowany, jego środek masy znajduje się w okolicach pępka. Człowiek może stać stabilnie nie tylko w postawie wyprostowanej. Może się pochylać do przodu, przechylać się na boki itp., ale zawsze jego środek masy musi znajdować się ponad punktem podparcia. Linoskoczek czasem dziwnie balansuje podczas spaceru na linie. Po prostu stara się utrzymać swój środek ciężkości dokładnie nad liną, gdyż w przeciwnym wypadku para sił – nacisku liny na stopę i ciężkości przyłożona w środku masy – spowoduje jego nieuchronny obrót.

PODSUMOWANIE

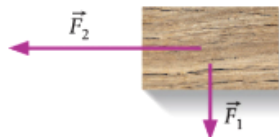
► **II zasada dynamiki:** przyspieszenie ciała jest wprost proporcjonalne do wypadkowej sił działających na to ciało, a odwrotnie proporcjonalne do jego masy:

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

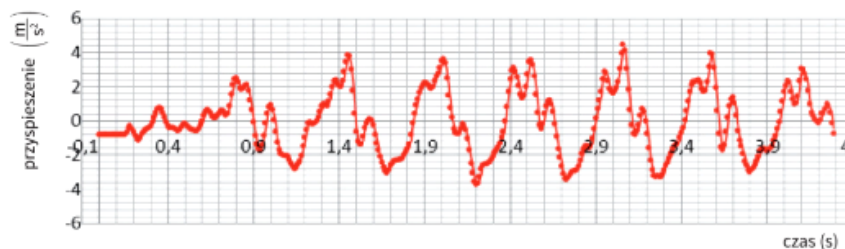
Przyspieszenie jest wektorem skierowanym tak samo jak siła wypadkowa.

PYTANIA I ZADANIA

1. Na klocek o masie 0,24 kg działają dwie siły o wartościach odpowiednio 3,0 N oraz 7,5 N. Przerysuj schematyczny rysunek do zeszytu i zaznacz na nim wektor siły wypadkowej. Oblicz wartość tej siły oraz przyspieszenie klocka.



2. Samolot Boeing 747 o masie 400 ton zaczyna się wznosić, gdy osiąga prędkość 300 km/h. Droga, na której się rozpędza, ma długość 3 km. Załóż, że podczas startu samolot porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym. Oblicz siłę wypadkową rozpędzającą samolot.
3. Barka o całkowitej masie 650 ton płynie z prędkością 11 km/h. Maksymalna siła hamująca barkę jest równa 0,005 jej ciężaru. Oblicz najkrótszy czas, w jakim można zatrzymać tę barkę.
4. Za pomocą aplikacji Phyphox zmierzono przyspieszenie chwilowe w kierunku pionowym podczas marszu człowieka ważącego 92 kg. Zakładamy, że ruch smartfona jest równoważny ruchowi środka ciała człowieka. Dodatnie wartości przyspieszenia oznaczają, że było ono skierowane w górę, a ujemne – w dół.



Skorzystaj z wykresu i podaj wartość maksymalnego przyspieszenia skierowanego w górę z dokładnością do jednej cyfry znaczącej oraz oblicz maksymalną siłę nacisku podłoża na stopy człowieka podczas marszu. Przyjmij, że przyspieszenie ziemskie ma wartość $9,8 \text{ m/s}^2$.

5. Przyspieszenie ciała jest skierowane pionowo w górę. Narysuj przykładowe trzy nierównoległe siły działające na to ciało, które nadają mu takie przyspieszenie.

8. Opory ruchu

- Opór ośrodka
- Tarcie kinetyczne
- Tarcie statyczne



→ Przypomnij sobie wiadomości o oporach ruchu.

Nie sposób wskazać wokół nas ciała, które nie styka się z innym. Nawet jeżeli dane ciało nie oddziałuje z podłożem, to i tak styka się z powietrzem lub wodą. Zwykle oddziaływania z tego wynikające utrudniają poruszanie się ciał, ale czasem są niezbędne do tego, by wprowadzić ciało w ruch. Powszechność występowania **sił oporu** ośrodka i tarcia powoduje, że jesteśmy przyzwyczajeni do nich jak do powietrza i trudno nam sobie wyobrazić świat, w którym tych sił by nie było.

Opór ośrodka

Ośrodkiem nazywamy substancję, która otacza interesujące nas obiekty. Najczęściej jest to powietrze lub woda. Poruszające się w ośrodku ciało musi „pchać” cząsteczki tego ośrodka, zatem działa na nie pewną siłą, skierowaną tak jak prędkość ciała. Zgodnie z III zasadą dynamiki ośrodek działa na ciało siłą skierowaną przeciwnie do jego prędkości. Ta siła oporu jest większa w przypadku wody niż w przypadku powietrza, ale jej charakter w obu ośrodkach jest taki sam.

Siła oporu ośrodka zależy od wielu czynników. Jest tym większa, im większe jest ciało, ale ważna jest przede wszystkim powierzchnia ciała prostopadła do kierunku



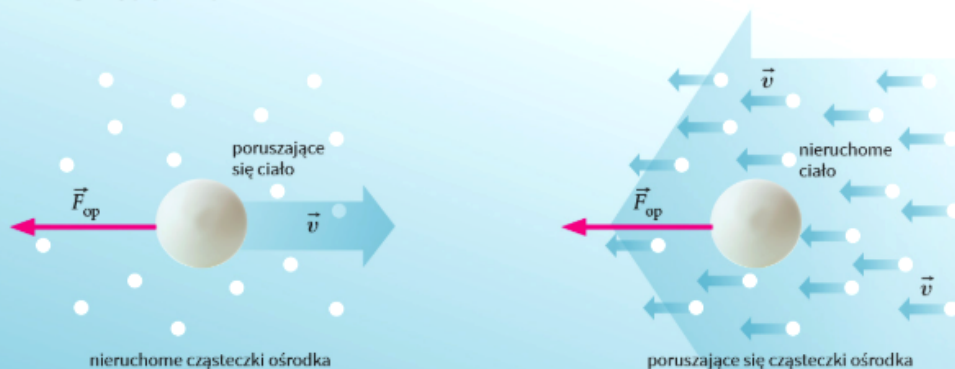
Ryc. 8.1. Prędkość jest względna, można więc poczuć siłę oporu powietrza podczas wiejącego wiatru



Ryc. 8.2. Ryby, szczególnie te, które aktywnie polują, mają kształt opływowy. Pokonanie oporu wody podczas ruchu wymaga wówczas mniejszej siły



Ryc. 8.3. Gdy samochód jedzie, to powietrze musi go w jakiś sposób ominąć. W tunelu aerodynamicznym służącym do badań przepływu powietrza wokół poruszającego się samochodu to powietrze się porusza. Znaczenie ma ruch względny pojazdu i powietrza



Ryc. 8.4. Siła oporu ośrodka działa wzdłuż kierunku ruchu ośrodka względem interesującego nas ciała

ruchu. **Siła oporu rośnie wraz z prędkością ciała względem ośrodka**, ale na ogół nie jest to zależność wprost proporcjonalna. Bardzo ważnym czynnikiem jest kształt ciała, którego nie da się łatwo ująć liczbowo. Jeżeli pozwala on ośrodkowi opłynąć ciało w sposób łagodny, to taki kształt nazwiemy opływowym (ryc. 8.2).

Siła oporu dla ciał opływowych jest dużo mniejsza niż dla obiektów w kształcie „nagarniającym” ośrodek, takich jak spadochrony.

Ruch jest względny, zatem taka sama siła oporu działa w sytuacji, gdy ciało spoczywa, a porusza się ośrodek. Z fizycznego punktu widzenia ważna jest tylko prędkość względna ciała i ośrodka (ryc. 8.3 i 8.4).

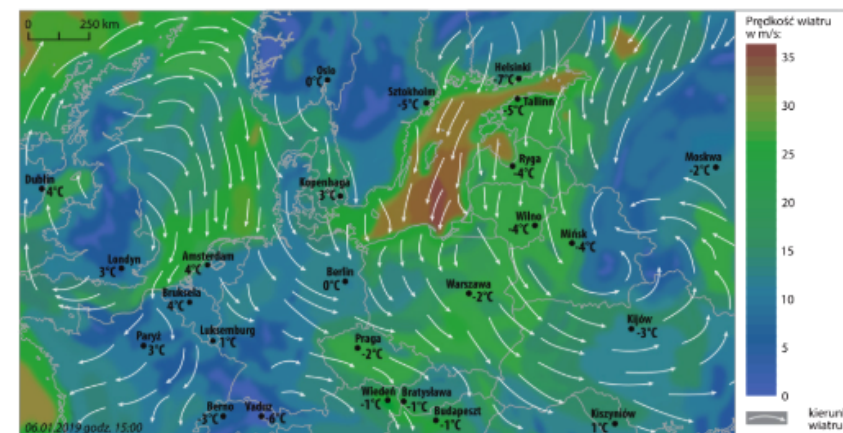
Siła oporu kojarzy nam się z utrudnianiem ruchu ciał. Jednak siła, z jaką cząsteczki ośrodka działają na ciało, może również być przyczyną ruchu. Gdy ciało jest nieruchome, cząsteczki ośrodka zderzające się z ciałem popychają je, czyli działają na nie siłą. Siła ta jest tym większa, im większa jest prędkość ośrodka.

Wobec tego siła pochodząca od ośrodka może wprawić w ruch ciała. Ludzie od stuleci wykorzystywali wiatr do napędzania łodzi za pomocą żagla, nurt rzeki napędzał koła młynów wodnych i tartaków (ryc. 8.5).

Gdy mówimy o sile oporu, najczęściej mamy na myśli siłę, którą ośrodek działa na poruszające się ciała. Jednak zgodnie z III zasadą dynamiki ciało i ośrodek wzajemnie „przeszkadzają sobie” we względnym ruchu. Wobec tego również ciała działają siłą na ośrodek, przez co wpływają na jego ruch. Na przykład krople deszczu spadające wewnątrz chmury burzowej porywają ze sobą powietrze i rozpędzają je do dużych prędkości. To powoduje powstawanie silnych szkwałów burzowych tuż przed ulewą. W wyniku oddziaływania drzew i innych obiektów znajdujących się na ziemi na poruszające się powietrze prędkość wiatru wyraźnie maleje, gdy znad powierzchni morza przesuwa się on nad ląd (ryc. 8.6).

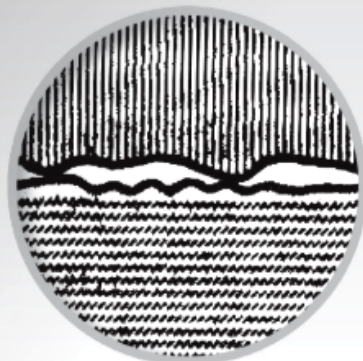


Ryc. 8.5. Poruszające się powietrze lub woda od wieków służyły ludziom jako źródło napędu. Wiatr zapewnił jachtom siłę napędową w szerokim zakresie kierunków, zależnie od ustawienia żagli



Ryc. 8.6. Mapa prędkości wiatru przy powierzchni Ziemi. Można zobaczyć zarys Morza Bałtyckiego, gdyż nad otwartym morzem prędkość wiatru jest większa niż nad lądem

Tarcie



Ryc. 8.7. Mikroskopowy obraz stykających się powierzchni. Podczas ich względnego ruchu nierówności zahaczają o siebie i utrudniają przesuwanie

O **tarcu** mówimy, gdy próbujemy przesunąć jedno ciało stałe względem innego. Wtedy mikroskopijne nierówności powierzchni zahaczają o siebie i utrudniają przesuwanie (ryc. 8.7). Bywa również, że gładkie powierzchnie „niechętnie” przesuwają się względem siebie, np. szkło i guma. Za to zjawisko są odpowiedzialne oddziaływania między cząsteczkami obu ciał, a im gładsza powierzchnia, tym więcej cząsteczek znajduje się blisko siebie.

Tarcie kinetyczne



Ryc. 8.8. W grze Air Hockey krążek porusza się praktycznie bez tarcia, bo nie styka się z podłożem. Przez liczne dziurki w blacie wydmuchiwane jest powietrze unoszące krążek

Pchnięty po stole zeszyt porusza się ruchem opóźnionym, bo działa na niego siła tarcia skierowana przeciwnie do jego prędkości. Gdy zeszyt się zatrzyma, siła tarcia przestaje działać. Ten rodzaj tarcia nazywamy **kinetycznym**. To zwykle dzięki niemu wcześniej poruszające się ciała mogą się zatrzymać.

Siła tarcia jest tym większa, im większa jest siła nacisku, z jaką dane ciało działa na powierzchnię styku. Zależy również od rodzaju i stopnia wygładzenia stykających się powierzchni. Łatwiej jest przesunąć drewniany klocek po gładkim stalowym stole niż po betonie. Jednak siła tarcia nie zależy od wielkości powierzchni styku. Dla większości materiałów, z którymi mamy do czynienia na co dzień, siła tarcia nie przekracza połowy siły nacisku ciała na podłoże.

Tarcie statyczne

Czy na ciała będące w spoczynku też może działać siła tarcia? Tak, i właśnie dlatego wcale nie jest łatwo ruszyć z miejsca szafę stojącą na podłodze. Gdy nikt szafy nie rusza, nie działa na nią żadna siła tarcia. Pojawia się ona dopiero wtedy, gdy próbujemy pchnąć szafę pewną siłą (ryc. 8.9). Gdy ciało nie przesuwa się po powierzchni styku, mówimy o **tarcu statycznym**.

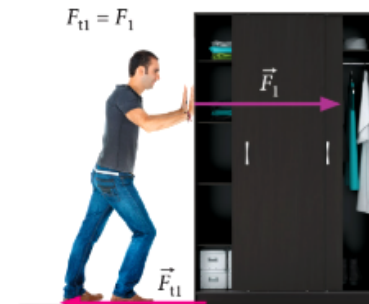
Siła tarcia statycznego działa na ciało, na które działa także siła próbująca wprowadzić to ciało w ruch. Wtedy siła tarcia statycznego równoważy tę siłę, dzięki czemu ciało pozostaje w spoczynku. Obie siły mają zawsze te same wartości, o ile ciało pozostaje w spoczynku.

Siła tarcia statycznego nie może być dowolnie duża. Jej maksymalna wartość zależy od rodzaju powierzchni oraz jest wprost proporcjonalna do siły nacisku. Gdy siła zewnętrzna przekroczy maksymalną wartość tarcia statycznego, ciało zaczyna się poruszać ruchem przyspieszonym, a podczas ruchu występuje już tarcie kinetyczne. Każdy, kto próbował przesunąć szafę, wie, że trudniej ruszyć ją z miejsca, niż dalej przesuwać. Maksymalna wartość siły tarcia statycznego jest większa od wartości siły tarcia kinetycznego.

$$F_t = 0$$



$$F_{t1} = F_1$$



$$F_{t2} = F_1 + F_2$$



Ryc. 8.9. Siła tarcia statycznego równoważy siłę, która „chce” wprowadzić dane ciało w ruch. Jeżeli taka siła nie działa, nie ma tarcia

WARTO WIEDZIEĆ

Współczynnik tarcia

Wartości siły tarcia kinetycznego i siły nacisku są do siebie wprost proporcjonalne. Zapisujemy to wzorem:

$$F_t = fF_n$$

gdzie:

F_t – siła tarcia kinetycznego,

F_n – siła nacisku,

f – współczynnik tarcia kinetycznego.

Współczynnik tarcia f zależy od materiału, z jakiego wykonane są powierzchnie stykających się ciał. Najczęściej jego wartość mieści się w granicach od 0,1 do 0,4, ale gdy jedna z powierzchni jest oblodzona, to współczynnik tarcia może być nawet dziesięciokrotnie mniejszy. Różnego typu zanieczyszczenia zmniejszają jego wartość.

Opony samochodów wyścigowych (na fotografii) robi się ze specjalnej mieszanki, dla której współczynnik tarcia jest większy od 1, ale tylko wtedy, gdy opona i podłoże są czyste i suche. Taki sam wzór jak wyżej obowiązuje dla maksymalnej siły tarcia statycznego. Współczynnik tarcia statycznego jest większy od współczynnika tarcia kinetycznego.



DOŚWIADCZENIE 1.

Do wykonania doświadczenia potrzebujesz siłomierza (np. z doświadczenia 1. w rozdziale 5.). Przymocuj do siłomierza dowolny przedmiot. Połóż przedmiot na stole i ciągnij za siłomierz. Powoli zwiększaj siłę. Gdy przedmiot zacznie się poruszać, nie przerywaj od razu doświadczenia. Obserwuj wskazania siłomierza. Czy podczas wykonywania pomiarów siłomierz wskazywał cały czas coraz większą siłę? Czy ze wskazań siłomierza możemy wyznaczyć siły tarcia statycznego i kinetycznego?

Położ na badanym przedmiocie jakieś inne ciało. W ten sposób zwiększysz siłę nacisku przedmiotu na podłoże, ale nie rodzaj powierzchni styku. Powtórz opisane wyżej czynności. Czy wskazania siłomierza (i siła tarcia) są takie same?



Pomiar siły usiłującej wprawić smartfon w ruch

PRZYKŁAD 1.

Przeanalizujmy siły działające w momencie, gdy zaczynamy iść. Spójrzmy na tułów i stopę stykającą się z podłożem jako na dwa odrębne obiekty, które mogą wzajemnie na siebie działać.



Siły działające na stopę i tułów człowieka odpychające się od podłoża

Podczas kroku do przodu nasz tułów (za pośrednictwem mięśni nogi) działa na stopę siłą $\vec{F}$ skierowaną do tyłu. Zgodnie z III zasadą dynamiki stopa działa na tułów siłą skierowaną przeciwnie, czyli do przodu (dla uproszczenia rozważamy tylko siły działające poziomo). Dzięki temu, że na stopę stykającą się z podłożem działa siła tarcia statycznego $\vec{F}_t$ o tej samej wartości, stopa pozostaje w spoczynku względem podłoża, a tułów przesuwa się do przodu. Wszystkie siły zaznaczone na ilustracji mają te same wartości, więc o przyspieszeniu decyduje siła tarcia statycznego. Możemy ruszać powoli i wtedy wprawiając nas w ruch siła tarcia jest mała. Jeżeli chcemy zerwać się do biegu, siła tarcia musi być odpowiednio duża. Jeżeli siła $\vec{F}$ przekroczy maksymalną siłę tarcia statycznego, noga ucieknie do tyłu i... mamy poślizg!

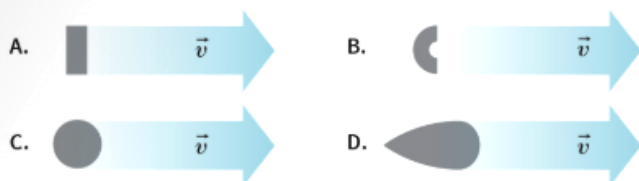
s. 211 Na stronie 211 znajduje się scenariusz doświadczenia 3., w którym badamy, w jaki sposób siła tarcia zależy od siły nacisku. Siła tarcia statycznego jest niezbędna do poruszania się zarówno nas samych, jak i wszelkiego typu pojazdów. To ona pozwala nam ruszyć z miejsca i wyznacza kierunek ruchu.

PODSUMOWANIE

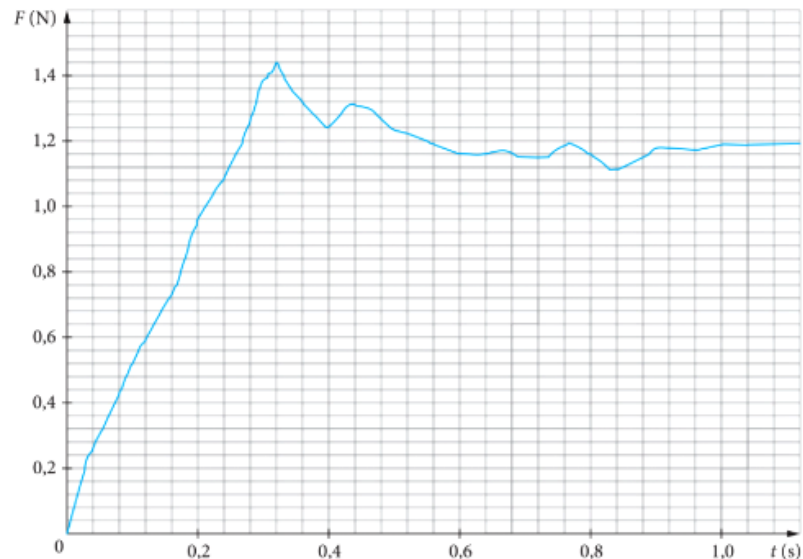
- ▶ **Siła oporu ośrodka** działa na ciało poruszające się względem tego ośrodka i jest skierowana przeciwnie do prędkości ciała względem ośrodka.
- ▶ Na ciała przesuujące się po pewnej powierzchni działa **siła tarcia kinetycznego**, skierowana przeciwnie do prędkości, niezależna od prędkości i pola powierzchni styku.
- ▶ **Siła tarcia statycznego** równoważy siłę równoległą do powierzchni i próbującą poruszyć ciało będące w spoczynku.

PYTANIA I ZADANIA

- Opisz jedną z codziennych czynności, której nie dałoby się wykonać bez siły tarcia. Wyjaśnij dlaczego.
- Na rysunkach przedstawiono ciała w różnych kształtach, które poruszają się z jednakową prędkością. Dla których z nich siła oporu powietrza podczas ruchu będzie największa, a dla których najmniejsza?



- Na pochyłej desce leży nieruchomo cegła. Wyjaśnij, w którą stronę działa na nią siła tarcia.
- Do drewnianego klocka przyczepiono siłomierz cyfrowy, za pomocą którego powoli pociągnięto klocek, by wprowadzić go w ruch. Na wykresie przedstawiono zależność wskazań siłomierza od czasu.



Odczytaj z wykresu:

- maksymalną wartość siły tarcia statycznego,
 - moment, w którym klocek zaczął się poruszać,
 - średnią wartość siły tarcia kinetycznego.
- Miedzy dwiema pionowymi ścianami można utrzymać się dzięki naciskaniu na nie plecami i nogami.
 - Przerysuj schematycznie sytuację do zeszytu. Na rysunku przedstaw siły działające na osobę na zdjęciu, oznacz je i podaj ich nazwy.
 - Zapisz warunek, jaki spełniają siły działające na osobę.
 - Jakie zmieniają się siły, gdy mężczyzna będzie się mocniej zapierał o ściany?



9. Spadanie ciał

- Wpływ powietrza na spadanie ciał
- Spadanie ciał z dużej wysokości
- Prędkość graniczna

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o zjawisku swobodnego spadania ciał.

Spadanie ciał jest tak powszechne i naturalne, że już od starożytności próbowano znaleźć prawidłowości rządzące tym zjawiskiem. Problem wcale nie jest łatwy, bo różnorodność ciał jest ogromna, a nie wszystkie spadają tak samo. W XVII wieku Galileusz na podstawie licznych i powtarzalnych doświadczeń z upuszczaniem różnych ciężkich przedmiotów dowodził, że przyspieszenie, z jakim spadają, jest jednakowe. Dzięki odkryciom Newtona znamy obecnie przyczynę spadania ciał i potrafimy wyjaśnić odstępstwa od tezy Galileusza, które na co dzień obserwujemy.

Swobodne spadanie ciał

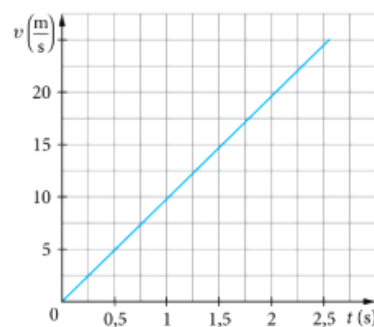
Wszystkie ciała spadają, bo przyciąga je Ziemia. Na każde ciało działa siła ciężkości skierowana pionowo w dół, której wartość jest wprost proporcjonalna do masy ciała:

$$F_g = mg$$

Jeśli ruch ciała odbywa się wyłącznie pod wpływem siły ciężkości, to mówimy, że ciało spada swobodnie. Pod działaniem tej siły upuszczone ciało spada ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem g wynikającym z II zasady dynamiki:

$$a = \frac{F_g}{m} = \frac{mg}{m} = g$$

To przyspieszenie jest jednakowe dla wszystkich ciał (jak to odkrył Galileusz), ma wartość ok. $9,8 \text{ m/s}^2$ i nazywane jest **przyspieszeniem ziemskim**.



Ryc. 9.1. Wykres zależności prędkości od czasu dla ciał spadających swobodnie. Wszystkie ciała pod działaniem siły ciężkości spadają ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem g

Wiemy z poprzedniego rozdziału, że na spadające ciało działa siła oporu powietrza. Gdy ciężar ciała jest o wiele większy od siły oporu, można uznać, że ciało spada swobodnie. W próżni wszystkie ciała spadają tak samo (ryc. 9.2).



Ryc. 9.2. Na Księżycu nie ma powietrza; młotek (z lewej) i piórko (z prawej) upuszczone przez astronautę spadają tak samo. Film z przeprowadzonego doświadczenia znajdziesz pod adresem <https://www.youtube.com/watch?v=5kY5AKWn0sI>

PRZYKŁAD 1.

Obliczmy, z jaką prędkością uderzy o ziemię ciało upuszczone z czwartego piętra, czyli z wysokości około 15 m. Pomijamy opór powietrza.

Korzystamy ze wzoru (2) z rozdziału 4.

$$v^2 = 2as$$

Po wyciągnięciu pierwiastka i podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$v = \sqrt{2as} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 15 \text{ m}} \approx 17,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Prędkość jest dość duża. Dla porównania obliczmy drogę, jaką musi przejechać przeciętny samochód osobowy, aby rozpędzić się do takiej prędkości. Przyspieszenie samochodu wynosi ok. 3 m/s^2 , więc po przekształceniu tego samego wzoru, z którego korzystaliśmy, uzyskujemy:

$$s = \frac{v^2}{2a} = \frac{\left(17,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 48,7 \text{ m}$$

Dynamicznie ruszający samochód musi pokonać ponad 3 razy większą drogę, aby uzyskać tę samą prędkość co spadające ciało. Przyspieszenie ziemskie jest naprawdę duże.

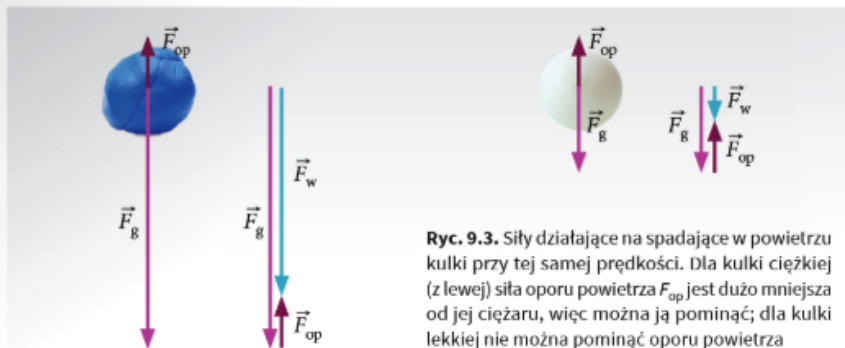
Spadanie ciał w powietrzu

Powietrze ma wpływ na spadanie ciał, gdy ciała mają stosunkowo dużą powierzchnię czy objętość przy niewielkiej masie lub gdy poruszają się z dużymi prędkościami.

DOŚWIADCZENIE 1.

Weź do jednej ręki zeszyt, a do drugiej kartkę nieco mniejszą od zeszytu. Ustaw oba przedmioty poziomo na tej samej wysokości, a następnie jednocześnie upuść. Zaobserwuj ruch zeszytu i kartki i wyjaśnij różnice w spadaniu obu ciał. Następnie połóż kartkę na zeszycie i znów upuść. Wyjaśnij odmienny wynik doświadczenia.

Weźmy dwie tej samej wielkości kulki o różnych masach, np. piłeczkę pingpongową i kulkę z plasteliny. Gdy upuścimy je równocześnie, obie zaczną spadać z przyspieszeniem ziemskim g , ale od razu pojawi się siła oporu powietrza F_{op} (ryc. 9.3).



Ryc. 9.3. Siły działające na spadające w powietrzu kulki przy tej samej prędkości. Dla kulki ciężkiej (z lewej) siła oporu powietrza F_{op} jest dużo mniejsza od jej ciężaru, więc można ją pominąć; dla kulki lekkiej nie można pominąć oporu powietrza

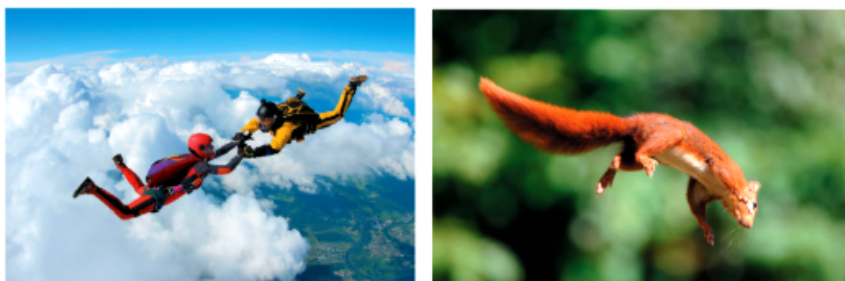
Kulki mają te same rozmiary, więc początkowo siła oporu będzie prawie taka sama dla każdej z nich. Zgodnie z II zasadą dynamiki przyspieszenie kulek będzie zależało od wypadkowej obu sił – siły ciężkości i siły oporu:

$$a = \frac{mg - F_{op}}{m} = g - \frac{F_{op}}{m}$$

Przy tej samej sile oporu przyspieszenie kulki o dużej masie jest bliskie g . Dla kulki lekkiej przyspieszenie będzie mniejsze, kulka będzie się wolniej rozpędzać i na ziemię spadnie jako druga.

Spadanie ciał z dużej wysokości

Krople deszczu spadają ruchem jednostajnym, człowiek z otwartym spadochronem też porusza się ruchem jednostajnym. Prędkość wszystkich spadających ciał po pewnym czasie przestaje rosnąć (ryc. 9.4). Przyczyną jest opór powietrza. Siła oporu powietrza zależy od kształtu ciała oraz pola jego przekroju poprzecznego i rośnie wraz z prędkością.



Ryc. 9.4. Skoczkowie spadochronowi zazwyczaj mają dość dużo czasu, zanim muszą otworzyć spadochron, aby bezpiecznie wylądować. Wiewiórka nie potrzebuje spadochronu

WARTO WIEDZIEĆ

Lot w tunelu aerodynamicznym

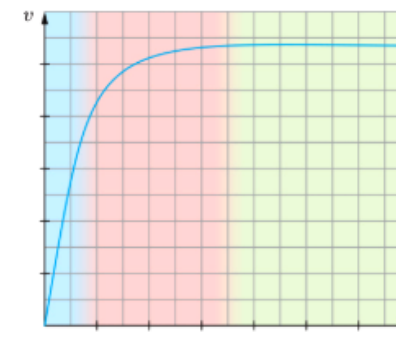
Amatorzy mocnych wrażeń mogą skorzystać z ciekawej propozycji – lotu w tunelu aerodynamicznym. Taki aerotunel to przezroczysta rura o średnicy kilku metrów, w której powietrze jest wprawiane w ruch za pomocą potężnych wentylatorów. Ochotnik kładzie się na brzuchu na kracie umieszczonej w podłodze, a po chwili wentylatory zaczynają pompować w górę powietrze z prędkością dochodzącą czasem do 300 km/h. Pędzące powietrze unosi śmiatka do góry na kilka minut.

Z fizycznego punktu widzenia nie ma znaczenia, czy to człowiek spada w powietrzu, czy powietrze pędzące w górę unosi człowieka. Ważna jest prędkość względna powietrza i człowieka, dzięki której ciężar człowieka zrównoważony jest siłą oporu powietrza.

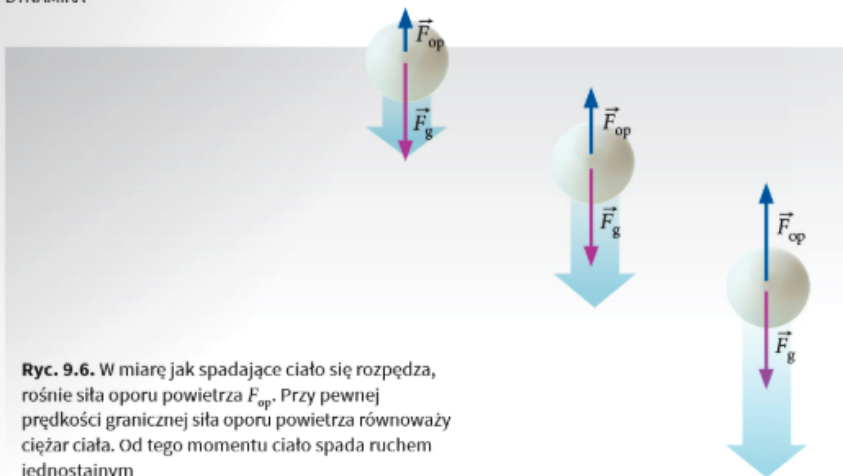


Na wykresie na ryc. 9.5 przedstawiono zależność prędkości od czasu dla ciała spadającego z dużej wysokości.

Podczas analizy wykresu widzimy, że ruch ciała można podzielić na trzy etapy. Na początku prędkość rośnie wprost proporcjonalnie do czasu, więc możemy uznać, że ciało spada swobodnie z przyspieszeniem ziemskim. Siła oporu powietrza jest pomijalnie mała w porównaniu z ciężarem ciała. Potem obserwujemy dalszy, wolniejszy wzrost prędkości. Na tym etapie nie można już pominąć siły oporu powietrza, siła wypadkowa działająca na spadające ciało jest mniejsza od ciężaru ciała – oznacza to, że przyspieszenie jest mniejsze. Pod koniec tego etapu ruchu rosnąca wraz z prędkością siła oporu staje się porównywalna z ciężarem ciała (ryc. 9.6). Na ostatnim etapie trwania ruchu nie widzimy już wzrostu prędkości, ciało spada ruchem jednostajnym z tzw. **prędkością graniczną**, gdyż siła oporu powietrza równoważy ciężar ciała.

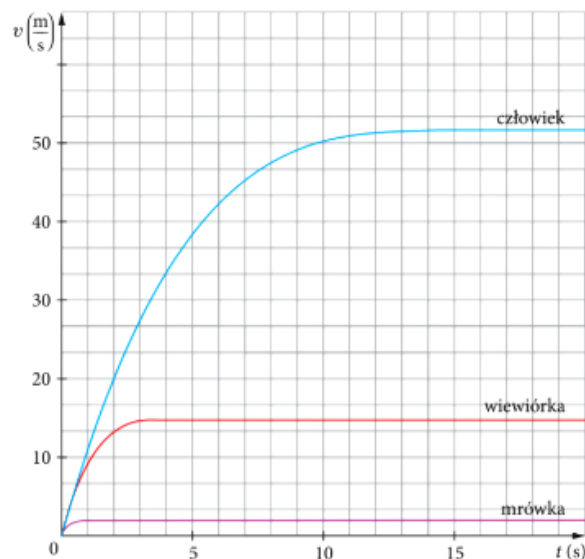


Ryc. 9.5. Zależność prędkości od czasu dla ciała spadającego w powietrzu. Od pewnego momentu prędkość przestaje rosnąć, ciało spada ruchem jednostajnym



Ryc. 9.6. W miarę jak spadające ciało się rozpędza, rośnie siła oporu powietrza F_{op} . Przy pewnej prędkości granicznej siła oporu powietrza równoważy ciężar ciała. Od tego momentu ciało spada ruchem jednostajnym

Łączny czas trwania dwóch pierwszych etapów zależy od masy i rozmiarów ciała, ale zwykle nie przekracza kilku sekund, a dla ciał lekkich o dużej powierzchni nawet ułamków sekund. Na wykresach poniżej (ryc. 9.7) przedstawiono wyniki obliczeń komputerowych zależności prędkości od czasu dla spadającego człowieka (bez spadochronu), wiewiórki i mrówki.



Ryc. 9.7. Zależność prędkości od czasu dla człowieka, wiewiórki i mrówki spadających w powietrzu z dużej wysokości

Spadający człowiek osiąga prędkość graniczną po kilkunastu sekundach. W tym czasie pokonuje niecałe 500 m. Wobec tego skoczek spadochronowy skaczący z wysokości 3000 m przez większość czasu porusza się ruchem jednostajnym. Najpierw bez spadochronu z prędkością ok. 50 m/s, a po otwarciu spadochronu znacznie wolniej, ale również ruchem jednostajnym.

Prędkość graniczna dla wiewiórki wynosi ok. 14 m/s. Taką prędkość uzyskują ciała spadające z wysokości 10 m. Dla wiewiórek, które są przystosowane do skakania po drzewach, skok z takiej wysokości nie stanowi żadnego problemu. Nie ma zatem znaczenia, czy wiewiórka skacze z 10, 20, czy 100 m. Upadek nawet z wysokiego drzewa na ogół nie jest dla niej niebezpieczny.

Prędkość graniczna dla mrówki wynosi zaledwie 2 m/s, więc upadek z dowolnej wysokości niczym jej nie grozi. Nawet ludziom nie zagraża lądowanie z prędkością 2 m/s. Taką prędkość uzyskujemy, gdy zeskakujemy ze jednego stopnia schodów.

PODSUMOWANIE

- ▶ Jeśli pominiemy opór powietrza, możemy stwierdzić, że wszystkie ciała spadają z tym samym przyspieszeniem pod wpływem siły ciężkości. To zjawisko nazywamy **spadaniem swobodnym**.
- ▶ Przyspieszenie, z jakim odbywa się swobodne spadanie ciał na Ziemi, nazywamy **przyspieszeniem ziemskim**.
- ▶ Wskutek oporu powietrza prędkość spadającego ciała po pewnym czasie przestaje rosnąć i ciało porusza się ruchem jednostajnym.

PYTANIA I ZADANIA

1. Skoczek spadochronowy, zanim otworzy spadochron, może w pewnym zakresie zwiększać lub zmniejszać swoją prędkość. W jaki sposób? A czy po otwarciu spadochronu również może to robić? Uzasadnij odpowiedź.
2. Staszek upuścił kamień do studni. Kamień wpadł do wody po 1,8 s. Oblicz głębokość studni.
3. Przyspieszenie spadku swobodnego na Księżycu wynosi $1,6 \text{ m/s}^2$. Skorzystaj ze zdjęcia zamieszczonego w rozdziale i oszacuj, jak długo spadał młotek upuszczony przez astronautę. Czy piórko spadało dłużej, czy krócej? Uzasadnij odpowiedź.
4. Spadający z dużej wysokości odłamek skalny o masie 12 g w pewnej chwili uzyskuje przyspieszenie $4,5 \text{ m/s}^2$. Oblicz wartość siły oporu w tym momencie. Przyjmij, że przyspieszenie ziemskie jest równe $9,8 \text{ m/s}^2$.
5. Z dużej wysokości spadają piłka tenisowa oraz stalowa kulka o podobnych rozmiarach. Który z tych obiektów uzyska większą prędkość graniczną?

10. Ruch po okręgu

- Ruch jednostajny po okręgu
- Częstotliwość i okres w ruchu po okręgu
- Siła dośrodkowa

→ **Przypomnij sobie**, co to są częstotliwość i okres ruchu.

Księżyc obiega Ziemię, a Ziemia obiega Słońce. Ruch po torach zbliżonych do okręgu jest w Kosmosie bardzo powszechny. Wokół nas także widać wiele jego przykładów. Osoby wirujące na karuzeli czy też pasażerowie autobusu wjeżdżającego na rondo poruszają się – przynajmniej przez pewien czas – po okręgu.

Ruch jednostajny po okręgu

Rozpatrzmy tzw. **ruch jednostajny po okręgu**, w którym wartość prędkości się nie zmienia. Gdy autobus takim ruchem jedzie po rondzie, prędkościomierz w autobusie wciąż pokazuje tyle samo kilometrów na godzinę. Innym przykładem może być ruch końcówki dużej wskazówki wielkiego zegara – porusza się ona właśnie ruchem jednostajnym po okręgu. Czas pełnego okrążenia nazywamy **okresem** i oznaczamy literą T . Na przykład okres obiegu dużej (minutowej) wskazówki zegara powinien wynosić godzinę. Okres sekundnika to minuta, a okres małej (godzinowej) wskazówki to dwanaście godzin. Okres naszego obiegu wokół osi ziemskiej to doba, a okres obiegu Ziemi dookoła Słońca to rok. Do opisu ruchu po okręgu służy również **częstotliwość**, czyli liczba pełnych obiegów w jednostce czasu. Wobec tego częstotliwość jest odwrotnością okresu:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Jednostką częstotliwości jest herc:

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{\text{s}}$$

Jeśli do wzoru na prędkość w ruchu jednostajnym:

$$v = \frac{s}{t}$$

podstawimy drogę przebytą w czasie jednego okresu ruchu T , czyli obwód okręgu równy $2\pi r$, otrzymamy wzór na prędkość w ruchu jednostajnym po okręgu:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (2)$$

PRZYKŁAD 1.

Koszulka wiruje, przywierając do ścianki bocznej bębna pralki. Bęben ma średnicę 40 cm i wykonuje 1000 obrotów na minutę. Jaką prędkość ma ta koszulka?

Bęben wykonuje 1000 obrotów na minutę, a minuta ma 60 s, więc:

$$f = \frac{1000}{60 \text{ s}} \approx 16,7 \frac{1}{\text{s}}$$

Bęben wykonuje prawie 17 obrotów w ciągu jednej sekundy. Teraz możemy obliczyć okres z przekształconego wzoru (1):

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{16,7 \frac{1}{\text{s}}} \approx 0,06 \text{ s}$$

Ze wzoru (2) można obliczyć prędkość:

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,2 \text{ m}}{0,06 \text{ s}} \approx 21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Jest to ok. 75 km/h, zatem prędkość koszulki jest dość duża.



Siła dośrodkowa

Czy do tego, by ciało poruszało się po okręgu, potrzebna jest jakaś siła?

DOŚWIADCZENIE 1.

Niewielką kulkę (może być koralik) przykryj odwróconą szklanką. Za pomocą obracania szklanki wpraw kulkę w ruch po okręgu. Czy na kulkę działa jakaś siła ze strony szklanki?

W pewnym momencie podnieś nagle szklankę. Co się stanie z kulką: czy będzie nadal poruszać się po okręgu, czy też po innym torze?

Jak wynika z I zasady dynamiki, bez działania jakiegokolwiek siły ciało może tylko spoczywać lub poruszać się ruchem jednostajnym prostoliniowym. Prostoliniowym, a nie po okręgu. Wobec tego, aby ciało poruszało się po okręgu, musimy działać na nie pewną siłą. Jaką? Dość łatwo można domyślić się jej kierunku. Wystarczy wprawić ręką w ruch obrotowy niewielki przedmiot przywiązany do końca sznurka. Ręka ciągnie sznurek, a zatem działa na niego pewną siłą. Naprężony sznurek z kolei działa siłą na przedmiot, dzięki czemu może on poruszać się po okręgu. Jeśli siła przestanie działać, bo np. puścimy sznurek, to ruch po okręgu natychmiast się skończy. Sznurek może działać siłą tylko w tym kierunku, w którym jest ciągnięty, zatem siła powodująca ruch po okręgu musi być skierowana do środka tego okręgu.

DOŚWIADCZENIE 2.

Przywiąż starannie jakiś drobny przedmiot do gumki pasmanteryjnej o długości mniej więcej 0,5 m i wpraw ją w ruch obrotowy w płaszczyźnie poziomej. Co się stanie z gumką, jeśli będziesz zwiększać częstotliwość obrotów? Dlaczego tak się dzieje?

Gdy zwiększamy częstotliwość obrotów, zwiększa się wydłużenie gumki, co świadczy o wzroście siły. Określonej prędkości ciała i danemu promieniowi okręgu odpowiada określona wartość siły. Można ją obliczyć ze wzoru:

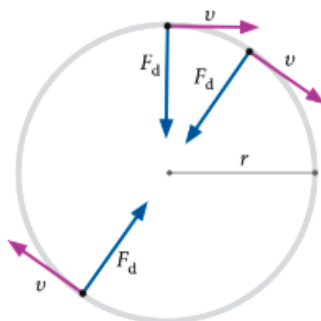
$$F_d = m \frac{v^2}{r} \quad (3)$$

gdzie:

F_d – siła powodująca ruch po okręgu, zwana dośrodkową,

m – masa ciała, v – prędkość ciała,

r – promień okręgu, po którym ciało się porusza.



Ryc. 10.1. Ruch po okręgu i siła dośrodkowa

Możemy teraz sformułować warunek ruchu po okręgu: **żeby ciało mogło poruszać się ruchem jednostajnym po okręgu, musi działać na nie siła skierowana do środka okręgu**, o wartości określonej wzorem (3). Tę siłę nazywa się **siłą dośrodkową**. Nie jest to nowy rodzaj siły. To po prostu umowna nazwa każdej siły powodującej ruch ciała po okręgu. Rolę siły dośrodkowej może odgrywać np. siła tarcia, nacisku lub grawitacji. To jakby rola filmowa do odegrania. Musi ją zagrać jakiś aktor, ale tę samą rolę mogą grać różni aktorzy.

PRZYKŁAD 2.

Koszulka o masie 300 g wiruje w bębnie pralki z prędkością 21 m/s. Bęben ma średnicę 40 cm. Obliczmy siłę dośrodkową działającą na koszulkę.

Siłę dośrodkową potrzebną do wirowania koszulki obliczymy ze wzoru (3):

$$F_d = \frac{mv^2}{r} = \frac{0,3 \text{ kg} \cdot \left(21 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,2 \text{ m}} \approx 660 \text{ N}$$

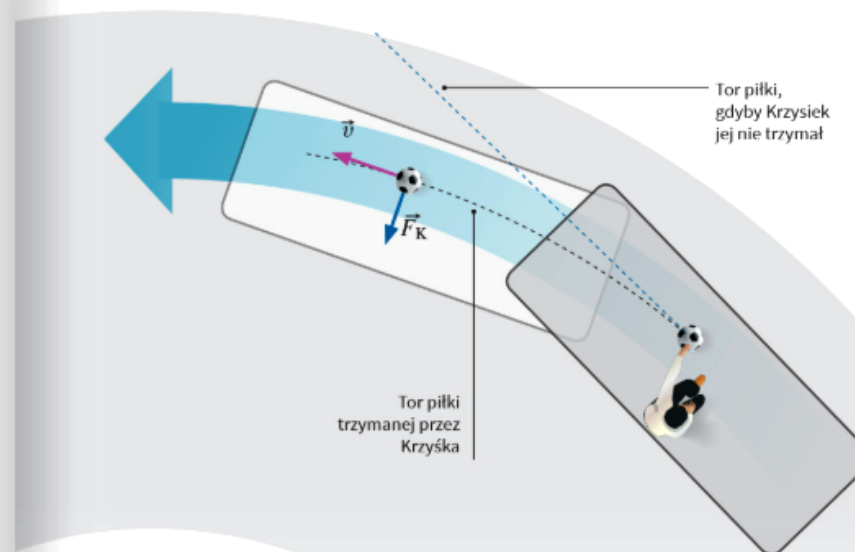
Czy to jest siła duża, czy mała? Najlepiej porównać ją do ciężaru tej koszulki:

$$F_g = mg = 0,3 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 2,9 \text{ N}$$

Jest to siła prawie 230 razy większa od ciężaru koszulki! Co działa na koszulkę taką siłą? Bęben pralki. To nacisk powierzchni wewnętrznej bębna na koszulkę jest siłą dośrodkową wymuszającą jej ruch wirowy. Siła ta przestaje działać na kropelki wody, gdy znajdują się one nad jednym z licznych otworów znajdujących się w ściankach bębna, wówczas zachowują się one jak koraliki z doświadczenia 1., czyli uciekają z bębna.

A jak to jest w naszych przykładach? Jaka siła powoduje skręcanie autobusu? Na poziomej nawierzchni tylko siła tarcia może spowodować jego ruch po okręgu, czyli umożliwić bezpieczne pokonanie zakrętu. A co z obiektami wewnątrz autobusu jadącego po rondzie? Ten przypadek rozważmy trochę dokładniej.

Wyobraźmy sobie, że wewnątrz autobusu jadącego po rondzie siedzi Krzysiek i wiezie piłkę. Dla uproszczenia założymy, że piłka może się toczyć po podłodze bez oporów ruchu. Gdy autobus zaczyna skręcać, piłka – zgodnie z I zasadą dynamiki – porusza się nadal po linii prostej względem ulicy (przerywana niebieska linia na ryc. 10.2). Ale Krzysiek chce, żeby spoczywała ona na podłodze. Musi więc pochylić się i trzymać piłkę ręką.



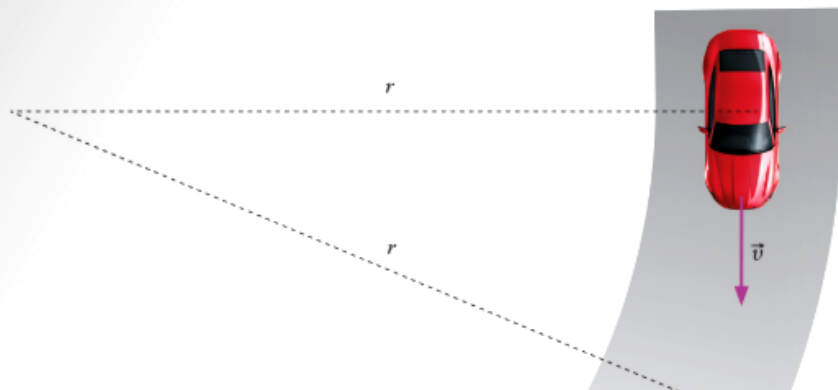
Ryc. 10.2. Ruch piłki w autobusie jadącym na rondzie. Gdy na piłkę działa siła dośrodkowa, to porusza się ona po okręgu

Siła $\vec{F}_K$, z jaką Krzysiek działa na piłkę, jest siłą dośrodkową powodującą ruch piłki dookoła ronda.

s. 207

Poprawność wzoru (3) można zweryfikować samodzielnie (scenariusz doświadczenia 1., s. 207). Wzór ten powinni znać wszyscy kierowcy. Spójrzmy na rycinę 10.3. Kierowca chce pokonać zakręt. Promień łuku (zakładamy, że to część okręgu) występuje we wzorze (3) w mianowniku. To znaczy, że im bardziej ostry zakręt, tym większa siła tarcia jest konieczna do jego bezpiecznego pokonania.

Popatrzmy teraz na licznik wzoru (3) – prędkość jest w drugiej potęgze. To oznacza, że siła dośrodkowa znacznie rośnie wraz ze wzrostem prędkości. Przy dwukrotnie większej prędkości siła dośrodkowa musi być czterokrotnie większa! Wniosek: przed zakrętem lepiej zwolnić, zwłaszcza jeśli jest ślisko, czyli jest małe tarcie.



Ryc. 10.3. Auto wchodzi w zakręt, widok z góry

Jeśli na obiekt działa kilka sił, rolę siły dośrodkowej zawsze odgrywa **siła wypadkowa**. Na piłkę i autobus – omówione w naszych przykładach – działa również siła ciężkości. Jest ona jednak równoważona przez nacisk pochodzący od podłoża i dlatego mogliśmy rozpatrywać tylko siłę tarcia lub siłę, z jaką działał Krzysiek. Te siły nie były niczym zrównoważone.

Podsumujmy, warunkiem koniecznym, aby ciało poruszało się po okręgu, jest to, by siła wypadkowa działająca na ciało była skierowana zawsze do środka tego okręgu, a jej wartość była zgodna ze wzorem (3).

Przyspieszenie w ruchu po okręgu

Czy ciało poruszające się ruchem jednostajnym po okręgu ma przyspieszenie? Przyspieszenie to stosunek zmiany prędkości do czasu, w którym ta zmiana nastąpiła. Podczas ruchu jednostajnego po okręgu prędkość ma stałą wartość, lecz ciągle zmieniają się jej kierunek i zwrot (ryc. 10.1). Wobec tego wektor prędkości zmienia się, a to oznacza, że ciało ma przyspieszenie.

Przypomnijmy II zasadę dynamiki: przyspieszenie ciała jest wektorem skierowanym tak jak siła wypadkowa, a jego wartość obliczamy ze wzoru:

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

Wynika stąd, że przyspieszenie ciała poruszającego się po okręgu jest skierowane tak jak siła dośrodkowa, czyli do środka okręgu. Wartość tego przyspieszenia można otrzymać po podstawieniu do powyższego wzoru wartości siły dośrodkowej ze wzoru (3).

Otrzymamy wówczas:

$$a_d = \frac{v^2}{r}$$

(4)

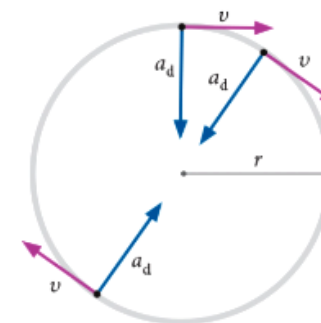
gdzie:

a_d – przyspieszenie dośrodkowe,

v – prędkość ciała,

r – promień okręgu, po którym ciało się porusza.

Przyspieszenie prostopadłe do prędkości oznacza zmianę kierunku prędkości (czyli skręcanie), bez zmiany jej wartości.



Ryc. 10.4. W ruchu jednostajnym po okręgu zmieniają się kierunek i zwrot wektora prędkości. Przyspieszenie jest skierowane do środka okręgu

PODSUMOWANIE

- ▶ **Ruch jednostajny po okręgu** to ruch, którego torem jest okrąg, a prędkość ma stałą wartość.
- ▶ **Okres obiegu** to czas jednego pełnego okrążenia.
- ▶ **Częstotliwość** w ruchu po okręgu to liczba pełnych okrążeń w jednostce czasu.
- ▶ Żeby ciało mogło poruszać się po okręgu, siła wypadkowa działająca na to ciało musi być skierowana do środka okręgu, a jej wartość musi być wyrażona wzorem:

$$F_d = m \frac{v^2}{r}$$

Taką siłę nazywa się **siłą dośrodkową**.

- ▶ Ciało poruszające się po okręgu ma **przyspieszenie dośrodkowe** skierowane do środka tego okręgu, którego wartość jest wyrażona wzorem:

$$a_d = \frac{v^2}{r}$$

PYTANIA I ZADANIA

1. Wszyscy poruszamy się po okręgu, ponieważ uczestniczymy w ruchu obrotowym Ziemi. Oblicz prędkość, jaką mają w ruchu obrotowym Ziemi wokół jej osi:
 - a) człowiek stojący na biegunie,
 - b) człowiek stojący na równiku.
 Przyjmij, że promień Ziemi jest równy 6400 km, a jej okres obrotu wynosi 24 h.
2. Wskazówka minutowa zegara jest dwukrotnie dłuższa od godzinowej. Która prędkość jest większa: końca wskazówki minutowej czy wskazówki godzinowej? Ile razy?
3. Kornel ważący 60 kg siedzi na krześle wirującej karuzeli. Jej okres obrotu to 5 s. Odległość Kornela od osi obrotu wynosi 4 m. Oblicz przyspieszenie dośrodkowe Kornela i działającą na niego siłę dośrodkową.
4. Samochód wjeżdża w zakręt o promieniu 30 m. Załóż, że siła tarcia stanowi maksymalnie 40% ciężaru auta, i oblicz maksymalną prędkość, jaką samochód może mieć na tym zakręcie. Narysuj tor, po którym poruszałby się samochód wjeżdżający w zakręt za szybko.
5. Tor kolarski ma bardzo ostre zakręty i bardzo duże nachylenie. W jaki sposób takie nachylenie pomaga pokonywać zakręty?



11. Siły bezwładności

- Inercjalne i nieinercjalne układy odniesienia
- Siły bezwładności
- Siła bezwładności w ruchu po okręgu



→ Przypomnij sobie II zasadę dynamiki.

W poprzednim rozdziale była mowa o tym, że przyczyną ruchu po okręgu jest siła dośrodkowa. Jednak gdy miejski autobus wjeżdża na rondo, pasażerowie czują, jakby jakaś siła wyrzuciła ich na zewnątrz okręgu, po którym się poruszają. Podobnie czują się osoby wirujące na karuzeli. Z kolei gdy kierowca autobusu gwałtownie zahamuje, wszyscy pasażerowie odczuwają działanie jakiejś siły w kierunku ruchu pojazdu. W tym rozdziale dowiemy się, co to za siły i kiedy się pojawiają.

Siły bezwładności w ruchu prostoliniowym

Wyobraźmy sobie sytuację, która może się zdarzyć na każdym dworcu kolejowym. Na peronie stoi wagon, w którym siedzi Adam. Adam ma samochodzik, który umieścił na gładkim poziomym blacie stolika. Na peronie stoi Basia, która obserwuje Adama i samochodzik. Zakładamy przy tym, że opory ruchu działające na samochodzik są tak niewielkie, że można je pominąć.

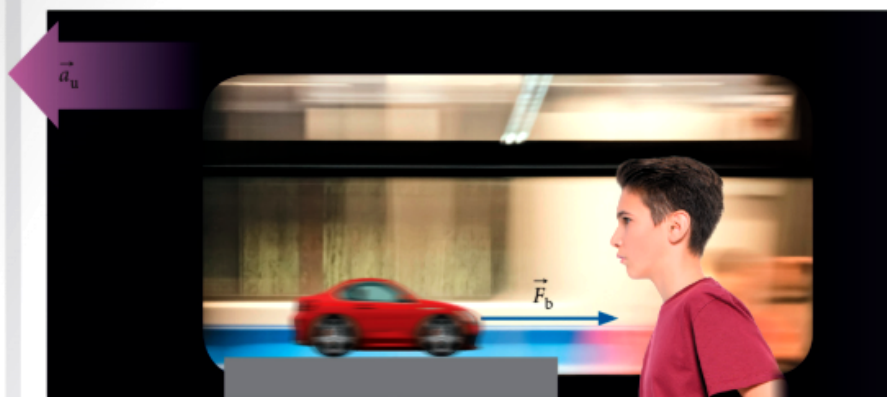


Ryc. 11.1. Basia i Adam obserwują samochodzik w ruszającym wagonie

W pewnej chwili wagon zaczyna rozpędzać się w lewą stronę. Rozważmy wyłącznie siły działające na samochodzik w kierunku poziomym, bo siły działające w kierunku pionowym się równoważą i nie mają wpływu na ruch.

Według Basi na samochodzik w kierunku poziomym nie działają żadne siły i dlatego pozostaje on w spoczynku względem peronu.

Zupełnie inaczej wygląda ta sytuacja według Adama, który widzi, że samochodzik zbliża się do niego ruchem przyspieszonym.



Ryc. 11.2. Według Adama na samochodzik działa siła bezwładności

Z II zasady dynamiki wynika, że taki ruch może spowodować tylko niezrównoważona siła. Adam wnioskuję zatem, że na samochodzik działa siła nadająca mu przyspieszenie. Siłę, która jest przyczyną rozpędzania się autka w opisie prowadzonym względem układu odniesienia Adama, będziemy nazywać **siłą bezwładności**. Przyspieszenie samochodzika względem wagonu ma tę samą wartość, co przyspieszenie wagonu względem peronu. Zgodnie z II zasadą dynamiki wartość siły bezwładności można obliczyć ze wzoru:

$$F_b = m \cdot a_u$$

gdzie:

m – masa ciała,

a_u – przyspieszenie układu.

W opisie prowadzonym przez Adama względem jego układu odniesienia **na wszystkie obiekty działa siła bezwładności, skierowana przeciwnie do przyspieszenia układu**. Siła bezwładności nie spełnia III zasady dynamiki, bo nie istnieje ciało, które jest źródłem tej siły. Z tego powodu bywa nazywana siłą pozorną. Jednak wprowadzenie tej siły pozwala stosować zasady dynamiki w układzie poruszającym się z przyspieszeniem.

Zwróćmy uwagę, że w układzie odniesienia Basi nie ma żadnej siły bezwładności. Basia może wyjaśnić Adamowi, że przyczyną efektu, który on obserwuje w swoim układzie, jest po prostu przyspieszenie tego układu.

Układy inercjalne to układy odniesienia, w których zawsze spełnione są zasady dynamiki. W układach tych nie ma sił bezwładności.

Możemy uznać, że układ odniesienia związany z peronem, na którym stoi Basia, jest inercjalnym układem odniesienia. Każdy układ odniesienia, który porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym względem układu inercjalnego, również jest inercjalnym układem odniesienia.

Układy odniesienia, w których działają siły bezwładności, nazywamy **nieinercjalnymi układami odniesienia**. Poruszają się one z przyspieszeniem względem układów inercjalnych.

DOŚWIADCZENIE 1.

Do przeprowadzenia doświadczenia potrzebna będzie deskorolka oraz jej „pasażer” – może to być np. klocek, lalka. Kładziemy pasażera na deskorolce, a następnie ostrożnie ją rozpędzamy i kierujemy w stronę nieruchomej przeszkody. Deskorolka po fazie ruchu jednostajnego uderza w przeszkodę i się zatrzymuje. Co się dzieje z pasażerem podczas poszczególnych faz ruchu?

Może zauważyliście, że napój wlany do kubka wewnątrz autobusu jadącego autostradą ze stałą prędkością po linii prostej oraz wewnątrz autobusu stojącego na postoju zachowuje się tak samo. Autobus w obu przypadkach jest inercjalnym układem odniesienia. Zupełnie inaczej wygląda to, gdy pojazd zaczyna poruszać się z pewnym przyspieszeniem i przestaje być układem inercjalnym. Na przykład podczas hamowania autobusu jego pasażerowie będą mogli powiedzieć, że im hamowanie jest gwałtowniejsze, tym większa jest siła bezwładności. Siła bezwładności działająca na pasażera jest wprost proporcjonalna do przyspieszenia autobusu. Podczas zderzenia pojazdu z nieruchomą masywną przeszkodą może ona znacznie przekroczyć ciężar pasażera, wówczas zapięte pasy bezpieczeństwa zapobiegają uderzeniu podróżnego w siedzenie go poprzedzające.

PRZYKŁAD 1.

W autobusie stoi wózek z dzieckiem trzymany przez matkę. Masa wózka razem z dzieckiem wynosi 18 kg. W pewnym momencie autobus zaczyna hamować z przyspieszeniem $2,5 \text{ m/s}^2$. Obliczmy siłę, z jaką należy trzymać wózek, aby się nie poruszył względem autobusu. Załóżmy, że wózek ma zablokowane koła przez hamulec, więc działa na niego siła tarcia o wartości 28 N.

- Problem rozwiązaliśmy najpierw z punktu widzenia obserwatora znajdującego się w autobusie. Autobus porusza się ruchem przyspieszonym, więc przyjęty układ odniesienia jest nieinercjalny. W kierunku pionowym na wózek działają dwie siły: ciężar i siła nacisku pochodząca



Siły działające na wózek znajdujący się w nieinercyjnym układzie odniesienia

od podłogi – które wzajemnie się równoważą, więc je pomijamy. W kierunku poziomym na wózek działają trzy siły: bezwładności $\vec{F}_b$, tarcia $\vec{F}_t$ oraz siła $\vec{F}_m$, z jaką matka trzyma wózek. Jeśli wózek ma pozostać nieruchomy, to wypadkowa tych sił powinna być równa zeru. Z rysunku można wywnioskować, że suma siły tarcia $\vec{F}_t$ oraz siły $\vec{F}_m$ równoważy siłę bezwładności $\vec{F}_b$:

$$F_t + F_m = F_b$$

Wobec tego:

$$F_m = F_b - F_t$$

Siła bezwładności wynosi:

$$F_b = m \cdot a_u = 18 \text{ kg} \cdot 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 45 \text{ N}$$

Ostatecznie szukana siła ma wartość:

$$F_m = 45 \text{ N} - 28 \text{ N} = 17 \text{ N}$$

- Zmieniamy układ odniesienia na inercyjny. Z punktu widzenia obserwatora stojącego obok jezdni na wózek działają w kierunku poziomym tylko dwie siły: $\vec{F}_t$ oraz $\vec{F}_m$. Pod wpływem tych sił wózek porusza się razem z autobusem z przyspieszeniem a_u . Zgodnie z II zasadą dynamiki możemy napisać równanie:

$$m \cdot a_u = F_m + F_t$$

Wobec tego:

$$F_m = m \cdot a_u - F_t$$

Po podstawieniu danych do tego wzoru otrzymamy:

$$F_m = 18 \text{ kg} \cdot 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 28 \text{ N} = 45 \text{ N} - 28 \text{ N} = 17 \text{ N}$$

Jak widać, siła $\vec{F}_m$ jest w obu układach odniesienia taka sama. Obie metody analizy sił są poprawne i równoważne, ale nie można stosować ich jednocześnie.

Siła bezwładności w ruchu po okręgu

Wróćmy do przykładu z poprzedniej lekcji, w którym opisywaliśmy ruch autobusu jadącego po rondzie. Przyspieszenie pojazdu skierowane jest do środka okręgu (ryc. 11.3). Autobus stanowi więc nieinercyjny układ odniesienia, w którym na każde ciało działa siła bezwładności skierowana na zewnątrz okręgu. W autobusie siedzi Krzysiek, a przed nim leży piłka. Gdy autobus porusza się ze stałą prędkością po linii prostej, to piłka jest nieruchoma. Gdy autobus zaczyna poruszać się po okręgu, to aby piłka pozostała w spoczynku, Krzysiek musi ją trzymać. Krzysiek działa na piłkę siłą $\vec{F}_K$, która równoważy siłę bezwładności skierowaną na zewnątrz okręgu. Wartość siły bezwładności to masa ciała pomnożona przez wartość przyspieszenia autobusu (wzór 4 z rozdziału 10.):

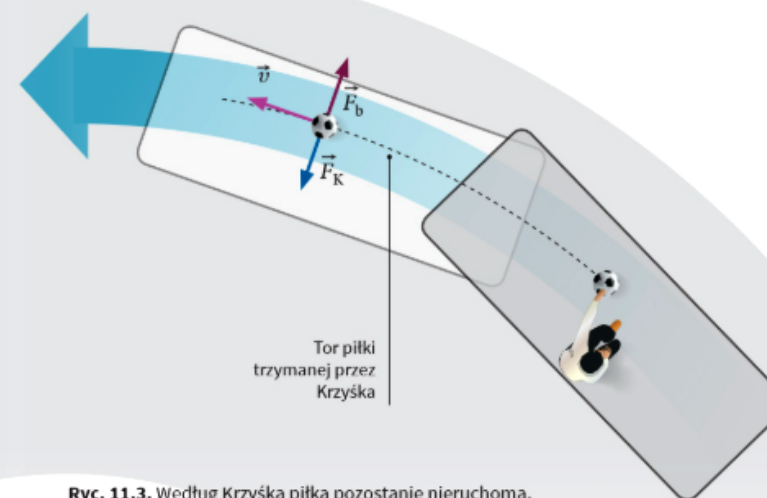
$$F_b = m \frac{v^2}{r}$$

gdzie:

m – masa ciała,

v – prędkość, z jaką ciało porusza się po okręgu,

r – promień okręgu.



Ryc. 11.3. Według Krzyska piłka pozostanie nieruchoma, gdy będzie działać na nią siła równoważąca siłę bezwładności

Siłę bezwładności występującą w ruchu po okręgu nazywa się czasami **siłą odśrodkową**. Innym przykładem układu nieinercyjnego jest karuzela. Zwróćmy przy tym uwagę na bardzo ważną rzecz. Siła bezwładności działająca na obiekty znajdujące się na karuzeli zależy od odległości od osi obrotu: im bliżej jesteśmy osi obrotu, tym mniejsza jest siła bezwładności.

PRZYKŁAD 2.

Na karuzeli siedzi Damian. Znajduje się on w odległości 4 m od osi obrotu. Początkowo karuzela wykonywała 5 obrotów na minutę. Potem częstotliwość obrotów wzrosła do 10 na minutę. Czy siła bezwładności działająca na Damiana również wzrosła dwukrotnie?

W układzie odniesienia związanym z Damianem siłę bezwładności można obliczyć ze wzoru:

$$F_b = m \frac{v^2}{r}$$

Wiemy, że prędkość w ruchu po okręgu można wyznaczyć ze wzoru:

$$v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$$

oraz że:

$$\frac{1}{T} = f$$

Wobec tego wyrażenie na siłę bezwładności przyjmuje postać:

$$F_b = 4\pi^2 \cdot m \cdot r \cdot f^2$$

Gdy częstotliwość obrotów karuzeli wzrosła dwukrotnie, siła bezwładności działająca na Damiana zwiększyła się czterokrotnie.

WARTO WIEDZIEĆ**Wirówka przeciążeniowa**

Siły bezwładności występujące w nieinercjalnych układach odniesienia mogą w pewnych warunkach symulować działanie sił grawitacji. Jednym z przykładów takiego urządzenia jest wirówka przeciążeniowa. Pilot wchodzi do kabiny na końcu tej wirówki. Następnie zaczyna się ona poruszać po okręgu. Z punktu widzenia pilota oprócz ciężaru oraz nacisku fotela zaczyna działać na niego siła bezwładności. Zamknięty w kabinie pilot nie widzi ruchu po okręgu, lecz czuje coraz większą siłę przyciskającą go do oparcia fotela. Siła bezwładności powoduje, że pilot czuje się tak, jakby go przeniesiono na planetę o większej niż na Ziemi sile przyciągania grawitacyjnego. Podobieństwo wynika z faktu, że siły bezwładności oraz grawitacji są wprost proporcjonalne do masy ciała. Podczas testów sprawdza się, jak reaguje organizm pilotów, gdy przyspieszenia samolotu są bardzo duże.

**Kosmiczna wirówka**

W przyszłości na stacjach kosmicznych krążących wokół Ziemi planuje się osiągnięcie efektu sztucznej grawitacji. Stacja kosmiczna musiałaby wirować wokół osi. Na astronautów znajdujących się w obracającej się stacji będzie działać siła bezwładności przyciskająca ich do podłoża podobnie jak ciężar na powierzchni Ziemi.



PODSUMOWANIE

- ▶ **Inercjalny układ odniesienia** to układ, w którym są spełnione wszystkie zasady dynamiki. Każdy układ odniesienia, który porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym względem innego układu inercjalnego, również jest inercjalnym układem odniesienia.
- ▶ **W nieinercjalnych układach odniesienia** na wszystkie ciała działają siły bezwładności.
- ▶ **Siła bezwładności** jest skierowana przeciwnie do przyspieszenia układu. Wartość tej siły obliczamy ze wzoru:

$$F_b = m \cdot a_u$$

gdzie: m – masa ciała, a_u – przyspieszenie układu.

PYTANIA I ZADANIA

1. Na podłodze autobusu stoi wózek. Koła tego wózka nie są zablokowane. Wyjaśnij, jak zachowuje się wózek podczas:
 - a) spoczynku autobusu,
 - b) ruchu jednostajnego autobusu wzdłuż jednego kierunku,
 - c) hamowania autobusu.
 Każdy przypadek rozważ z punktu widzenia dwóch obserwatorów: siedzącego w autobusie i stojącego na chodniku.
2. Szklana płyta leży na poziomym blacie stołu. Na płycie leży topniejąca kostka lodu. Pomińmy siły tarcia występujące między kostką a płytą. W pewnym momencie płytę przesunęto poziomo ruchem przyspieszonym względem stołu. Opisz zachowanie się kostki lodu w układzie związanym z poruszającą się płytą (układzie nieinercjalnym).
3. Pewien samochód jedzie z prędkością 60 km/h. Wewnątrz auta znajduje się pasażer o masie 70 kg. Podczas uderzenia tego auta w nieruchomą przeszkodę następuje deformacja przodu samochodu i pojazd zatrzymuje się na drodze 0,65 m. Zakładamy, że ruch auta podczas zderzenia był jednostajnie opóźniony. Oblicz przyspieszenie samochodu podczas zderzenia i siłę bezwładności działającą na pasażera. Porównaj tę siłę z ciężarem pasażera.
4. Na poziomej podłodze autobusu leży walizka o masie 9,5 kg. Maksymalna wartość siły tarcia podczas spoczynku walizki wynosi 45 N. Oblicz maksymalne przyspieszenie autobusu podczas hamowania, przy którym walizka pozostanie nieruchoma względem autobusu.
5. Wyobraź sobie, że zajmujesz się projektowaniem stacji orbitalnej, która obraca się wokół swojego środka, co powoduje powstanie siły bezwładności. Zaplanuj wnętrze w jednym z modułów takiej stacji. Wykonaj odpowiedni rysunek, zaznacz na rysunku oś obrotu stacji.



12. Zasady dynamiki – przykłady

- Równowaga sił a ruch ciała
- Wzajemność oddziaływań, siły wewnętrzne
- Zachowanie się ciał na pochyłości

→ **Przypomnij sobie** zasady dynamiki i wiadomości o sile tarcia.

Zasady dynamiki Newtona należą do podstawowych praw przyrody. Dzięki nim potrafimy wyjaśnić zachowanie się ciał pod działaniem sił oraz przewidzieć zachowanie się układu ciał w przyszłości. Prawa mechaniki zostały odkryte ponad trzysta lat temu, ale do dziś są podstawą projektowania rakiet, samolotów, samochodów i wszystkich skomplikowanych maszyn ułatwiających nam życie.

Równowaga sił i ruch jednostajny prostoliniowy

Ruch jednostajny po linii prostej nie wymaga działania sił. Siła jest potrzebna tylko do wprowadzenia w ruch, ale nie do jego podtrzymania. Jednak gdy mamy do czynienia z tarcie, trzeba działać dodatkową siłą skierowaną w kierunku ruchu, aby zrównoważyć siłę tarcia. Wiemy z doświadczenia, że najtrudniej jest ruszyć z miejsca ciężki przedmiot, ale gdy go już ruszymy, to dalej jest łatwiej. Wprowadzenie w ruch np. skrzynek z napojami wymaga zadziałania na nie siły $\vec{F}$ większej od maksymalnej wartości siły tarcia statycznego, aby wypadkowa tych sił była skierowana w kierunku ruchu. Wtedy dopiero skrzynki zaczną poruszać się ruchem przyspieszonym, czyli ruszą z miejsca. Zwykle ten etap trwa ułamek sekundy. Gdy skrzynki już się poruszają ruchem jednostajnym po linii prostej, wypadkowa sił wynosi zero. Siła $\vec{F}$ jest zatem mniejsza niż podczas ruszania, gdyż potrzebna jest tylko do zrównoważenia siły tarcia kinetycznego (ryc. 12.1).

Gdy wypadkowa sił jest równa zero, możemy, że siły się równoważą, i wtedy ruch odbywa się po linii prostej bez zmiany prędkości.



Ryc. 12.1. Aby przesuwać przedmioty ze stałą prędkością po linii prostej, musimy zrównoważyć siłę tarcia

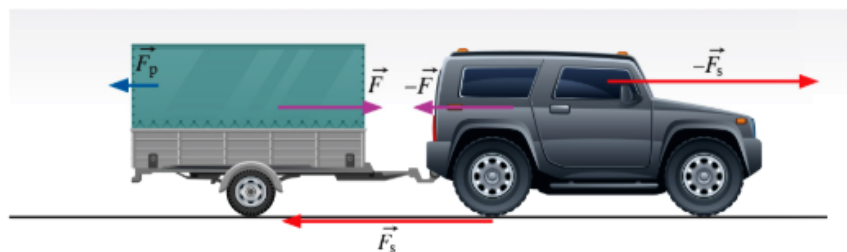
Wzajemne oddziaływanie dwóch ciał

O wzajemnym oddziaływaniu dwóch ciał mówi III zasada dynamiki. Rozważmy siły działające na samochód i ciągniętą przez niego przyczepę (ryc. 12.2). Oba obiekty wzajemnie na siebie oddziałują: samochód działa na przyczepę siłą $\vec{F}$ skierowaną do przodu, przyczepa działa na samochód siłą $-\vec{F}$ skierowaną do tyłu i utrudnia jego poruszanie się. Te dwie siły mają takie same wartości bez względu na to, jaki jest ruch układu. Nawet gdy samochód z przyczepą rusza z miejsca i rozpędza się, to obie siły mają tę samą wartość. Zatem dlaczego przyczepa jedzie za samochodem, a nie odwrotnie?



Ryc. 12.2. Samochód ciągnie przyczepę siłą $\vec{F}$, a przyczepa działa na niego siłą $-\vec{F}$ o tej samej wartości, lecz przeciwnie skierowaną

Układ składający się z samochodu i przyczepy stanowi całość i jako całość się porusza. Siły działające między poszczególnymi częściami układu ciała, które zapewniają zachowanie układu w całości, nazywamy **siłami wewnętrznymi**. Tego typu siły nie mogą zmienić ruchu całego układu. Zmiana może nastąpić dopiero wtedy, gdy na układ zadziała siła zewnętrzna ze strony innego ciała. W naszym przypadku to siły tarcia i oporu są siłami zewnętrznymi, które decydują o ruchu (ryc. 12.3). Żeby samochód z przyczepą się rozpędził, jego koła muszą działać na podłoże siłą tarcia o wartości F_s . Zgodnie z III zasadą dynamiki podłoże oddziałuje na koła, a zatem i na cały układ siłą o tej samej wartości, lecz przeciwnie skierowaną. Gdy siła ta jest większa od siły oporów ruchu $\vec{F}_p$, to wypadkowa sił jest skierowana w kierunku ruchu samochodu z przyczepą i ruch jest przyspieszony.



Ryc. 12.3. Siły działające na ruszający samochód z przyczepą. Siły ciężkości i nacisku podłoża nie są narysowane, bo się równoważą i nie mają wpływu na ruch układu

WARTO WIEDZIEĆ

Siły wewnętrzne w ciele człowieka

W naszym organizmie są liczne więzadła i ścięgna, które wiążą ze sobą poszczególne części ciała. Mięśnie za pośrednictwem ścięgien działają siłami na kości, dzięki czemu zmieniamy kształt naszego ciała. Te siły osiągają czasem bardzo duże wartości. Na przykład siła, z którą ścięgno Achillesa działa na kości stopy podczas biegania, może sięgać 5000 N. Jednak siły te nie mogą zmienić położenia całego ciała, bo są siłami wewnętrznymi. Jeżeli chcemy zmienić położenie, musimy się od czegoś odepchnąć, zadziałać siłą na ścianę, podłogę lub wodę (podczas pływania). Wtedy zgodnie z III zasadą dynamiki ściana, podłoga lub woda zadziałają na nas siłą zewnętrzną i wprawiają nas w ruch.



Ciało na pochyłej powierzchni

Powierzchnię nachyloną pod pewnym kątem do poziomu fizycy nazywają **równią pochyłą**. Nietrudno znaleźć przykłady równi pochyłej w otoczeniu: ulice w terenie górystym, stoki narciarskie, deska oparta jednym końcem o schody itp. W przyrodzie często pochylenie powierzchni nie jest jednakowe na całej długości. Wtedy patrzymy na mały fragment, na którym akurat znajduje się interesujące nas ciało i dla którego możemy dobrze określić kąt nachylenia. Z codziennego doświadczenia wiemy, że gdy tarcie jest małe, przedmioty zsuwają się z pochyłości i poruszają się coraz szybciej.

Wyobraźmy sobie samochód stojący na pochyłym podjeździe przed garażem (ryc. 12.4). Przyjmijmy, że podjazd ma długość l , a jego górna krawędź jest na wysokości h . Po zwolnieniu hamulca samochód zacznie zjeżdżać ruchem przyspieszonym. Wnioskujemy, że wypadkowa siła $\vec{F}_w$ działająca na auto jest skierowana równoległe do równi (ryc. 12.5).



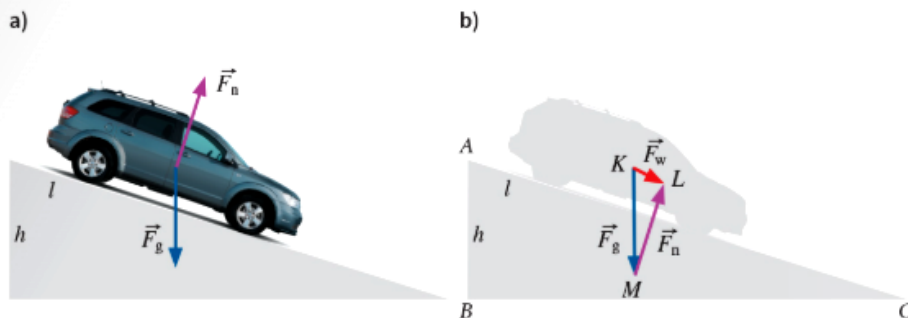
Ryc. 12.4. Samochód stojący na pochyłym podjeździe przed garażem. Kierowca musi pamiętać o zabezpieczeniu pojazdu przed stoczeniem



Ryc. 12.5. Wypadkowa siła działająca na zjeżdżający z pochyłości samochód jest skierowana w kierunku ruchu, czyli równoległe do równi

Przypadek 1. Brak oporów ruchu

Przeanalizujemy ruch samochodu przy założeniu, że opory ruchu można pominąć. Na auto działa siła ciężkości $\vec{F}_g$ skierowana pionowo w dół i siła nacisku (reakcji podłoża) $\vec{F}_n$ skierowana prostopadłe do podłoża. Te dwie siły są ze sobą powiązane: im cięższe ciało, tym większy nacisk, ale na pochyłości siły te nie równoważą się, bo mają inny kierunek. To właśnie wypadkowa $\vec{F}_w$ tych sił skierowana równoległe do powierzchni jest przyczyną ruchu przyspieszonego. Spróbujmy znaleźć związek między tymi siłami. Wektory sił działających na samochód pokazano na ryc. 12.6a. Zgodnie z regułą składania sił (rozdział 6.) wektory $\vec{F}_g$, $\vec{F}_n$ i $\vec{F}_w$ tworzą trójkąt przedstawiony na ryc. 12.6b.



Ryc. 12.6. a) Siły działające na samochód zjeżdżający z pochyłości przy założeniu, że tarcie pomijamy. b) Siła wypadkowa $\vec{F}_w$ jest wynikiem złożenia siły ciężkości $\vec{F}_g$ i siły nacisku $\vec{F}_n$

Gdy spojrzymy teraz na ryc. 12.6b okiem matematyka, znajdziemy na nim trójkąt podobne: $\triangle ABC \sim \triangle KLM$ (oba trójkąty mają takie same kąty, z których jeden to kąt prosty). Dzięki temu możemy wyznaczyć związek między siłami:

$$\frac{F_w}{F_g} = \frac{h}{l}$$

stąd:

$$F_w = \frac{h}{l} F_g$$

gdzie $F_g = mg$.

Z II zasady dynamiki obliczymy przyspieszenie:

$$a = \frac{F_w}{m} = \frac{h}{l} g$$

Wynika z tego, że tym większe jest przyspieszenie ciała, im bardziej stroma jest równia. Wynik nie jest zaskakujący, gdyż potwierdza to, co widzimy na co dzień.

PRZYKŁAD 1.

Obliczmy przyspieszenie, z jakim zsuwa się po pochyłym dachu kawałek śniegu. Dach nachylony jest pod kątem 45° . Tarcie możemy pominąć.

Nie znamy długości ani wysokości dachu, ale do obliczenia przyspieszenia wystarczy nam stosunek tych wielkości. Ponieważ dach jest nachylony pod kątem 45° , to po skorzystaniu z twierdzenia Pitagorasa otrzymamy:

$$l^2 = h^2 + h^2$$

czyli

$$l = h\sqrt{2}$$

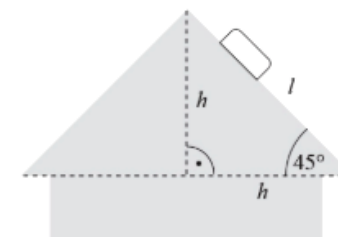
Po wstawieniu do wzoru na przyspieszenie ciała na pochyłości otrzymamy:

$$a = \frac{h}{h\sqrt{2}} \cdot g = \frac{\sqrt{2}}{2} g$$

Po podstawieniu danych:

$$a \approx 0,707 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 6,93 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Przyspieszenie kawałka śniegu wynosi prawie 7 m/s^2 .

**Przypadek 2. Ruch z tarcie**

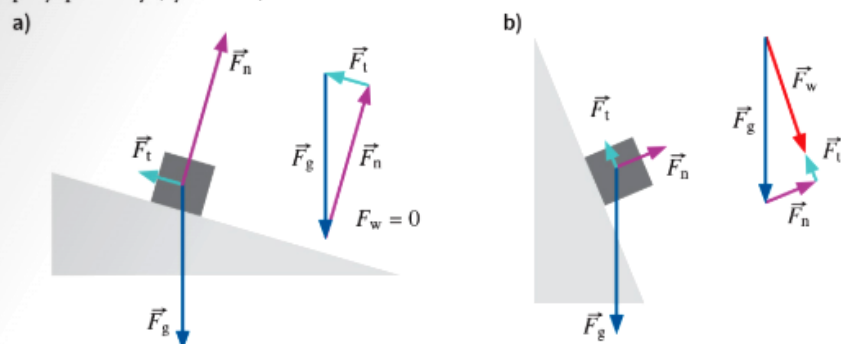
Sytuacja się komplikuje, gdy siły tarcia nie możemy pominąć. Wartość siły tarcia zależy od rodzaju podłoża i jest proporcjonalna do wartości siły nacisku $\vec{F}_n$. Na pochyłej powierzchni siła nacisku $\vec{F}_n$ działająca na ciało zależy od kąta nachylenia: im bardziej jest stromo, tym nacisk jest mniejszy (ryc. 12.7). Z tego powodu zachowanie się ciała na pochyłości będzie zależało od kąta nachylenia.



Ryc. 12.7. Do pomiaru siły nacisku może służyć waga kuchenna lub łazienkowa. Aby uzyskać wynik w niutonach, trzeba wskazania wagi w kilogramach pomnożyć przez przyspieszenie ziemskie g

Przy małym kącie nachylenia, kiedy siła nacisku jest niemal równa ciężarowi, ciało początkowo nieruchome pozostanie w spoczynku, a pchnięte w dół równi będzie się zsuwać ruchem opóźnionym. Przy pewnym kącie nachylenia, zależnym od rodzaju podłoża,

wypadkowa wszystkich sił – ciężkości, nacisku i tarcia – będzie równa zero. Wtedy ciało będzie w spoczynku albo będzie się zsuwać ruchem jednostajnym (ryc. 12.8a). Na stromej powierzchni, gdy siła tarcia będzie mniejsza od wypadkowej sił $\vec{F}_g$ i $\vec{F}_n$, ruch będzie przyspieszony (ryc. 12.8b).



Ryc. 12.8. Siły działające na ciało na równi pochytej. Samochód zastąpiono tu klockiem

Warto zwrócić uwagę, że gdy jest bardzo stromo, to siła tarcia jest mała bez względu na rodzaj powierzchni, gdyż siła nacisku jest mała (ryc. 12.8b) i ciało zawsze będzie się zsuwać. Właśnie z tego powodu strome zbocza gór to lite skały, na których nic się nie może utrzymać.

s. 209

Na stronie 209 znajduje się scenariusz doświadczenia 2., w którym badamy zależność siły nacisku od kąta nachylenia podłoża względem poziomu.

Ryc. 12.9. Tatrzański Park Narodowy. Na stromych stokach siła tarcia jest za mała, aby utrzymać jakiegokolwiek ciało w spoczynku

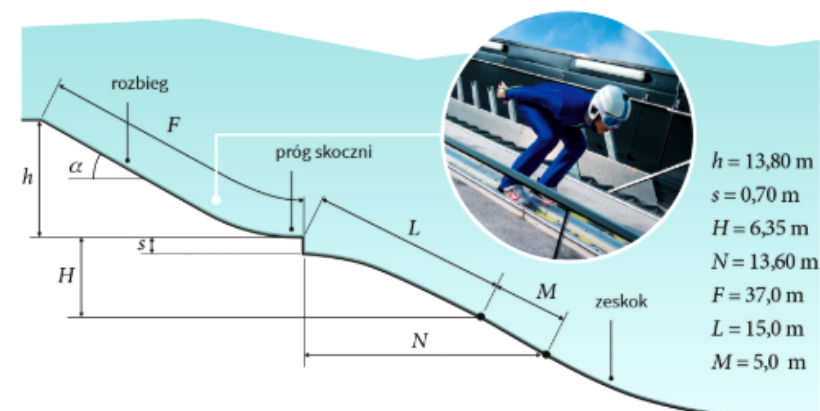


PODSUMOWANIE

- ▶ W warunkach ziemskich ciało porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, gdy siła oporów ruchu jest zrównoważona inną siłą.
- ▶ Przy braku oporów ruchu **przyspieszenie ciała na równi pochytej** jest tym większe, im większy jest kąt nachylenia równi.
- ▶ Na stromych powierzchniach siła nacisku podłoża i siła tarcia działające na ciało są bardzo małe.

PYTANIA I ZADANIA

1. Ruchem jednostajnym przesuwamy stół, na którym leży książka. Narysuj i podaj nazwy sił działających na książkę.
2. Stół, na którym leży książka, przesuwamy ruchem przyspieszonym. Narysuj i podaj nazwy sił działających na książkę.
3. Na rysunku przedstawiony jest projekt skoczni narciarskiej. Odczytaj potrzebne dane i oszacuj przyspieszenie zawodnika na rozbiegu skoczni. Tarcie oraz inne opory ruchu można pominąć.

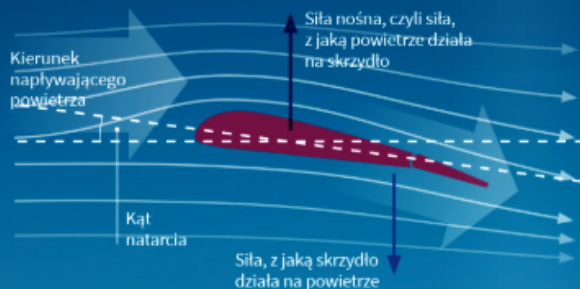


4. Na stromym, równym odcinku drogi rowerzysta bez naciskania na pedały rozpędza się do prędkości 16 m/s w ciągu 20 s. Oblicz przyspieszenie rowerzysty, drogę przebytą podczas rozpędzania oraz różnicę wysokości na tym odcinku drogi. Pomiń opory ruchu i przyjmij prędkość początkową rowerzysty równą 0 m/s.
5. Pochylona deska może służyć do ostrożnego zsuwania przedmiotów. Chcemy, aby worek cementu o masie 25 kg zsunął się po desce na podłogę położoną 1,5 m niżej ruchem jednostajnym. Jakiej długości deski należy użyć? Przyjmij, że siła tarcia działająca na worek wynosi 20 % jego ciężaru.

Fizyka lotu

Podczas lotu na samolot działają siły: ciężkości, nośna, ciągu oraz oporu powietrza.

Siła nośna jest wynikiem oddziaływania skrzydła (i innych powierzchni nośnych) z powietrzem. Siła ta powstaje, gdy skrzydło odchyła strugi powietrza w dół. Im większa jest prędkość samolotu, tym większa jest masa powietrza, które jest popychane w dół. Zgodnie z III zasadą dynamiki powietrze działa na skrzydło siłą zwróconą w górę.



Winglet, czyli wygięta ku górze końcówka skrzydła, przyczynia się m.in. do zmniejszenia oporów powietrza

siła nośna

ciężar

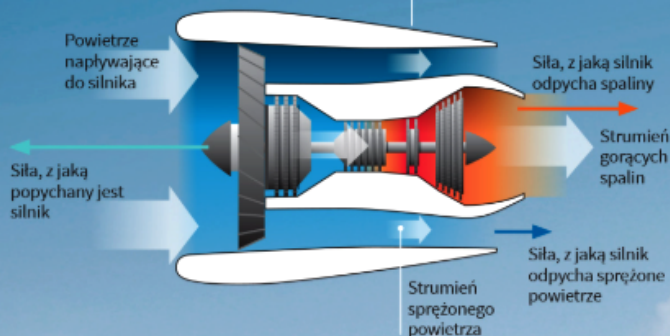
Lot poziomy

Podczas lotu ze stałą prędkością siły działające na samolot się równoważą

siła ciągu

opór powietrza

Silnik turbowentylatorowy



Start



Podczas startu prędkość samolotu jest mniejsza niż podczas lotu na ustalonej wysokości, więc masy powietrza opływające skrzydło w jednostce czasu są mniejsze. Z tego powodu klapy są wysunięte i odchylone mocno w dół, co zwiększa siłę nośną

Zakręt

Wypadkowa siły ciężkości oraz siły nośnej pełni funkcję siły dośrodkowej i powoduje ruch samolotu po łuku w zakręcie



Aby samolot mógł skręcić, musi się przechylić. Uzyskuje się to przez wychylenie łatek na prawym i lewym skrzydle w przeciwnych kierunkach – jednej w górę, a drugiej w dół. Pojawia się wówczas asymetria sił nośnych skrzydeł

Podobny efekt można uzyskać za pomocą spojlerów



Lądowanie

Wychylone spojlerzy zmniejszają siłę nośną, a po przyziemieniu zwiększają nacisk kół na podłoże

Aby skrócić drogę hamowania, w silniku zamyka się dyszę wylotu powietrza i przez otwarcie szczeliny w obudowie silnika kieruje się strumień tego powietrza do przodu



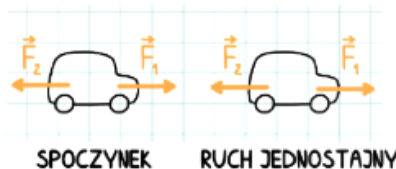
DYNAMIKA

PIERWSZA ZASADA DYNAMIKI

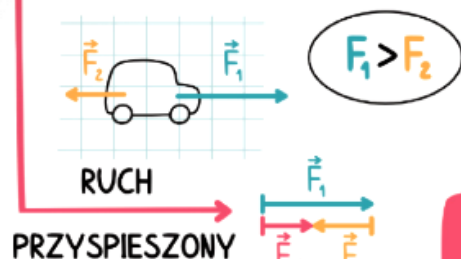
Jeśli siła wypadkowa działająca na ciało jest równa zero (czyli siły działające na ciało równoważą się), to ciało pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Siły równoważą się.

$$F_1 = F_2$$



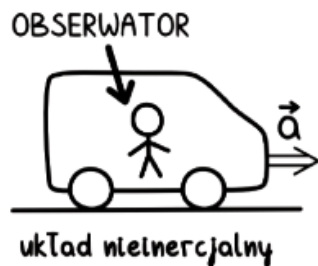
SIŁA WYPADKOWA



DRUGA ZASADA DYNAMIKI

Jeśli siła wypadkowa działająca na ciało jest różna od zera, to ciało porusza się ruchem przyspieszonym, opóźnionym lub skręca. Przyspieszenie ciała jest wprost proporcjonalne do siły wypadkowej, a odwrotnie proporcjonalne do masy ciała.

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



układy odniesienia

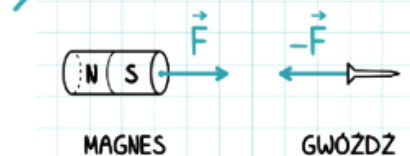


SIŁA BEZWŁADNOŚCI



Działa w układach nieinercyjnych, na przykład w hamującym tramwaju.

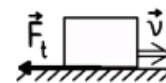
ODDZIAŁYWANIA MIĘDZY CIAŁAMI



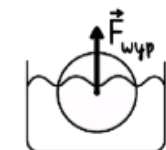
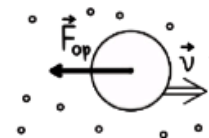
TRZECIA ZASADA DYNAMIKI

Oddziaływania ciał są zawsze wzajemne. Dwa ciała działają na siebie nawzajem siłami tego samego rodzaju, o tej samej wartości, lecz o przeciwnych zwrotach.

siła tarcia



siła oporu



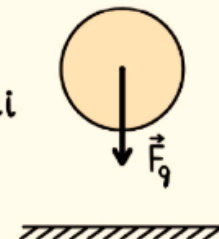
siła wyporu



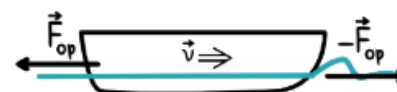
siła nacisku (reakcji podłoża)

siła ciężkości

$$F_g = mg$$

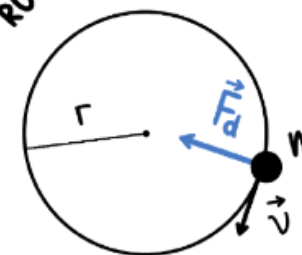


NA ŁÓDKĘ DZIAŁA SIŁA OPORU



WODA JEST POPYCHANA PRZEZ ŁÓDKĘ

RUCH PO OKRĘGU



Siła dośrodkowa $F_d = m \frac{v^2}{r}$ powoduje ruch po okręgu.

Siła $\vec{F}_d$ jest wypadkową sił działających na ciało.

Siła $\vec{F}_d$ jest prostopadła do prędkości.

PYTANIA I ZADANIA

1. Naskicuj trzy różne sytuacje, w których wzajemnie oddziałują dwa ciała. Narysuj i podpisz siły.
2. Jakie są różnice między siłą tarcia a siłą oporu ośrodka?
3. Wioślarz wstaje i idzie w stronę dziobu niezacumowanej łódki.

Wybierz właściwy opis sytuacji A–C oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–2.

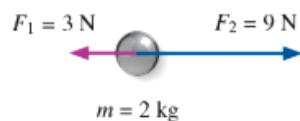
A.	Łódka przesunie się do przodu,	ponieważ	1.	nie działa na nią żadna siła zewnętrzna.
B.	Łódka przesunie się do tyłu,		2.	idący wioślarz działa na nią siłą skierowaną w stronę jej rufy.
C.	Łódka pozostanie w spoczynku,			

4. Julia siedzi na krzeselku karuzeli w odległości 1 m od osi obrotu. Dziewczynka waży 55 kg, a jej prędkość wynosi 5 km/h. Oblicz siłę wypadkową działającą na Julię.

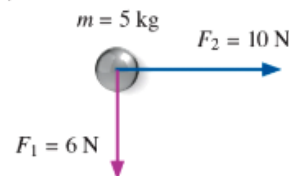


5. Piotr stoi na wadze łazienkowej w windzie. Czy wskazania wagi się zmieniają, gdy winda ruszy w górę (będzie miała przyspieszenie)? Wyjaśnij to z wykorzystaniem pojęcia siły bezwładności.
6. Na rycinach przedstawiono poziome siły działające na ciała o podanych masach, leżące na stole (siła nacisku stołu równoważy ciężar ciała). Narysuj wektor siły wypadkowej działającej na ciało oraz oblicz przyspieszenie ciała w obu przypadkach.

a)



b)



7. Kamil i Paweł stoją na wprost siebie na deskorolkach. Paweł waży dwa razy więcej od Kamila. Kamil ciągnie za linę, która jest przywiązana do Pawła.

Wybierz właściwe dokończenie zdania spośród A–C oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–3.

W wyniku ciągnięcia liny przez Kamila

A.	porusza się tylko Paweł,	ponieważ	1.	masa Pawła jest większa od masy Kamila.
B.	porusza się tylko Kamil,		2.	na obu chłopców działają siły powodujące ich ruch.
C.	poruszają się obaj chłopcy,		3.	tylko ten chłopiec działa siłą na drugiego.

8. Ewa wsiadła do windy, trzymając w ręku ciężką walizkę. Gdy winda ruszała, Ewa poczuła, że walizka stała się nieco lżejsza. Gdy winda po pewnym czasie zwalniała, Ewa odniosła wrażenie, że walizka chwilowo stała się nieco cięższa.

Oceń prawdziwość zdań. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe.

1.	Winda z Ewą poruszała się w górę.	P	F
2.	Im większe było przyspieszenie windy, tym większa była odczuwana przez Ewę zmiana siły, z jaką trzymała walizkę.	P	F

9. Niektóre samoloty wojskowe podczas lądowania używają specjalnych spadochronów powodujących szybsze zatrzymywanie samolotu na pasie lotniska.

Wybierz poprawne dokończenie zdania.

Siła hamująca związana z użyciem spadochronu

- A. rośnie podczas ruchu samolotu na pasie lotniska.
 - B. maleje podczas ruchu samolotu na pasie lotniska.
 - C. jest proporcjonalna do masy samolotu.
 - D. jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości spadochronu.
10. Maciek w momencie podskoku uzyskuje przyspieszenie skierowane do góry o wartości 6 m/s^2 . Oblicz siłę, jaką w tym momencie jego stopy naciskają na podłoże. Masa Maćka to 70 kg.



Najważniejsze pojęcia w dziale

- bezwładność [inertia] 60
- częstotliwość [frequency] 86
- okres [period] 86
- prędkość graniczna [terminal velocity] 83
- przyspieszenie ziemskie [acceleration of free fall] 80
- równia pochyła [inclined plane] 103
- ruch po okręgu [circular motion] 86
- siła [force] 46
- siłomierz [dynamometer] 46
- składanie sił [addition of forces] 55
- swobodne spadanie ciał [free fall] 80
- tarcie kinetyczne [kinetic friction] 74
- tarcie statyczne [static friction] 75
- układ inercjalny [inertial frame] 95
- układ nieinercjalny [non-inertial frame] 95
- zasada bezwładności [law of inertia] 60



ENERGIA I JEJ PRZEMIANY

Czy energia bomby zmienia się podczas jej wybuchu? Czy skakanie z dziesięciometrową tyczką pozwala się wznieść na taką wysokość? Aby opisać powyższe zjawiska, należy zrozumieć, czym jest ENERGIA.

13. Zasada zachowania energii

- Zasada zachowania energii
- Przemiany energii

→ **Przypomnij sobie**, jakie znasz rodzaje energii.

Energia jest pojęciem kluczowym nie tylko w fizyce, lecz także w opisie całej przyrody. W mediach często można natknąć się na wiadomości o „zapotrzebowaniu na energię” lub też o „produkcji energii”, a w filmach popularyzujących naukę na sformułowania typu „materia zamienia się w energię”. Są to określenia co najmniej nieścisłe. Nie jest łatwo zdefiniować energię i może stąd właśnie wynika tak wiele nieporozumień. „Fizyka współczesna nie mówi właściwie, czym jest energia” – stwierdził jeden z najwybitniejszych fizyków XX wieku Richard Feynman. Jednak nie musimy wiedzieć, czym naprawdę jest energia. Fizykom wystarcza umiejętność właściwego posługiwania się pojęciem energii, by mogli wyciągać wnioski ważne dla poznania i ujarzmiania sił przyrody.

Rodzaje energii

Pojęcie oddziaływania jest kluczowe dla opisu zachowania się ciał. Wiemy z dynamiki, że aby zmieniła się prędkość danego ciała, musi na nie zadziałać siła ze strony innego ciała (siła jest miarą oddziaływań między dwoma ciałami).

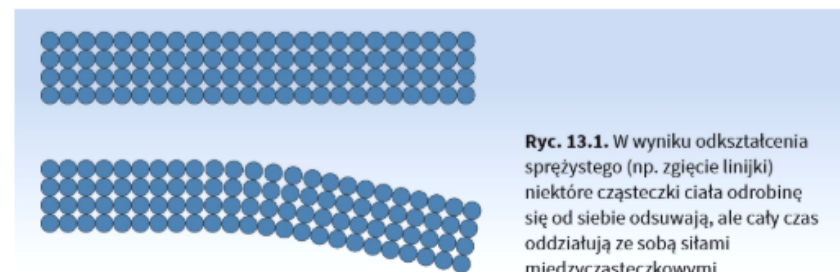
Energia to wielkość fizyczna opisująca zdolność ciał do oddziaływań. Ze względu na różnorodność zjawisk, które możemy opisać i wyjaśnić za pomocą energii, wyodrębniamy kilka jej rodzajów.

Energię kinetyczną mają ciała, które się poruszają.

Energię potencjalną mają ciała, które oddziałują z innymi. Na przykład **energię potencjalną grawitacji** (ciężkości) ma każde ciało oddziałujące grawitacyjnie z Ziemią.

Energię potencjalną sprężystości mają ciała odkształcone sprężystości (przymiotnik „potencjalna” w tych określeniach będziemy często pomijać) – zdolność powrotu ciał do ich pierwotnej postaci wynika z sił wzajemnego oddziaływania cząsteczek (ryc. 13.1). Z cząsteczkową budową ciał fizycznych wiąże się **energia wewnętrzna** danego ciała. Na energię wewnętrzną składa się energia kinetyczna chaotycznego ruchu cząsteczek ciała oraz energia ich wzajemnych oddziaływań.

Energia całkowita to suma wszystkich rodzajów energii danego ciała czy układu ciał. Jednostką energii jest **dżul** (1 J).



Ryc. 13.1. W wyniku odkształcenia sprężystego (np. zgięcie linijki) niektóre cząsteczki ciała odrobinę się od siebie odsuwają, ale cały czas oddziałują ze sobą siłami międzycząsteczkowymi

Zasada zachowania energii

W połowie XIX wieku uczeni doszli do przekonania, że w **układach izolowanych** energia nie znika ani nie bierze się z niczego, tylko zmienia swoją postać. To spostrzeżenie nazywamy zasadą zachowania energii.

Zasada zachowania energii

Energia całkowita układu izolowanego się nie zmienia.

Zwróćmy uwagę, ile rzeczy można przewidzieć na podstawie zasady zachowania energii. Wyobraźmy sobie, że do urzędu patentowego wynalazcy dostarczają projekty urządzeń wytwarzających energię bez żadnego zasilania. Przyjmujący je urzędnik nie musi wnikać w szczegóły, może od razu odrzucić je wszystkie na podstawie zasady zachowania energii.



Ryc. 13.2. Fajerwerki przed odpaleniem i po wystrzeleniu

Ta zasada jednak nie stwierdza, że w układach zamkniętych nic nie może się zmienić. Spójrzmy na ryc. 13.2. Sytuacja przed wystrzałem i po nim różni się zasadniczo. Niemniej możemy bez wahania powiedzieć, że energia całkowita fajerwerków podczas wybuchu w ogóle się nie zmieniła – wybuch spowodowały oddziaływania wewnętrzne

ładunku, żadna siła zewnętrzna w to nie ingerowała. Oddziaływania wewnętrzne spowodowały przemianę: jeden rodzaj energii został przekształcony w inny. W tym przypadku energia wiązań chemicznych materiału wybuchowego fajerwerków zmieniła się między innymi w energię kinetyczną i świetlną.

Praktycznie każde ciało wokół nas oddziałuje z otoczeniem, a wtedy jego energia się zmienia: zupa na talerzu stygnie, gdyż traci energię wewnętrzną; rozkręcone koło rowerowe po jakimś czasie się zatrzyma, a odbijająca się od podłogi piłeczka skacze coraz

s. 213

niżej, aż w końcu przestaje (scenariusz doświadczenia 4., s. 213). Jednak gdy siły zewnętrzne działające na układ są niewielkie, a analizowane zjawiska trwają krótko, wymiana energii z otoczeniem jest tak mała, że możemy ją pominąć i z dobrym przybliżeniem traktować taki układ jako izolowany.

WARTO WIEDZIEĆ

Równoważność masy i energii

Czy możemy obliczyć energię każdego spoczywającego ciała? Okazuje się to stosunkowo proste. W 1905 roku Albert Einstein sformułował najstynniejszy dziś wzór fizyczny:

$$E = mc^2 \quad (1)$$

gdzie:

E – energia całkowita,

m – masa ciała,

c – prędkość światła w próżni.

Z tego wzoru wynika, że energia całkowita każdego ciała będącego w spoczynku jest wprost proporcjonalna do jego masy. W skrócie mówimy o równoważności masy i energii. To odkrycie zasadniczo zmieniło nasze pojmowanie energii i masy. Ponieważ c^2 jest bardzo dużą liczbą ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s), okazało się, że energia ciał w spoczynku ma gigantyczne wartości.

Na przykład obliczymy ze wzoru (1) energię równoważną jednej tonie węgla kamiennego.

$$E = 10^3 \text{ kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 10^3 \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 9 \cdot 10^{19} \text{ J} \approx 10^{20} \text{ J}$$

Zatem jedna tona węgla kryje w sobie olbrzymią energię. Niestety, nie mamy wiedzy, dzięki której moglibyśmy zmienić całą tę energię w postać dla nas użyteczną. Tonę węgla umiemy jedynie spalić, aby uzyskać energię około $2 \cdot 10^7$ J, czyli mniej niż jedną bilionową część energii całkowitej.

Przemiany energii

Co znaczy często używane sformułowanie „produkcja energii”? Przecież zgodnie z zasadą zachowania energii nie można jej wytwarzać. To prawda, ale **w pewnych warunkach można spowodować przemianę jednego rodzaju energii w inny, bardziej dla nas użyteczny**. Na ryc. 13.3 widać elektrownię wiatrową. Wiatraki zamieniają energię kinetyczną wiatru w **energię elektryczną**. Obok widać elektrownię wodną, również „wytwarzającą” energię elektryczną. Jej źródłem jest w tym przypadku energia grawitacji wody.

Na opakowaniach produktów spożywczych podawana jest ich wartość energetyczna (ryc. 13.4). Nie jest to oczywiście całkowita energia pożywienia, lecz tylko ta jej część, którą nasz organizm potrafi przemienić w energię dla siebie użyteczną. W kolejnych tematach tego działu przeanalizujemy różne przemiany energetyczne i ich związek z wykonywaniem pracy. Zagadnienia związane z energią są tak istotne, że wielokrotnie będziemy do nich wracać podczas omawiania różnych procesów i zjawisk fizycznych.

Ryc. 13.4. Na produktach spożywczych podawana jest ich wartość energetyczna, czyli ilość energii, która może być wykorzystana w naszym organizmie



Ryc. 13.3. W energetyce wykorzystuje się energię mechaniczną wiatru i wody



PODSUMOWANIE

- ▶ **Energia** jest wielkością fizyczną opisującą zdolność układu do oddziaływań.
- ▶ **Zasada zachowania energii**: całkowita energia układu izolowanego jest stała.
- ▶ W procesach zachodzących w przyrodzie i technice następują **przemiany** jednego rodzaju **energii** w inny.

PYTANIA I ZADANIA

1. Franek zbudował układ, w którym prądnica napędzana jest silnikiem elektrycznym zasilanym tą prądnicą. Franek twierdzi, że przy odpowiednim przełożeniu raz zakręcony silnik będzie działał bez przerwy. Czy układ rzeczywiście będzie działał? Odpowiedź uzasadnij.
2. Pracujący odkurzacz nagrzewa się i hałasuje. Wymień co najmniej trzy rodzaje energii, na jakie zmienia się energia elektryczna podczas odkurzania.
3. Człowiek musi dostarczać do organizmu energię nawet, jeżeli nie jest aktywny fizycznie. Na co przetwarzana jest w organizmie człowieka energia pożywienia?
4. Większość energii elektrycznej wytwarzanej w elektrowniach ma swoje źródło w energii słonecznej. Czy ta teza jest prawdziwa? Uzasadnij odpowiedź.
5. W każdym samochodzie osobowym silnik napędza prądnicę, która ładuje akumulator i zasila różne urządzenia elektryczne. Samochody wyposażone są w komputer, który wyświetla na desce rozdzielczej niektóre parametry pracy silnika.



Na zdjęciu z numerem 1 wyświetlacz pokazuje chwilowe zużycie paliwa w przeliczeniu na 1 godzinę pracy silnika, gdy samochód stoi z włączonym silnikiem (silnik pracuje „na luzie”). Na zdjęciu z numerem 2 pokazano sytuację, w której kierowca włączył ogrzewanie tylnej szyby – wskazania zużycia paliwa wzrosły.

- a) Wyjaśnij przyczynę wzrostu zużycia paliwa.
- b) Oszacuj dodatkową energię czerpaną ze spalania paliwa potrzebną do ogrzewania tylnej szyby w samochodzie przez 5 minut. Ze spalania 1 l benzyny uzyskujemy około 40 MJ energii.



14. Praca i moc

- Praca
- Moc

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o pracy mechanicznej i mocy.

Energia całkowita układu izolowanego nie zmienia się – to treść zasady zachowania energii. Jednak praktycznie wszystkie ciała oddziałują ze sobą wzajemnie, nie są zatem układami izolowanymi. Możliwe są więc zmiany ich energii. Jednym ze sposobów zmiany energii jest praca.

Praca jako przekaz energii

Energia układu może się zmienić, gdy działaniu siły zewnętrznej towarzyszy przemieszczenie części lub całości układu. Mówimy wtedy, że siła wykonuje pracę nad układem (lub nad ciałem).

Przyrost energii układu jest równy wykonanej nad układem pracy:

$$\Delta E = W \quad (1)$$

Przyrost energii jest różnicą energii końcowej i początkowej układu:

$$\Delta E = E_2 - E_1$$

Wzór (1) określa, jak można zmienić energię układu. Siła zewnętrzna musi nad nim wykonać pracę. Wzór (1) wyraża też zasadę zachowania energii. Wynika z niego, że jeśli siły zewnętrzne nie wykonują pracy nad układem, przyrost jego energii jest równy zeru, czyli energia końcowa jest równa początkowej:

$$E_2 = E_1$$

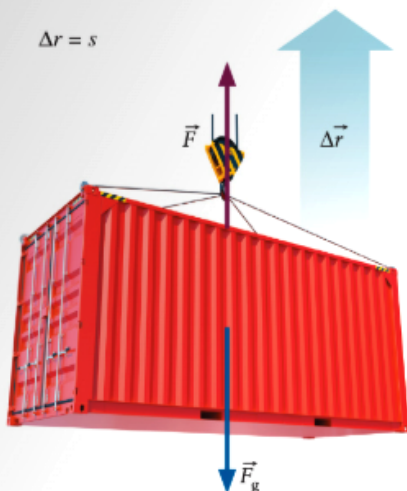
Jak można obliczyć pracę? Rozważmy trzy przypadki ruchu prostoliniowego. W tym ruchu wartość przemieszczenia Δr jest równa przebytej drodze s .

Przypadek 1. Siła skierowana tak jak przemieszczenie

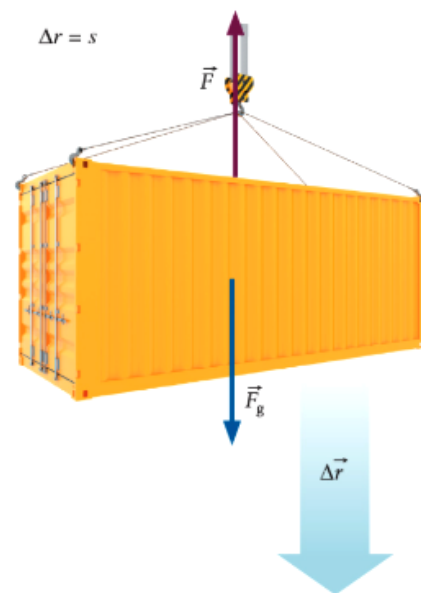
Dźwig podnosi kontener ruchem jednostajnym do góry (ryc. 14.1).

Wykonana praca jest iloczynem wartości stałej siły F i drogi s :

$$W = F \cdot s \quad (2)$$



Ryc. 14.1. Dźwig podnosi kontener



Ryc. 14.2. Dźwig opuszcza kontener

Pracę wykonuje zawsze konkretna siła. W tym przypadku jest to siła, z jaką lina dźwigu działa na kontener. Praca ta zwiększa energię grawitacji kontenera zgodnie ze wzorem (1). Pracę wykonaną przez siłę $\vec{F}$ możemy dość łatwo obliczyć. Z I zasady dynamiki wiemy, że ta siła musi równoważyć ciężar kontenera, więc:

$$F = mg$$

Jeśli dźwig podnosi kontener na wysokość h , to wykonana przez niego praca wynosi:

$$W = F \cdot s = mgh$$

Zgodnie ze wzorem (1) o tyle właśnie wzrosła energia grawitacji kontenera:

$$\Delta E_g = mgh \quad (3)$$

Przypadek 2. Siła działa przeciwnie do przemieszczenia

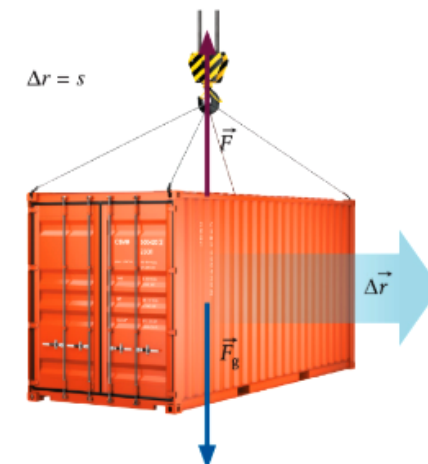
Dźwig opuszcza kontener ruchem jednostajnym (ryc. 14.2). Z I zasady dynamiki wynika, że również w tym przypadku na kontener musi działać siła skierowana do góry, która będzie równoważyła jego ciężar. Energia grawitacji kontenera w trakcie opuszczania maleje, zatem energia końcowa jest mniejsza od początkowej, czyli przyrost energii jest ujemny. Zgodnie ze wzorem (1) praca siły podtrzymującej kontener też musi być ujemna. Siła i przemieszczenie są wektorami, a praca zależy nie tylko od ich wartości, lecz także od ich wzajemnego ustawienia. Gdy te wektory są skierowane przeciwnie (ryc. 14.2), pracę siły $\vec{F}$ należy obliczać ze wzoru:

$$W = -F \cdot s \quad (4)$$

Warto zauważyć, że siła oporu ruchu jest skierowana przeciwnie do przemieszczenia ciała i wykonuje pracę ujemną. Oznacza to również, że – zgodnie ze wzorem (1) – zmniejsza energię całkowitą poruszającego się ciała.

Przypadek 3. Siła prostopadła do przemieszczenia

Rozważmy przypadek przesuwania kontenera, tym razem poziomo (ryc. 14.3). Jeśli ruch ma być jednostajny, na kontener musi działać dokładnie taka sama siła jak w dwóch poprzednich przypadkach. Teraz siła i przemieszczenie są do siebie prostopadłe. Energia grawitacji kontenera nie zmienia się. Czyżby zatem ze wzoru (1) wynikało, że praca naszej siły wynosi zero? Tak rzeczywiście jest. Siła prostopadła do przemieszczenia nie wykonuje pracy. Znow możemy wyciągnąć przydatne wnioski: **siła prostopadła do przemieszczenia, czyli do toru ruchu, nie zmienia energii ciała**. Na przykład siła nacisku podłoża działająca na poruszające się auto jest prostopadła do kierunku ruchu i dlatego nie zmienia energii auta.



Ryc. 14.3. Dźwig przesuwa kontener poziomo

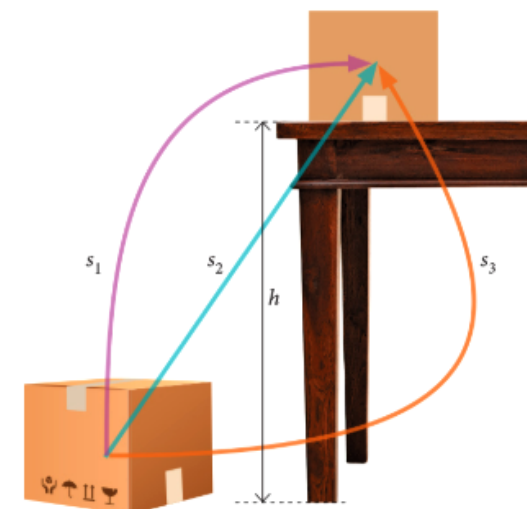
Zgodnie ze wzorem (1) możemy traktować pracę jako przekaz energii z jednego ciała do drugiego. Jeśli jedno ciało działa siłą na drugie i przesuwa je, przekazuje mu część swojej energii. Na przykład dźwig podnoszący kontener przekazuje mu część energii elektrycznej dostarczonej przez elektrownię. Gdy podnosimy plecak, przekazujemy mu część energii nagromadzonej w naszych mięśniach. Energię można rozumieć jako zdolność do wykonania pracy.

PRZYKŁAD 1.

Kasia chce przenieść paczkę z podłogi na stół. Po którym z zaznaczonych torów powinna przenosić paczkę, aby wykonać przy tym jak najmniejszą pracę? Zakładamy, że w tej sytuacji można pominąć opory ruchu.

Aby obliczyć pracę wykonaną przez Kasię na każdej z dróg, należałoby skorzystać z bardziej ogólnego wzoru na pracę, który wymaga zaawansowanego aparatu matematycznego. Ze wzorów (1) i (3) można jednak wysnuć wniosek, że wykonana przez Kasię praca będzie na każdej trasie taka sama, gdyż na każdej z nich paczka pokona tę samą różnicę wysokości h . Nie ma zatem znaczenia, czy tor ruchu będzie miał długość s_1 , s_2 , czy s_3 . Na każdej trasie wykonana przez Kasię praca będzie równa:

$$W = mgh$$



WARTO WIEDZIEĆ

Perpetuum mobile

Co najmniej od średniowiecza ludzie próbowali opracować urządzenie, które by wykonywało dla nas pracę „za darmo”. Taki wiecznie pracujący bez paliwa silnik nosi intrygującą łacińską nazwę *perpetuum mobile*, co znaczy wiecznie poruszające się. Jeden z projektów tego typu urządzenia przedstawiono na nagrobku wybitnego uczonego Stevina, zmarłego w XVII wieku (ryc.). Liczby określają długości boków trójkąta.

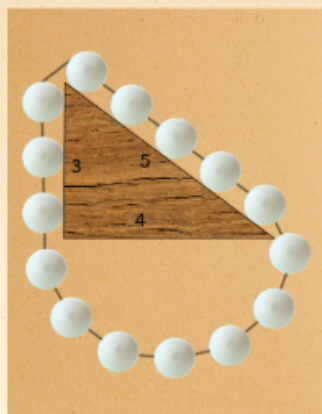
Nieznani wynalazcy twierdzili, że pięć kul na pochyłości z prawej strony ma większy ciężar od trzech kul ze strony lewej i dlatego te „korale” będą się ciągle same rozpędzać w prawo (ku pochyłości). Niestety, tak się nie dzieje.

Spróbujmy ustalić, czy rzeczywiście siła powodująca zsuwanie pięciu kul z prawej strony jest większa od ciężaru trzech kul z lewej strony. Pomocne będzie rozumowanie przeprowadzone w rozdziale 12. pod ryciną 12.6. Wynika z niego, że siła wypadkowa zsuwająca jedną kulę o masie m z pochyłości wynosi:

$$F = \frac{h}{l} mg$$

W naszym przypadku $\frac{h}{l}$ to $\frac{3}{5}$, więc siła wypadkowa działająca na jedną kulę ma wartość równą $\frac{3}{5}$ jej ciężaru. Wobec tego na pięć kul działa siła $F = 5 \cdot \frac{3}{5} mg = 3 mg$. Siła ta dokładnie równoważy ciężar trzech kul z lewej strony! Zatem to urządzenie mogłoby się co najwyżej poruszać ruchem jednostajnym przy braku wszelkich oporów ruchu. O żadnym napędzaniu nie ma mowy.

Na podstawie zasady zachowania energii można od razu stwierdzić, że takie urządzenie nie może działać. Gdyby bowiem rzeczywiście kule się rozpędzały, ich energia związana z ruchem, czyli energia kinetyczna, ciągle by rosła. Nie ma jednak żadnego źródła tej energii – na nasz układ nie działa żadna siła zewnętrzna (siła grawitacji jest siłą wewnętrzną w układzie kule–Ziemia, w którym rozważamy energię grawitacji). Kule nie przyspieszają.



Moc jako szybkość przekazywania energii

Czasami istotne jest to, jak szybko wykonywana jest praca. Przypuśćmy, że ważący tyle samo Antek i Maciek wchodzi na to samo piętro, ale Antkowi zajmuje to znacznie mniej czasu niż Maćkowi. Obaj wykonują tę samą pracę, ale z różną **mocą**. Moc to stosunek wykonanej pracy do czasu, w którym została ona wykonana:

$$P = \frac{W}{t}$$

(5)

gdzie:

P – moc, W – wykonana praca, t – czas wykonania pracy.

Moc informuje nas o pracy wykonanej w jednostce czasu. Wielkości tej używamy najczęściej w odniesieniu do różnych urządzeń. Podstawową jednostką mocy jest wat:

$$1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}} = \frac{1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}}{1 \text{ s}}$$

Urządzenie ma moc jednego wata, jeśli w ciągu jednej sekundy wykonuje pracę jednego dżula. W praktyce często używa się jednostek większych, np. $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$ oraz $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$.

PRZYKŁAD 2.

Obliczmy moc Karola ważącego 70 kg, gdy wspina się po ustawionej pionowo drabinie z prędkością 0,5 m/s.

Zakładamy, że Karol wchodzi na drabinę jednostajnie, zatem drabina musi na niego działać siłą równoważącą ciężar jego ciała:

$$F = mg$$

Nie podano tu czasu wchodzenia, ale nie jest on konieczny do obliczenia mocy.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot \frac{s}{t} = F \cdot v$$

Wykorzystaliśmy tutaj wzór na prędkość:

$$v = \frac{s}{t}$$

Wobec tego:

$$P = mgv = 70 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 340 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 340 \text{ W}$$

Skoro praca jest równa przyrostowi energii, to moc można wyrazić wzorem:

$$P = \frac{\Delta E}{t} \quad (6)$$

Wobec tego moc można traktować jako szybkość przekazywania energii. Na przykład tzw. próg słyszalności, czyli minimalne natężenie dźwięku, jaki możemy usłyszeć, wynosi dla przeciętnego ludzkiego ucha 10^{-12} W/m^2 . To oznacza, że fala dźwiękowa przenosi w ciągu każdej sekundy energię 10^{-12} J przez powierzchnię prostopadłą do kierunku rozchodzenia się fali o polu 1 m^2 . To oznacza, że nasze ucho jest bardzo czułe. Próg bólu, czyli natężenie dźwięku powodujące ból, to tylko 1 W/m^2 .

Z kolei promieniowanie Słońca docierające do powierzchni Ziemi przy bezchmurnym niebie ma natężenie ok. 1000 W/m^2 , czyli 1 kW/m^2 . Oznacza to, że powierzchnia o polu 1 m^2 ustawiona prostopadłe do promieni słonecznych może pochłonąć w każdej sekundzie energię o wartości 1000 J ! Nic dziwnego, że coraz skuteczniej próbuje się tę „darmową” energię wykorzystywać do wytwarzania prądu elektrycznego czy choćby podgrzewania wody w domach.

PODSUMOWANIE

- ▶ **Praca** wykonana nad układem przez siłę zewnętrzną jest równa **przyrostowi energii** układu:

$$W = \Delta E$$

- ▶ Jeśli stała siła jest skierowana w tę samą stronę co przemieszczenie, wykonana praca jest iloczynem wartości siły i przemieszczenia:

$$W = F \cdot s$$

- ▶ Gdy siła działa przeciwnie do przemieszczenia, pracę obliczamy ze wzoru:

$$W = -F \cdot s$$

- ▶ Siła prostopadła do przemieszczenia nie wykonuje pracy.
- ▶ **Moc** to stosunek wykonanej pracy do czasu, w którym została ona wykonana:

$$P = \frac{W}{t}$$

- ▶ **Praca** to przekaz energii, a **moc** to szybkość tego przekazu.

PYTANIA I ZADANIA

1. Słońce przyciąga Ziemię siłą grawitacji, co powoduje jej ruch po orbicie wokółsłonecznej. Możemy przyjąć, że orbita jest okręgiem. Czy siła grawitacji pochodząca od Słońca wykonuje nad Ziemią pracę? Odpowiedź uzasadnij.
2. W najwyższym budynku we Wrocławiu (Sky Tower, wysokość 206 m) odbywa się corocznie Sky Tower Run, czyli bieg z poziomu ulicy na taras widokowy na 49. piętrze. Rekord wynosi 4 minuty 52 sekundy (dane z 2018 roku). Zawodnicy mają do pokonania 1142 stopnie schodów, a łączna wysokość tych stopni to 200 m. Załóżmy, że rekordzista ważył 70 kg. Oblicz:
 - a) pracę, którą musiał wykonać w trakcie biegu,
 - b) wzrost jego energii grawitacji w trakcie biegu,
 - c) jego średnią moc.
3. Samochody ciężarowe mają silniki o mocach rzędu 300 kW, a samochody osobowe zazwyczaj są wyposażone w silniki o mocach mniejszych niż 100 kW. Dlaczego zatem podczas jazdy pod górę samochody osobowe często bez większego trudu wyprzedzają samochody ciężarowe?
4. Ojciec z synem szli z Zakopanego na Kasprowy Wierch. Ojciec przy wzroście 1,85 m ma masę 95 kg, a syn mierzący 192 cm wzrostu waży 86 kg. Obaj dotarli na szczyt w jednakowym czasie. Moc którego z nich podczas marszu była większa?
5. Skuter jedzie z prędkością 50 km/h. Silnik pracuje wtedy z mocą 4 kW. Oblicz wartość siły oporu ruchu.



15. Energia grawitacji i energia kinetyczna

- Energia grawitacji
- Energia kinetyczna

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o energii grawitacji i energii kinetycznej.

Osiemnastego stycznia 2017 roku na położony w górach włoski ośrodek wypoczynkowy Farindola zeszła potężna lawina. Zginęli ludzie, zniszczonych zostało wiele budynków. Przyczyną tragedii było uwolnienie ogromnej energii grubych pokładów śniegu zalegającego nad miastem (ryc. 15.1).



Ryc. 15.1. Zniszczenia spowodowane zejściem lawiny śnieżnej we Włoszech

Gdyby te zwały śniegu zalegały w mieście, nie doszłoby do tragedii. Jednak znajdowały się one na pewnej wysokości i względem poziomu miasta miały ogromną energię, którą nazywamy **energią potencjalną grawitacji**.

Energia potencjalna grawitacji

Wszystkie ciała na Ziemi mają energię grawitacji, ponieważ oddziałują z Ziemią. Jest to energia układu Ziemia–ciało, gdyż wynika z grawitacyjnego oddziaływania Ziemi i danego ciała. Ponieważ nie obserwujemy skutków oddziaływania małego ciała na całą kulę ziemską, to ciału przypisujemy umownie energię grawitacji układu.

Energia grawitacji zależy od ciężaru ciała i odległości między tym ciałem a Ziemią. Na przykład śnieg zalegający na ulicach nie grozi zniszczeniem miasta – energia grawitacji takiego śniegu względem poziomu miasta wynosi zero. Jednak energia grawitacji śniegu zalegającego nad miastem może być bardzo duża.

Energię grawitacji obliczamy ze wzoru:

$$E_g = mgh$$

(1)

gdzie:

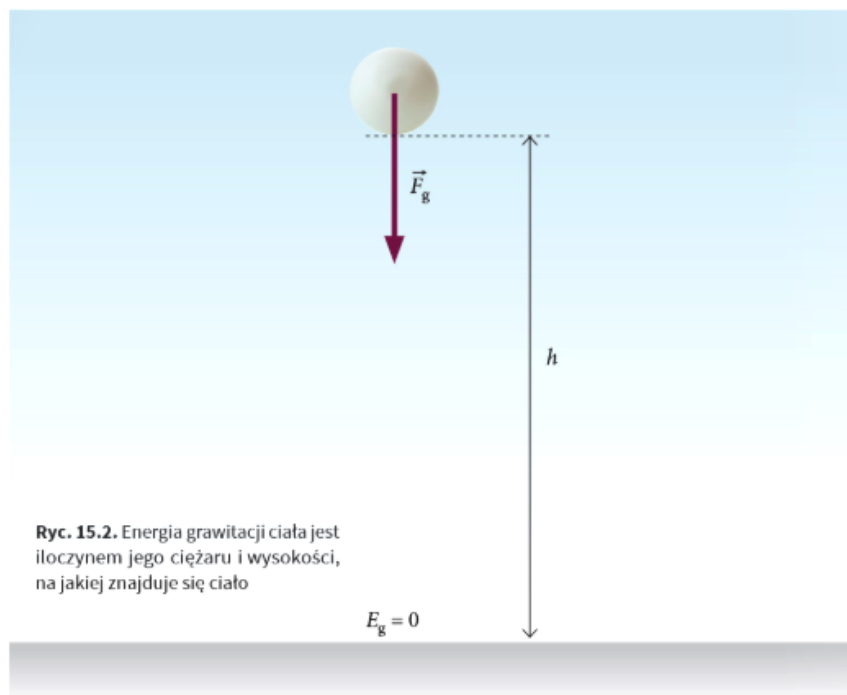
m – masa ciała,

g – przyspieszenie ziemskie,

h – wysokość, na jakiej ciało się znajduje, mierzona od pewnego umownego poziomu.

Wzór ten stosujemy wyłącznie wtedy, gdy h jest znacznie mniejsze od promienia Ziemi.

Poziom, dla którego przyjmujemy zerową energię grawitacji, może być dowolny, ale dobrze jest przyjąć taki, dla którego analiza zjawisk będzie najprostsza. Najczęściej jako poziom zerowy przyjmujemy ten, na którym ciało było lub będzie najniżej w omawianym zjawisku (ryc. 15.2).



PRZYKŁAD 1.

Franek postawił na krawędzi studni kubek. Odwrócił się i niechący strącił kubek do wody.

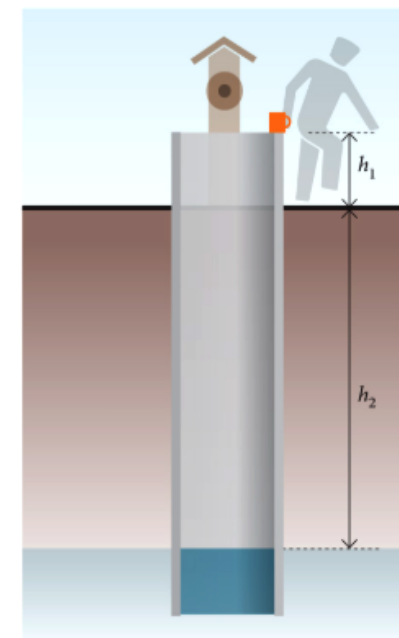
Obliczmy energię grawitacji kubka, gdy stał na cembrowinie oraz gdy wpadał do wody.

Lustro wody znajdowało się 6 m poniżej powierzchni ziemi, wysokość cembrowiny wynosiła 0,8 m, a masa kubka była równa 0,2 kg.

Jako poziom zerowy energii grawitacji przyjmijmy położenie lustra wody w studni. Wtedy energia grawitacji kubka stojącego na krawędzi studni będzie równa:

$$\begin{aligned} E_{g1} &= mg(h_1 + h_2) = \\ &= 0,2 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (6 \text{ m} + 0,8 \text{ m}) \approx 13 \text{ J} \end{aligned}$$

W momencie, gdy kubek wpadał do wody, jego energia grawitacji $E_{g2} = 0$, gdyż wówczas znajdował się on na ustalonym wcześniej poziomie zerowym.



Jak zapewne zauważyliście, samo posiadanie energii grawitacji przez ciało nie wiąże się z żadną jego aktywnością. Dopiero przekształcenie tej energii w inną, najczęściej związaną z ruchem, prowadzi do widocznych zmian.

Energia kinetyczna

Każde poruszające się ciało ma energię ruchu, nazywaną **energią kinetyczną**. W naszym przykładzie z początku rozdziału to właśnie energia kinetyczna lawiny uczyniła takie spustoszenie. Energia grawitacji zalegającego wysoko śniegu przekształciła się w jego energię kinetyczną.

Ryc. 15.3. Na niektórych lotniskowcach samoloty uzyskują energię kinetyczną kosztem energii wewnętrznej pary wodnej stosowanej w katapultach



DOŚWIADCZENIE 1.

Podczas jazdy samochodem poproś, aby kierowca przełączył komputer auta w tryb wyświetlania chwilowego zużycia paliwa. Porównaj wskazania komputera w sytuacjach, gdy samochód rusza z miejsca oraz gdy jedzie ze stałą prędkością. Wyjaśnij różnicę we wskazaniach z odwołaniem się do pojęcia energii kinetycznej.

Energię kinetyczną ciała obliczamy ze wzoru:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

gdzie:

m – masa poruszającego się ciała,

v – prędkość ciała.

Należy pamiętać, że energia określa stan układu, a nie sposób dojścia do tego stanu. Nie ma znaczenia, czy rozpędzanie ciała trwało długo, czy krótko. Znaczenie mają tylko prędkość, jaką ciało uzyskuje, a także jego masa.

PRZYKŁAD 2.

Na wysokości 630 km nad powierzchnią Ziemi krąży polski sztuczny satelita o nazwie Heweliusz. Należy on do flotyli mikrosatelitów programu badawczego BRIT. Prędkość, z jaką okrąży Ziemię, wynosi 7,6 km/s. Masa satelity to zaledwie 6 kg. Obliczmy energię kinetyczną tego satelity. W tym celu warto skorzystać z notacji wykładniczej, o której można przeczytać w niezbędniku matematycznym.

Podstawiamy dane liczbowe do wzoru:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 6 \text{ kg} \cdot \left(7,6 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \approx 1,7 \cdot 10^8 \text{ J}$$

Dla porównania obliczmy energię kinetyczną samochodu ciężarowego o masie 30 ton, jadącego z prędkością 100 km/h.

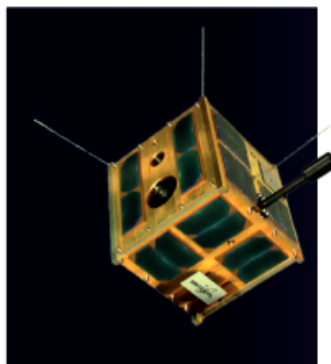
Po zamianie jednostek mamy:

$$m_{\text{tir}} = 3 \cdot 10^5 \text{ kg}, v_{\text{tir}} \approx 27,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$E_{k \text{ tir}} = \frac{1}{2}m_{\text{tir}} \cdot v_{\text{tir}}^2 = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \left(27,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \approx 1,2 \cdot 10^7 \text{ J}$$

Mimo że masa mikrosatelity jest nieduża, to jego energia kinetyczna jest ponad 15 razy większa od energii dużej ciężarówki pędzącej z prędkością 100 km/h.

Energia kinetyczna, tak jak prędkość ciała, zależy od układu odniesienia. Najlepiej wybrać układ, w którym analiza zjawisk jest najprostsza. Na przykład energię kinetyczną rowerzysty czy samochodu wygodniej jest analizować względem powierzchni Ziemi niż względem przelatującego samolotu.

**PODSUMOWANIE**

- ▶ **Energię potencjalną grawitacji** ma ciało znajdujące się na pewnej wysokości.
- ▶ Przy powierzchni Ziemi energię grawitacji obliczamy ze wzoru:

$$E_g = mgh,$$

gdzie h to wysokość, na jakiej się znajduje ciało względem poziomu przyjętego za zerowy.

- ▶ Poruszające się ciało ma **energię kinetyczną**.
- ▶ Energię kinetyczną obliczamy ze wzoru:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

PYTANIA I ZADANIA

1. Prędkość, z którą samolot Boeing 737 odrywa się od pasa startowego, jest równa 80 m/s. Samolot po starcie znalazł się na wysokości 8 km względem poziomu lotniska. Oblicz, ile razy energia potencjalna grawitacji tego samolotu jest teraz większa od jego energii kinetycznej w czasie startu, jeżeli ma on masę 41 ton.

2. Prąd strumieniowy to intensywny, dość wąski (grubość ok. 2 km) strumień przenoszący olbrzymie masy powietrza w atmosferze ziemskiej. Ta strefa bardzo silnych wiatrów występuje średnio na wysokości 10 km. Średnia prędkość wiatru w prądzie strumieniowym to ok. 30 m/s, ale może ona przekraczać nawet 150 m/s.

Oblicz średnią energię grawitacji (względem powierzchni ziemi) i średnią energię kinetyczną balonu meteorologicznego (fot.) o masie 1,2 kg, który dostał się w obszar prądu strumieniowego (balony meteorologiczne wynoszą w wysokie warstwy atmosfery aparaturę pomiarową).

3. Samochód osobowy o masie 1000 kg jechał za traktorem z prędkością 10 m/s i jego kierowca postanowił wyprzedzić traktor. Podczas wyprzedzania prędkość auta wzrosła dwukrotnie. O ile wzrosła energia kinetyczna samochodu?
4. Powietrze nagrzane od podłoża unosi się do góry (zjawisko konwekcji) i zwiększa tym samym swoją energię grawitacji. Kosztem jakiego rodzaju energii rośnie energia grawitacji masy powietrza?
5. Samochód o masie m rusza z miejsca ze stałym przyspieszeniem i po czasie t uzyskuje prędkość v . Skorzystaj z II zasady dynamiki oraz ze wzoru $W = \Delta E$ i wyprowadź wzór na energię kinetyczną samochodu.



Energia w transporcie

Gdy chcemy transportować towary na duże odległości, musimy zdecydować, co jest ważniejsze: krótki czas dostawy czy niski koszt transportu.



Kilowatogodzina

Kilowatogodzina (kWh) jest jednostką energii powszechnie stosowaną w rozliczeniach za energię elektryczną. Jest to energia, jaką urządzenie o mocy 1000 W pobierze w czasie godziny pracy.

1 kWh

100 kg



Ile kosztuje energia?

1 kWh to energia wystarczająca do włożenia wózka o masie 100 kg na górę o wysokości 3600 m (jeśli pominiemy opory ruchu). Koszt 1 kWh to ok. 55 groszy. Oznacza to, że współczesna cywilizacja dała nam dostęp do relatywnie tanich źródeł energii.



Porównanie wielkości kontenerowca i Boeinga 747-8F. Aby przetransportować samolotem tę samą ilość towaru, trzeba by wykonać kilka tysięcy lotów

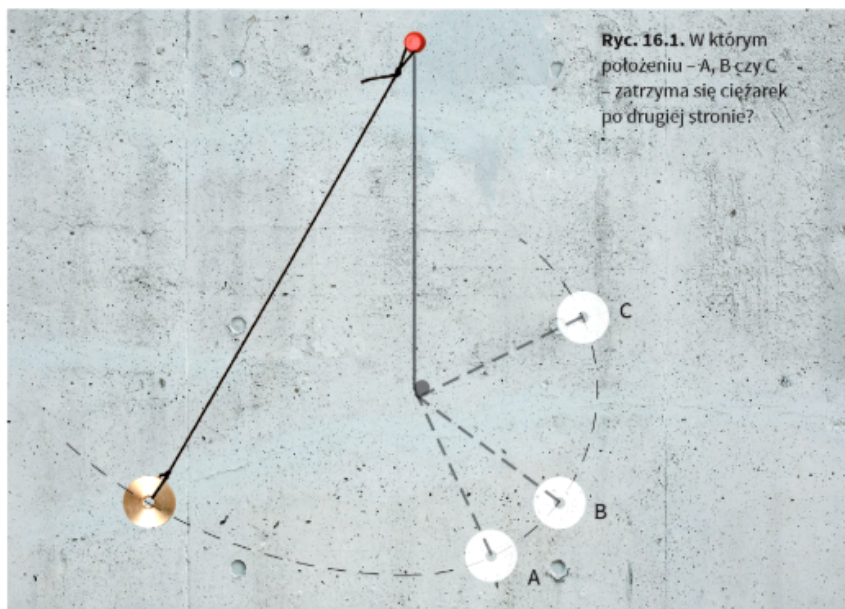


16. Zasada zachowania energii mechanicznej

- Energia mechaniczna
- Zasada zachowania energii mechanicznej

→ Przypomnij sobie zasadę zachowania energii.

Ciężarek na sznurku, czyli wahadło, porusza się ruchem drgającym. Z obserwacji wiemy, że po jednej i po drugiej stronie położenia równowagi ciężarek unosi się na tę samą wysokość. Gdyby w trakcie ruchu sznurek o coś zahaczył, to czy ciężarek zatrzyma się na tej samej wysokości? A może niżej albo wyżej (ryc. 16.1)? Bardzo trudno odpowiedzieć na to pytanie z odwołaniem się tylko do zasad dynamiki Newtona.



Energia mechaniczna

Przeanalizujmy najpierw prostsze zjawisko. Wyobraźmy sobie jabłko o masie 0,2 kg wiszące na gałęzi na wysokości H nad ziemią. W pewnym momencie jabłko odrywa się od gałęzi i spada swobodnie. Jego prędkość początkowa wynosi zero, tyle też wynosi

jego energia kinetyczna. Jednak na początku ruchu jabłko jest na pewnej wysokości, ma więc energię grawitacji:

$$E_g = mgH$$

Gdy jabłko wpada w trawę, jego energia grawitacji wynosi zero. A jaką wartość ma wówczas energia kinetyczna? Jabłko spada z przyspieszeniem, więc prędkość końcową obliczymy ze wzoru (2) z rozdziału 4.

$$v^2 = 2as$$

Przyspieszenie jabłka jest równe przyspieszeniu ziemskiemu, drogę spadku swobodnego jabłka oznaczamy literą H i otrzymujemy:

$$v^2 = 2gH$$

Otrzymane wyrażenie podstawiamy do wzoru na energię kinetyczną:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \cdot 2gH = mgH$$

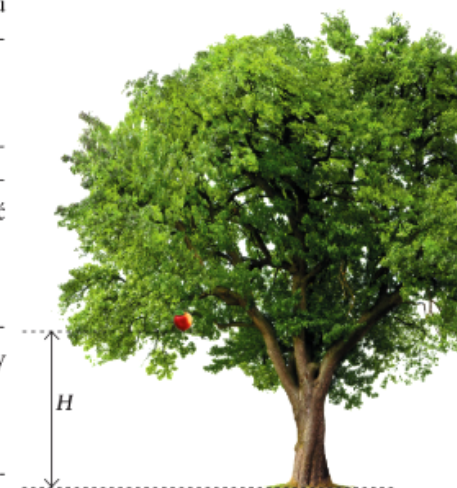
Widzimy, że końcowa energia kinetyczna jabłka jest równa jego początkowej energii grawitacji. Gdy jabłko spada, jego energia grawitacji maleje, rośnie natomiast energia kinetyczna, ale całkowita energia się nie zmienia. Jest to zrozumiałe. Siła ciężkości działająca na jabłko jest siłą wewnętrzną układu jabłko–Ziemia, a jak wiemy, siły wewnętrzne nie zmieniają energii układu.

Sumę energii kinetycznej i potencjalnej ciała (np. energii grawitacji czy sprężystości) nazywamy **energiją mechaniczną**. W procesach, w których zmieniają się tylko energia kinetyczna i energia potencjalna, zasada zachowania energii sprowadza się do zasady zachowania energii mechanicznej.

Zasada zachowania energii mechanicznej

Jeśli na ciało działają tylko siły związane z jego energią potencjalną (np. siły grawitacji lub sprężystości), to energia mechaniczna tego ciała się nie zmienia.

Teraz odpowiedź na pytanie z początku rozdziału o położenie wahadła staje się prosta: przy braku oporów ruchu ciężarek zatrzyma się na tej samej wysokości co po przeciwnej stronie, czyli w punkcie B. W ruchu wahadła energia grawitacji zmienia się w kinetyczną i odwrotnie, ale suma tych dwóch rodzajów energii jest cały czas taka sama. Co prawda na ciężarek działa również siła pochodząca od sznurka, ale jest ona w czasie ruchu cały czas prostopadła do chwilowego przemieszczenia ciężarka, więc nie wykonuje pracy, a zatem nie zmienia energii wahadła. Ciężarek zatrzymałby się na innej wysokości tylko wtedy, gdyby zmieniła się energia wahadła.



WARTO WIEDZIEĆ

Przemiany energii mechanicznej

Z równań ruchu przyspieszonego potrafimy obliczyć prędkość jabłka w dowolnym momencie ruchu:

$$v = gt$$

Drogię przebytą przez jabłko od początku spadku obliczamy ze wzoru:

$$s = \frac{1}{2}vt$$

a po podstawieniu $v = gt$:

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

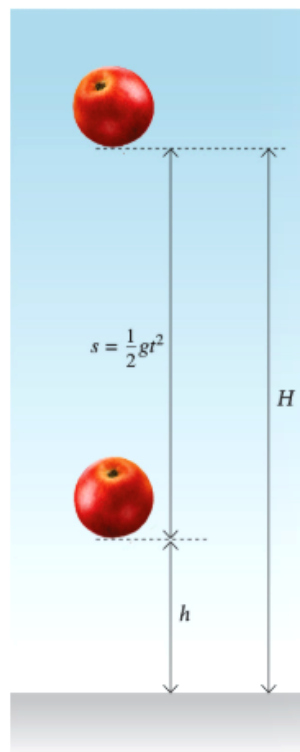
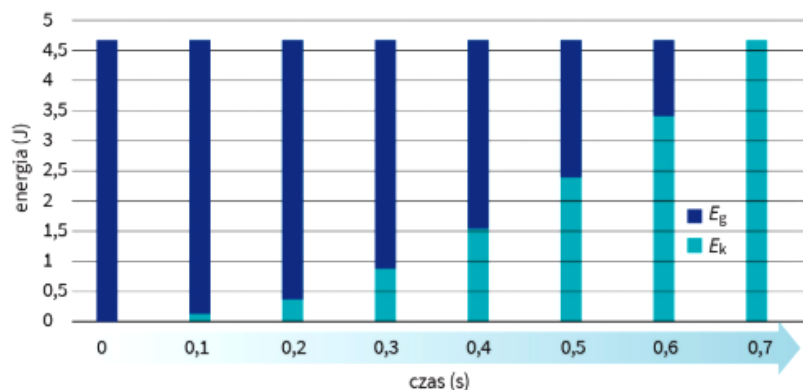
Wysokość, na jakiej w danym momencie znajduje się jabłko, obliczymy przez odjęcie od wysokości początkowej H drogi s przebytej przez jabłko (ryc.):

$$h = H - s$$

$$h = H - \frac{1}{2}gt^2$$

Jeśli znamy te wielkości, możemy w każdej chwili ruchu obliczyć energię kinetyczną i energię grawitacji jabłka.

Na wykresie słupkowym przedstawione są wartości energii grawitacji i energii kinetycznej w poszczególnych momentach ruchu jabłka o masie 0,2 kg spadającego z wysokości 2,4 m. Z wykresu wynika, że suma energii kinetycznej i energii grawitacji jabłka nie zmienia się podczas jego spadania.



PRZYKŁAD 1.

W skateparku mężczyzna wsiadł na rower przy krawędzi rampy na wysokości $h = 8$ m nad ziemią (ryc.). Jaką prędkość uzyska na dole rampy, gdy zjedzie swobodnie? Opory ruchu pomijamy.



Przypomnijmy, że siła nacisku podłoża działająca na rowerzystę nie zmienia jego energii, dzięki czemu możemy zastosować zasadę zachowania energii mechanicznej. Energia mechaniczna rowerzysty na początku, kiedy stoi na krawędzi rampy, jest równa jego energii mechanicznej na końcu zdarzenia, czyli kiedy już jest na dole rampy.

$$E_1 = E_2$$

$$E_{g1} + E_{k1} = E_{g2} + E_{k2}$$

Podstawiamy: $E_{g1} = mgh$, $E_{k1} = 0$, $E_{k2} = \frac{1}{2}mv_2^2$, $E_{g2} = 0$.

Uzyskujemy równanie:

$$mgh = \frac{1}{2}mv_2^2$$

i po przekształceniu otrzymujemy:

$$v_2 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \text{ m}} \approx 12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Prędkość rowerzysty na dole rampy wynosi 12,5 m/s.

Jeszcze raz zapiszmy końcowy wzór z przykładu 1. w nieco innej postaci:

$$v^2 = 2gh$$

Ten wzór wiąże ze sobą prędkość ciała w najniższym położeniu z wysokością, na której prędkość ciała wynosi zero (gdy pomijamy siły oporów ruchu). Możemy go stosować w sytuacji, gdy ciało zjeżdża lub spada, obojętnie po jakim torze, albo gdy pchnięte z prędkością v podjeżdża pod górę na wysokość h .

PRZYKŁAD 2.

Julia stoi na balkonie na wysokości 8 m i rzuca ukośnie z prędkością 6 m/s jabłko, które łapie Romeo stojący na dziedzińcu. Jaka jest prędkość jabłka w momencie, gdy łapie je Romeo?

Rzucone ukośnie jabłko porusza się po krzywej zwanej parabolą (ryc.). Ruch jabłka nie jest jednostajnie przyspieszony, więc nie możemy tu skorzystać ze znanych równań ruchu. W przypadku rzuconego jabłka opór powietrza można pominąć, więc energia mechaniczna jabłka w tym zdarzeniu się nie zmienia.

Zasada zachowania energii mechanicznej pozwala ułożyć równanie, z którego wyznaczymy szukaną prędkość. Suma energii kinetycznej i energii grawitacji jabłka w momencie, gdy opuszcza ono dłoń Julii, jest równa sumie energii kinetycznej i energii grawitacji jabłka w momencie, gdy łapie je Romeo:

$$E_{k1} + E_{g1} = E_{k2} + E_{g2}$$

Jako poziom odniesienia dla energii grawitacji przyjmijmy położenie jabłka w momencie złapania. Wówczas końcowa energia grawitacji będzie wynosić 0, a wysokość początkowa jabłka 8 m (zakładamy, że Romeo i Julia są mniej więcej jednakowego wzrostu).

Po podstawieniu wzorów równanie przyjmie postać:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh = \frac{1}{2}mv_2^2 + 0$$

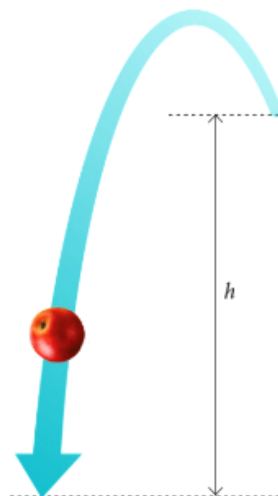
Po przekształceniu wzoru i podstawieniu danych otrzymujemy:

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + 2gh} = \sqrt{\left(6 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + 2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 8 \text{ m}} \approx 14 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Zwróćmy uwagę na fakt, że prędkość końcowa jabłka nie zależy od tego, pod jakim kątem Julia je rzuci.



Średniowieczna kamienica z hipotetycznym balkonem Julii w Weronie



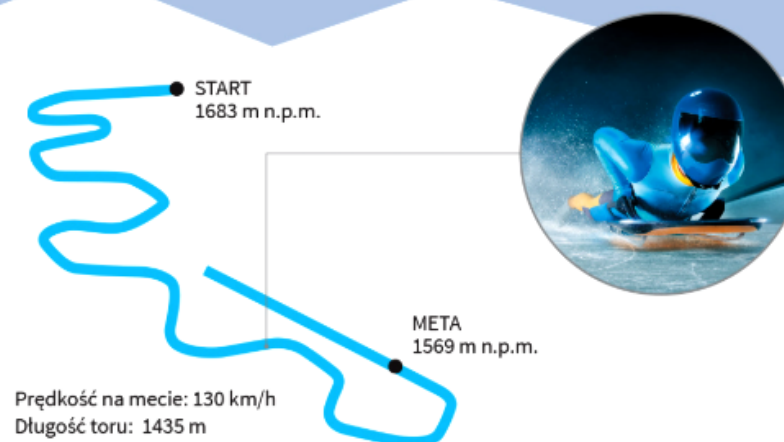
Gdy ułożymy **bilans energetyczny**, czyli porównamy energię na początku i na końcu zdarzenia, możemy obliczyć prędkość ciała, nawet gdy ruch jest dosyć złożony.

PODSUMOWANIE

- ▶ **Energia mechaniczna** jest sumą energii kinetycznej i energii potencjalnej ciała.
- ▶ **Zasada zachowania energii mechanicznej:** gdy na ciało działają tylko siły związane z jego energią potencjalną, energia mechaniczna tego ciała się nie zmienia.

PYTANIA I ZADANIA

1. Z wykresu słupkowego ze s. 136 odczytaj:
 - a) czas, po jakim energia kinetyczna będzie równa energii grawitacji,
 - b) informacje o tym, jaką część energii mechanicznej jabłka stanowi jego energia kinetyczna w połowie czasu spadania.
2. Dlaczego trudniej jest iść pod górę niż poziomo? Odpowiedź uzasadnij z odwołaniem się do pojęcia energii.
3. Strzałę wystrzelono z łuku pionowo do góry z prędkością 30 m/s. Oblicz wysokość, na jaką doleci strzała.
4. Kulka toczy się po stole z prędkością 4 m/s, mija krawędź stołu i spada na podłogę. Oblicz prędkość kulki w momencie, gdy ta uderza w podłogę. Wysokość stołu wynosi 1 m.
5. Na rysunku poniżej przedstawiono schemat toru saneczkowego. Odczytaj z rysunku potrzebne wielkości i oszacuj, jaki procent energii mechanicznej traci saneczkarz na pokonanie oporów ruchu.



17. Energia sprężystości

- Odształcenia sprężyste
- Współczynnik sprężystości
- Energia sprężystości

→ **Przypomnij sobie**, jakie są własności mechaniczne ciał stałych.

Ciała stałe na ogół zachowują swój kształt. Ta ich cecha jest wykorzystywana do konstruowania różnego typu przedmiotów czy wznoszenia ogromnych, często skomplikowanych budowli. Jednak kształt i rozmiary ciał stałych mogą się nieco zmieniać: wskutek ogrzania ciała stałego zwiększają się jego rozmiary, gdy natomiast działa siła zewnętrzna – zmienia się kształt ciała. Zwykle te zmiany są niezauważalne, ale za pomocą precyzyjnych przyrządów można je zmierzyć. Zresztą chyba każdy z nas kiedyś czuł, jak drży podłoga, gdy obok domu przejeżdża jakiś ciężki pojazd. Skoro podłoga drży, to znaczy, że na chwilę minimalnie zmienia się jej kształt i zaraz wraca do pierwotnej postaci.

Odształcenia sprężyste

Zmianę kształtu ciała stałego w sposób nietrwały nazywamy **odkształceniem sprężystym**. Wewnętrzne siły sprężystości przywracają pierwotny kształt ciała po ustaniu przyczyny odkształcenia. Tego typu odkształcenia w naszym otoczeniu są bardzo powszechne. Gałęzie drzew kołyszą się na wietrze. Piłka odbijająca się od ściany odkształca się, by podczas powrotu do poprzedniej postaci odepchnąć się od tej ściany bez zmiany wartości prędkości. Szklanka dzwoni, gdy uderzymy łyżeczką w jej ścianki (poprzez uderzenie zmieniamy nieco jej kształt). Drży most, gdy przetaczają się po nim ciężkie pojazdy. W instrumentach muzycznych odkształcane elementy sprężyste – struny czy płyta rezonansowa – stają się źródłem dźwięku.

Aby ciało stałe uległo odkształceniu, musi na nie zadziałać siła zewnętrzna. Wartość tej siły i odkształcenie sprężyste nią spowodowane są na ogół do siebie wprost proporcjonalne. **Współczynnikiem sprężystości** ciała nazywamy stosunek siły odkształcającej do wartości odkształcenia (ryc. 17.1):

$$k = \frac{F}{x}$$

(1)

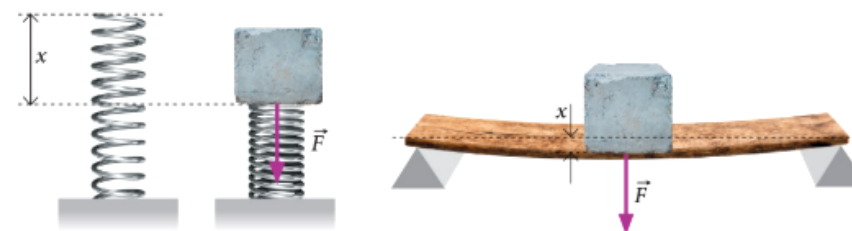
gdzie:

k – współczynnik sprężystości,

F – wartość siły odkształcającej,

x – odkształcenie ciała.

Jednostką współczynnika sprężystości jest 1 N/m.



Ryc. 17.1. Miarą odkształcenia może być odległość, o jaką przesunie się koniec sprężyny lub deski (lub jej środek) pod wpływem siły

Współczynnik sprężystości charakteryzuje dane ciało i sposób jego odkształcenia, a nie materiał, z którego jest zrobione. Z tej samej stali można wykonać miękką sprężynę lub sztywną belkę.

Gdy siła odkształcająca jest zbyt duża, ciało zostanie odkształcone w sposób trwały, czyli nie wróci do poprzedniego kształtu.

WARTO WIEDZIEĆ

Para sił odkształcających

Na odkształcane ciała (np. z ryc. 17.1) działają jeszcze siły w punkcie ich zaczepienia i właśnie dlatego te ciała mogą spoczywać. Dla uproszczenia mówimy o jednej sile odkształcającej, choć w rzeczywistości są co najmniej dwie siły. Przedstawioną na rysunku sprężynę odkształca para przeciwnych sił o tej samej wartości. Gdyby faktycznie na sprężynę działała jedna siła, sprężyna miałaby przyspieszenie, a odkształcenie byłoby zupełnie inne.



Energia sprężystości

Aby odkształcić ciało, siła zewnętrzna musi wykonać pracę. Wobec tego odkształcone ciało ma pewną energię. Nazywamy ją **energią potencjalną sprężystości**.

Ciała twarde, które nie zmieniają w widoczny sposób kształtu czy rozmiarów pod działaniem nawet dużych sił (np. pręty stalowe), charakteryzują się dużym współczynnikiem sprężystości. Energia sprężystości w takich ciałach może być bardzo duża, mimo że nie widzimy bezpośrednio żadnych zmian. Gdy siła odkształcająca nagle ustąpi, siła sprężystości przekształci energię sprężystości np. w energię kinetyczną układu. Struna gitary, gdy się zerwie, może boleśnie uderzyć gitarzystę.

Z tego powodu nie należy bez potrzeby przebywać w pobliżu pracujących urządzeń, jak dźwigi czy wyciągarki, w których liny napięte są dużymi siłami.

Ryc. 17.2. Odształcenie struny kontrabasu podczas grania wymaga znacznie więcej energii niż odształcenie struny gitary ze względu na większy współczynnik sprężystości struny i większe odształcenie. Zwróć uwagę na układ dłoni muzyków szarpiących strunę



Łuk i kusza

Już od dawna ludzie konstruują urządzenia wykorzystujące energię sprężystości odształconych ciał. Jednym z pierwszych takich urządzeń był łuk.



Ryc. 17.3. Kusza jest przykładem wykorzystania energii sprężystości

Gdy naciągamy cięciwę łuku, wykonujemy pracę, dzięki której rośnie energia sprężystości łuku. Po zwolnieniu cięciwy energia sprężystości zmienia się w energię kinetyczną układu strzała–łuk. Wystrzelona strzała przejmie ok. 50 % nagromadzonej energii (zależy to od konstrukcji łuku).

Na podobnej zasadzie działała kusza (ryc. 17.3). Współczynnik sprężystości ramion kuszy był większy niż w przypadku łuku, więc naciągnięcie kuszy wymagało znacznie większej siły. Kuszę naciągano się dwiema rękami lub korbą. Energia strzały wystrzelonej z kuszy była wystarczająca do przebicia każdego pancerza.

Spróbujmy znaleźć wzór pozwalający obliczyć energię odształconego ciała. Wyobraźmy sobie, że sprężynę z ryciny 17.1 chcemy ścisnąć o długość x . Wtedy na jej swobodny koniec musimy zadziałać siłą zewnętrzną $\vec{F}$. Praca siły $\vec{F}$ będzie równa zmianie energii sprężyny:

$$W = \Delta E_s$$

Ponieważ energia nieodsztalonej sprężyny wynosi 0, to:

$$E_s = W$$

W miarę ściskania potrzebna do tego siła $\vec{F}$ rośnie wprost proporcjonalnie do odształcenia, dlatego do obliczenia pracy należy wziąć średnią wartość siły odształcającej. W tym przypadku siła zmienia się od wartości początkowej 0 do końcowej równej:

$$F_{\max} = kx$$

Średnia wartość siły będzie wynosiła:

$$F_{\text{sr}} = \frac{1}{2} \cdot (0 + F_{\max}) = \frac{1}{2} kx$$

Energia tak odształconej sprężyny będzie zatem równa:

$$E_s = W = F_{\text{sr}} \cdot x = \frac{1}{2} kx^2$$

Uzyskaliśmy wzór na energię sprężystości dowolnego ciała, które zostało odształcone sprężystości:

$$E_s = \frac{1}{2} kx^2$$

gdzie:

E_s – energia sprężystości,

k – współczynnik sprężystości,

x – odształcenie ciała.

PRZYKŁAD 1.

Obliczmy energię sprężystości liny stalowej, na której wisi betonowa płyta o masie 6 ton. Współczynnik sprężystości stalowej liny o długości 20 m i średnicy 1 cm wynosi $8,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}$.

Siła, jaką odształcona lina działa na płytę, równoważy jej ciężar. Skorzystajmy ze wzoru (1) i obliczmy, o ile wydłuży się lina pod takim ciężarem:

$$x = \frac{F}{k} = \frac{mg}{k} = \frac{6000 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{8 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}}} \approx 0,074 \text{ m}$$

Energia sprężystości obciążonej liny:

$$E_s = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} \cdot 8 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot (0,074 \text{ m})^2 \approx 2200 \text{ J}$$

Ta wartość jest porównywalna z energią pocisku wystrzelonego z karabinu. Gdyby lina została uwolniona od obciążenia w sposób niekontrolowany (np. wskutek nieprawidłowego zamocowania ładunku), jej energia kinetyczna byłaby właśnie tego rzędu.

Energia sprężystości jest obok energii kinetycznej i grawitacji składnikiem energii mechanicznej. Zgodnie z zasadą zachowania energii mechanicznej trzeba ją uwzględnić, jeśli w trakcie badanego procesu następuje sprężyste odkształcenie ciał.

PRZYKŁAD 2.

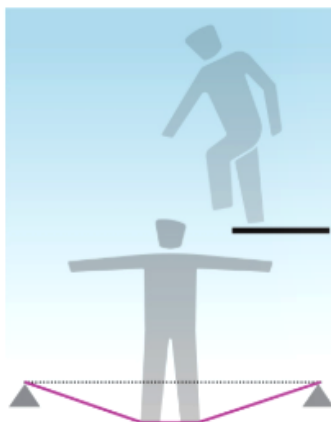
Wojtek skoczył na środek trampoliny z pewnej wysokości. Przeanalizujemy zmiany składników energii mechanicznej w układzie: Wojtek-trampolina-Ziemia. Pomińmy opór powietrza, a poziom zerowy ustalimy przy najniższym położeniu Wojtki.

W momencie skoku Wojtek ma tylko energię grawitacji i to jest całkowita energia mechaniczna tego układu. Podczas spadania energia grawitacji się zmniejsza, a energia kinetyczna rośnie, a suma tych dwóch rodzajów energii jest stała.

Gdy pod wpływem nacisku Wojtki trampolina się odkształca, rośnie jej energia sprężystości. W trakcie odkształcania suma energii kinetycznej i grawitacyjnej Wojtki oraz energii sprężystości trampoliny jest stała. Zgodnie z zasadą zachowania energii mechanicznej ta suma jest równa początkowej energii grawitacyjnej Wojtki.

W najniższym położeniu Wojtki jego energia kinetyczna oraz grawitacyjna jest równa zeru. Wtedy jedynym składnikiem energii mechanicznej układu jest energia sprężystości trampoliny. Zgodnie z zasadą zachowania energii można stwierdzić, że początkowa energia grawitacji Wojtki jest równa końcowej energii sprężystości trampoliny.

Tak samo wyglądają przemiany energii podczas skoków na bungee – rolę trampoliny pełni tam sprężysta lina.



Jeszcze do niedawna w większości zegarków naręcznych była wykorzystywana energia sprężystości. W ich wnętrzu była sprężyna, którą naciągało się podczas nakręcania zegarka. Siła sprężystości wykonywała pracę – pokonywała tarcie mechanizmów zegarka kosztem energii sprężystości.

Współcześnie energia niewielkich sprężyn w zawiasach meblowych, zgromadzona podczas otwierania szafek, domyka za nas drzwiczki mebli.

PODSUMOWANIE

- ▶ **Energię sprężystości** mają ciała odkształcone sprężystością. Energia sprężystości jest składnikiem energii mechanicznej.
- ▶ Odkształcenie sprężyste jest nietrwałe.
- ▶ **Współczynnik sprężystości** opisuje odkształcane ciało. Im jest większy, tym większej siły wymaga odkształcenie ciała:

$$k = \frac{F}{x}$$

PYTANIA I ZADANIA

1. Trampolina do skoków do wody (fot.) ma współczynnik sprężystości 2000 N/m. Oblicz, o ile obniży się krawędź deski, gdy powoli, bez powodowania drgań, wejdzie na nią zawodnik o masie 60 kg.
2. Gdy gramy w siatkówkę lub piłkę nożną zbyt mocno napompowaną piłką, mówimy, że jest za twarda. Wyjaśnij, odwołując się do wiedzy o sile i energii sprężystości, dlaczego źle się gra taką piłką.
3. Strzała wystrzelona z łuku ma prędkość 50 m/s, a jej masa to 20 g. Oszacuj pracę, jaką wykonał łucznik podczas naciągania łuku przed wystrzałem. Skorzystaj z informacji w treści rozdziału.
4. Skoki na bungee to jeden ze sportów ekstremalnych. Są to skoki z dużej wysokości z przywiązaną do nóg sprężystą liną, która ma za zadanie wyhamować skoczka nad ziemią. Zwykle lina jest zamocowana do platformy, z której się skacze (fot.).
Przyjmijmy, że długość początkowa liny (gdy lina nie jest naprężona) wynosi 20 m, masa skoczka to 90 kg, a współczynnik sprężystości liny to 100 N/m. Skoczek całkowicie wyhamowuje po przebyciu w powietrzu drogi 50 m.
a) Oblicz energię kinetyczną skoczka po przebyciu 20 m podczas spadania.
b) Ile wynosi energia sprężystości liny w momencie, gdy skoczek zatrzymuje się na samym dole?
5. Oblicz siłę, jaką lina działa na skoczka opisanego w zadaniu 4. w momencie, gdy znajdzie się on w najniższym położeniu. Potrzebne dane znajdziesz w treści zadania 4.



18. Energia mechaniczna w sporcie

- Biegi
- Rzuty
- Skoki

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o energii mechanicznej.

Dyscypliny sportowe wchodzące w skład lekkoatletyki pozwalają w sposób obiektywny porównywać osiągi poszczególnych zawodników. Po prostu dokonuje się pomiaru konkretnej wielkości fizycznej: czasu, odległości, wysokości. Uzyskiwane wyniki zależą od umiejętności zawodnika oraz wydolności jego organizmu, co w pewnym stopniu wiąże się z energią.

Spójrzmy na wybrane dyscypliny sportowe z punktu widzenia przemian energetycznych.

Sprint i biegi długodystansowe

W biegach sprinterskich zawodnicy osiągają prędkość ponad 10 m/s w czasie zaledwie kilku sekund. Wymaga to mocy mięśni często powyżej 1000 W (przykład 1.). Tak dużą moc człowiek może utrzymać tylko przez kilkanaście sekund. Wtedy mięśnie pracują na tzw. długim tlenowym, czyli korzystają z zasobów energetycznych zgromadzonych w komórkach. Podczas długotrwałego wysiłku układ krwionośny cały czas musi dostarczać tlen do komórek mięśni, dlatego rośnie wówczas tętno. W przypadku długotrwałego wysiłku średnia moc sportowca jest rzędu 600 W.

Ryc. 18.1. Sylwetka sprintera (a) jest zupełnie inna niż sylwetka biegacza długodystansowego (b). Atletyczna budowa ciała sprzyja dużej, ale krótkotrwałemu wysiłkowi



Ryc. 18.2. Podczas biegu przy każdym kroku ciało się nieco unosi i zwiększa swoją energię grawitacji

PRZYKŁAD 1.

Oszacujmy moc sprintera podczas rozpędzania się od startu do prędkości 10 m/s. Przyjmijmy, że czas rozpędzania to 3 s, a masa zawodnika to 90 kg.

Moc zawodnika obliczamy ze wzoru:

$$P = \frac{W}{t}$$

Możemy przyjąć, że praca mięśni zawodnika jest równa zmianie jego energii, w tym przypadku energii kinetycznej:

$$W = \Delta E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Po podstawieniu danych:

$$W = \frac{1}{2} \cdot 90 \text{ kg} \cdot \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 4500 \text{ J}$$

Moc zawodnika będzie zatem równa:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{4500 \text{ J}}{3 \text{ s}} = 1500 \text{ W}$$

Warto się zastanowić, dlaczego w ogóle bieganie czy chodzenie wymagają wysiłku, czyli pracy wykonywanej przez mięśnie. Wydaje się, że gdy biegniemy po poziomej powierzchni, nie zmieniają się ani nasza energia kinetyczna, ani energia grawitacji. Jednak podczas każdego kroku ciało zawodnika nieco się unosi, czyli zwiększa swoją energię grawitacji (ryc. 18.2). Dodatkowo podczas biegu noga, która została z tyłu, musi być przeniesiona do przodu, a to wymaga zmiany prędkości kończyny, a zatem zmiany energii kinetycznej.

Rzuty

W dyscyplinach polegających na rzucaniu przedmiotu określonego przepisami (kula, oszczep, młot) zadaniem zawodnika jest nadanie temu przedmiotowi jak największej prędkości w odpowiednim kierunku. Dzieje się to dzięki pracy mięśni zawodnika. Praca ta równa jest zmianie energii kinetycznej rzucanego przedmiotu i samego zawodnika, który zwykle przejmuje jej większą część.

Okazuje się, że jeśli pominąć opór powietrza, największy zasięg rzutu przy zadanej prędkości początkowej uzyskamy podczas rzutu pod kątem ok. 45° do poziomu (ryc. 18.3).



Ryc. 18.3. Największy zasięg uzyskuje się podczas rzutu pod kątem zbliżonym do 45°

PRZYKŁAD 2.

Oszczepnik rzuca oszczep z prędkością 30 m/s. Masa oszczepu wynosi 0,8 kg, a rzut razem z rozbiegiem trwa 2 s. Oszacujmy, jaki procent pracy mięśni oszczepnika zmienia się w energię kinetyczną oszczepu.

W tej dyscyplinie zawodnik po krótkim rozbiegu bierze zamach i nadaje oszczepowi jak największą prędkość. W fazie przygotowawczej podczas rozbiegu pracę wykonują prawie wszystkie mięśnie zawodnika pracujące na długu tlenowym, gdyż wysiłek jest krótkotrwały. Możemy zatem przyjąć, że moc zawodnika jest rzędu 1500 W (podobnie jak sprintera). Praca wykonana przez zawodnika wynosi zatem:

$$W = Pt = 1500 \text{ W} \cdot 2 \text{ s} = 3000 \text{ J}$$

Energia kinetyczna oszczepu w momencie wyrzutu jest równa:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,8 \text{ kg} \cdot \left(30 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 360 \text{ J}$$

Iloraz energii kinetycznej oszczepu i całkowitej energii zawodnika uzyskanej w wyniku pracy jego mięśni wynosi:

$$\frac{E_k}{W} = \frac{360 \text{ J}}{3000 \text{ J}} = 0,12$$

Oszczep przejmie zatem niewiele ponad 10 % pracy mięśni zawodnika. Warto zwrócić uwagę, jak ważne są umiejętności w sporcie. W zależności od techniki wykonywania rzutu można więcej lub mniej energii przekazać oszczepowi przy tym samym wysiłku mięśni.

Skoki

Każdy z nas wie, że z rozbiegu skoczmy dalej lub wyżej niż z miejsca. Nie każdy skał z tyczką, ale i tak wiadomo, że trzeba wziąć rozbieg. W przypadku skoku w dal jest to zrozumiałe. Żeby skoczyć daleko, trzeba poruszać się z jak największą prędkością i przez jak najdłuższy czas nie dotykać nogami ziemi. Dlatego zawodnicy na rozbiegu biegną bardzo szybko, a na belce, od której mierzy się długość skoku, wybijają się do góry.

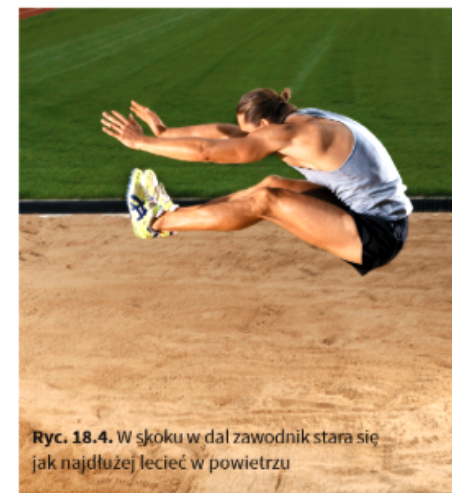
Po odbiciu poruszają się ruchem jednostajnym w kierunku poziomym z prędkością taką, jaką uzyskali na rozbiegu, a mocne wybiecie do góry pozwala im długo lecieć w powietrzu (ryc. 18.4). W skoku wzwyż jest nieco inaczej. Zawodnicy nie biegną tak szybko i samo odbicie jest inne. Warto zastanowić się, po co w ogóle zawodnicy rozpędzają się w kierunku poziomym, skoro skok jest w pionie.

Podczas skoku wzwyż zawodnik musi uzyskać na chwilę jak największą energię grawitacji w stosunku do podłoża. Na rozbiegu skoczek zwiększa swoją energię kinetyczną. W momencie wybiecia, kiedy mocno naciska stopą na podłoże, część jego energii kinetycznej przejmują ścięgna i mięśnie w postaci energii sprężystości. Same ścięgna odkształcają się zaledwie o 8 %, ale energia sprężystości naprężonego ścięgna może sięgać nawet 5 J na 1 cm^3 tkanki. Ta energia przekształca się znowu w energię kinetyczną, lecz tym razem prędkość jest skierowana w górę.

Ten mechanizm gromadzenia energii przez ścięgna i mięśnie zachodzi podczas każdej aktywności fizycznej. Właśnie dlatego tak ważna jest rozgrzewka przed ćwiczeniami czy treningiem – pozwala ona uelastyczyć ścięgna, dzięki czemu zmniejsza się również ryzyko urazów.

W przypadku skoku o tyczce przemiany energetyczne są podobne jak w skoku wzwyż z tą różnicą, że energię kinetyczną rozpędzonego zawodnika przejmie prawie w całości naprężona tyczka (ryc. 18.5).

Udział pracy mięśni zawodnika podczas wybiecia i w dalszej części skoku jest niewielki w stosunku do energii sprężystości tyczki. Ta energia zmienia się w energię grawitacji skoczka, co pozwala mu przejść nad wysoko zawieszoną poprzeczką.



Ryc. 18.4. W skoku w dal zawodnik stara się jak najdłużej lecieć w powietrzu



Ryc. 18.5. W skoku o tyczce prawie cała energia kinetyczna zawodnika przekształca się na chwilę w energię sprężystości tyczki

PRZYKŁAD 3.

Obliczmy, jaką teoretycznie wysokość może osiągnąć zawodnik w skoku o tyczce. Przyjmijmy, że masa zawodnika wynosi $m = 80$ kg, prędkość, jaką uzyskuje na rozbiegu, to $v_1 = 10$ m/s, a prędkość, z jaką przelatuje nad poprzeczką, to $v_2 = 1$ m/s (prędkość nie może wynosić zero, bo zawodnik spadłby na poprzeczkę).

Z dobrym przybliżeniem możemy założyć, że energia mechaniczna skoczka nie zmienia się podczas skoku. Energią początkową jest jego energia na rozbiegu, a energią końcową, energia w najwyższym punkcie.

$$E_1 = E_2$$

$$E_{k1} + E_{g1} = E_{k2} + E_{g2}$$

W tym równaniu nie uwzględniamy energii sprężystości tyczki, bo zarówno na rozbiegu, jak i wtedy, gdy zawodnik osiąga maksymalną wysokość, tyczka nie jest odkształcona, więc jej energia sprężystości wynosi zero.

Podstawiamy odpowiednie wzory:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + 0 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh$$

Obie strony dzielimy przez masę i po przekształceniu otrzymujemy:

$$h = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$h = \frac{\left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 5,05 \text{ m}$$

Uzyskany wynik określa wysokość, na jaką wzniósł się środek ciała tyczkarza. Tyczkarze z reguły są wysocy, więc gdy zawodnik znajduje się na rozbiegu, to jego środek ciała jest ok. 1 m nad bieżnią, czyli tyczkarz pokonał poprzeczkę znajdującą się na wysokości ponad 6 m.



W naszych rozważaniach nie uwzględnialiśmy długości tyczki. Czy zawodnik skoczyłby wyżej, gdyby dysponował dłuższą tyczką? Oczywiście nie! Maksymalna wysokość związana jest z energią grawitacji tyczkarza, a ta zależy od energii kinetycznej na rozbiegu. Zbyt długa tyczka wręcz utrudniałaby wykonanie prawidłowego skoku.

Co ciekawe, w przepisach IAAF (Międzynarodowa Federacja Lekkoatletyki) dotyczących skoku o tyczce czytamy, że tyczka może być dowolnej długości, dowolnej grubości i wykonana z dowolnego materiału.

PODSUMOWANIE

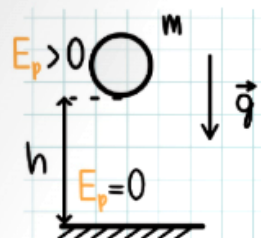
- ▶ U człowieka podczas biegu lub chodzenia przy każdym kroku zmieniają się **energia grawitacji** i **energia kinetyczna** poszczególnych części ciała, co wymaga pracy mięśni.
- ▶ Rzuty wymagają nadania jak największej **energii kinetycznej** rzucanym obiektom.
- ▶ **Rozgrzewka** przed ćwiczeniami fizycznymi zwiększa elastyczność ścięgien i mięśni, dzięki czemu mogą one zmagazynować więcej energii.

PYTANIA I ZADANIA

1. W dyscyplinie zwanej pchnięciem kulą zawodnicy rzucają kulę o masie 7,25 kg. Oblicz energię kinetyczną i energię grawitacji kuli w momencie wyrzutu. Wiemy, że kula osiąga prędkość 14 m/s i opuszcza dłoń zawodnika na wysokości 2,2 m.
2. Zawodnik skaczący wzwyż potrafi przy odbiciu nadać swojemu ciału prędkość skierowaną do góry o wartości ok. 5 m/s. Czy ten zawodnik może przeskoczyć nad poprzeczką zawieszoną na wysokości 2 m? Skorzystaj z informacji zawartych w przykładzie 3.
3. Z jaką prędkością upadnie na ziemię kula pchnięta przez zawodnika z zadania 1.?
4. W rzucie młotem i oszczepem zawodnicy uzyskują podobne odległości, mimo że młot jest prawie dziesięciokrotnie cięższy od oszczepu. Czy początkowa energia kinetyczna młota jest wyraźnie większa, podobna, czy wyraźnie mniejsza niż oszczepu? Uzasadnij odpowiedź.
5. Dlaczego sprinterzy mają zazwyczaj bardziej masywne sylwetki niż biegacze długodystansowi? Skorzystaj z informacji zawartych w treści rozdziału.

Energia – jest miarą zdolności ciała do oddziaływania z innymi ciałami.

ENERGIA



energia potencjalna grawitacji

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

masa ciała

przyspieszenie ziemskie

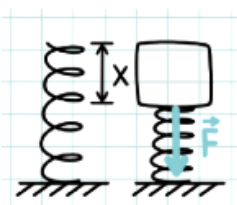
wysokość, na której znajduje się ciało

energia sprężystości

$$E_s = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$$

współczynnik sprężystości

odkształcenie ciała

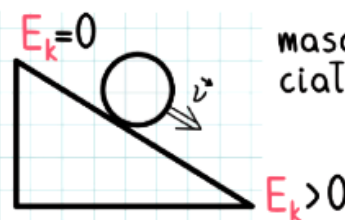


energia kinetyczna

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

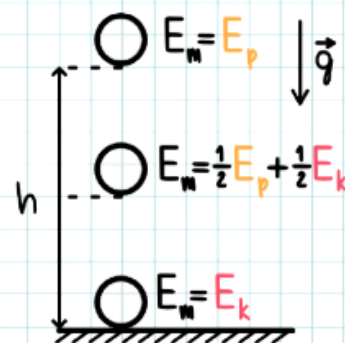
masa ciała

prędkość ciała



ENERGIA MECHANICZNA
energia kinetyczna + energia potencjalna
sprężystości lub grawitacji

spadek swobodny



ZASADA ZACHOWANIA ENERGII MECHANICZNEJ

Jeśli na ciało działa tylko siła ciężkości lub sprężystości, to jego energia mechaniczna się nie zmienia.

siła wykonuje pracę nad ciałem
praca

$$W = F \cdot s \quad \Delta E = W$$

przekaz energii

Jednostką pracy i energii jest **dżul**.
 $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$

ENERGIA CAŁKOWITA
suma wszystkich rodzajów energii układu

ZASADA ZACHOWANIA ENERGII

Energia całkowita układu izolowanego nie zmienia się.

MOC
szybkość przekazywania energii

$$P = \frac{\Delta E}{t}$$

Jednostką mocy jest **wat**.

$$1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}}$$

PYTANIA I ZADANIA

1. Ciało o masie 2 kg podniesiono pionowo na wysokość 5 m i wykonano przy tym pracę 300 J. Pomijamy wpływ oporów ruchu.

Wybierz poprawne dokończenie zdania.

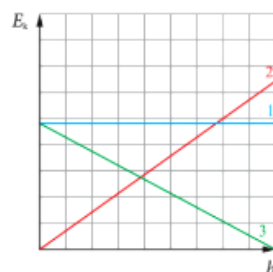
Przy założeniu, że początkowa energia grawitacji i energia kinetyczna wynosiły 0, można wnioskować, że na wysokości 5 m energia grawitacji i energia kinetyczna ciała wynoszą w przybliżeniu odpowiednio

- A. 150 J i 150 J.
- B. 200 J i 100 J.
- C. 100 J i 200 J.
- D. 300 J i 0 J.
- E. 0 J i 300 J.

2. Piłka spada swobodnie. Na którym z wykresów poprawnie przedstawiono zależność energii kinetycznej piłki od wysokości, na jakiej się ona znajduje?

Wybierz poprawną odpowiedź.

- A. Wykres 1.
- B. Wykres 2.
- C. Wykres 3.



3. Wybierz poprawne dokończenie zdania.

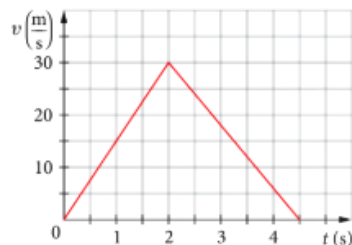
Gdy na poziomo umocowanej listewce zawieszono ciężarek o masie m , jej koniec obniżył się o x (ryc.). Gdy dołożono drugi taki sam ciężarek

- A. odkształcenie wzrosło o połowę, energia sprężystości się nie zmieniła.
- B. odkształcenie wzrosło o połowę, energia sprężystości wzrosła.
- C. odkształcenie wzrosło dwukrotnie, energia sprężystości się nie zmieniła.
- D. odkształcenie wzrosło dwukrotnie, energia sprężystości wzrosła.



4. Model rakiety wyposażony w modelarski silnik raketowy ma masę 0,6 kg. Na wykresie przedstawiono zależność prędkości od czasu od chwili startu rakiety do momentu osiągnięcia przez nią maksymalnej wysokości. Przyjmij, że masa rakiety znacząco się nie zmienia.

- a) Omów przemiany energii zachodzące podczas lotu rakiety do góry.
- b) Jaka była maksymalna energia kinetyczna rakiety?
- c) Na jakiej wysokości skończyło się paliwo w silniku?



5. Wyciągarka podnosi skrzynię o masie 120 kg na wysokość 8 m ruchem jednostajnym. Czas podnoszenia wynosi 16 s.

- a) Oblicz energię grawitacji skrzyni na wysokości 5 m.
- b) Ile wynosi energia kinetyczna skrzyni na wysokości 5 m?
- c) Oblicz moc wyciągarki.



6. Na meczu siatkówki zawodnik w momencie zagrywki uderza piłkę wyrzuconą na wysokość 3,2 m i nadaje jej prędkość skierowaną poziomo o wartości 30 m/s. Oblicz prędkość piłki podczas jej uderzenia w boisko. Pomiń opory powietrza. Masa piłki do siatkówki wynosi 0,27 kg.



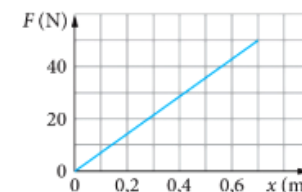
7. Oblicz, na jaką wysokość wzniesie się piłka o masie 0,1 kg rzucona pionowo do góry z prędkością 8 m/s.

8. Na skoczni narciarskiej w Wiśle zawodnik rozpoczyna najazd z belki znajdującej się 50 m powyżej progu. W momencie najazdu na próg prędkość zawodnika wynosi 25 m/s. Oblicz, jaką część początkowej energii mechanicznej skoczek stracił na pokonanie oporów ruchu.



9. Na ciało o masie 12 kg działała pewna siła o wartości 20 N. Spowodowała ona przesunięcie ciała o 5 m. Oblicz pracę wykonaną przez tę siłę.

10. Na wykresie przedstawiono zależność siły rozciągającej sprężynę od jej wydłużenia. Oblicz pracę potrzebną do rozciągnięcia tej sprężyny na długość 0,7 m.



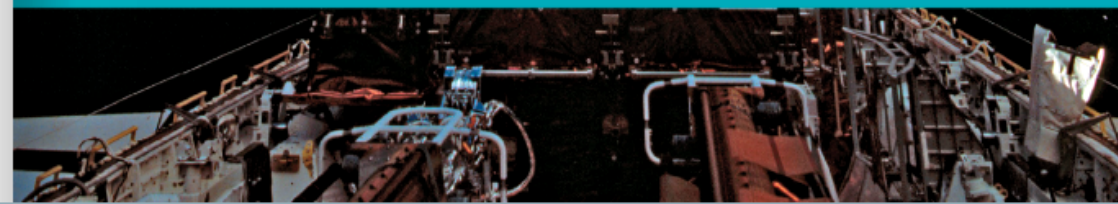
Najważniejsze pojęcia w dziale

- energia [energy] 116
- moc [power] 124
- odkształcenie sprężyste [elastic deformation] 140
- praca [work] 121
- przemiany energii [energy transformation] 119
- współczynnik sprężystości [spring constant] 140
- zasada zachowania energii [the law of conservation of energy] 117
- zasada zachowania energii mechanicznej [the principle of the conservation of mechanical energy] 135



GRAWITACJA I ASTRONOMIA

Czy satelity muszą mieć włączone silniki, żeby nie spaść na Ziemię? Skąd wiemy, ile lat ma Układ Słoneczny i jak stary jest Wszechświat? Czas poznać zagadnienia z działu GRAWITACJA I ASTRONOMIA.



19. Układ Słoneczny

- Słońce – nasza gwiazda
- Budowa Układu Słonecznego
- Powstanie i wiek Układu Słonecznego

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o miejscu Ziemi w kosmosie.

Układ Słoneczny stanowią – poza Słońcem – wszystkie ciała okrążające naszą gwiazdę i wspólnie z nią wędrujące we Wszechświecie. „A w środku wszystkich ma swą siedzibę Słońce” – dla Mikołaja Kopernika nie ulegało wątpliwości, że ono właśnie stanowi centrum naszego najbliższego kosmicznego otoczenia¹. **Słońce jest gwiazdą, czyli ciałem niebieskim świecącym własnym światłem.** Wszystkie inne ciała Układu Słonecznego świecą tylko odbitym światłem słonecznym.

Słońce to olbrzymia kula gazowa o promieniu ok. 700 000 km. To ponad sto razy więcej niż promień Ziemi. Aż 74 % materii słonecznej stanowi wodór, 25 % – hel, a pozostały 1 % to inne, nieco cięższe pierwiastki. Energię konieczną do emisji promieniowania – jak typowa gwiazda – czerpie Słońce z reakcji jądrowych (wyjaśnimy to bliżej dopiero w klasie trzeciej). Nasza gwiazda stale emituje tzw. wiatr słoneczny – strumień cząstek omiatających planety. Na zdjęciu powyżej widać protuberancję – ogromną pętlę gazu wyrzuconego ponad fotosferę, czyli powierzchnię Słońca.

¹ Przeczytaj tekst *Rewolucja na niebie i na Ziemi*, s. 226.

Jednostka astronomiczna

Odległości w Układzie Słonecznym są bardzo duże i dlatego do ich określania astronomowie rzadko używają takich jednostek jak kilometr. Odległości między Słońcem a planetami najłatwiej wyrażać w tzw. **jednostkach astronomicznych**, oznaczanych au^2 lub j.a. Jednostka astronomiczna to po prostu średnia odległość Ziemi od Słońca. Wynosi ona ok. 149,6 mln km, zatem możemy zapisać, że:

$$1 \text{ au} \approx 150 \text{ mln km} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

Z tabeli 1. na s. 161 możemy odczytać, że np. Mars jest oddalony od Słońca o 1,52 au, a Wenus o 0,72 au. Księżyc jest na tyle blisko Ziemi, że odległość do niego najczęściej podaje się w kilometrach. Wynosi ona ok. 384 tys. km.

PRZYKŁAD 1.

Wyrażmy odległość z Ziemi do Księżyca w jednostkach astronomicznych.

Piszemy:

$$1 \text{ au} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$$

czyli:

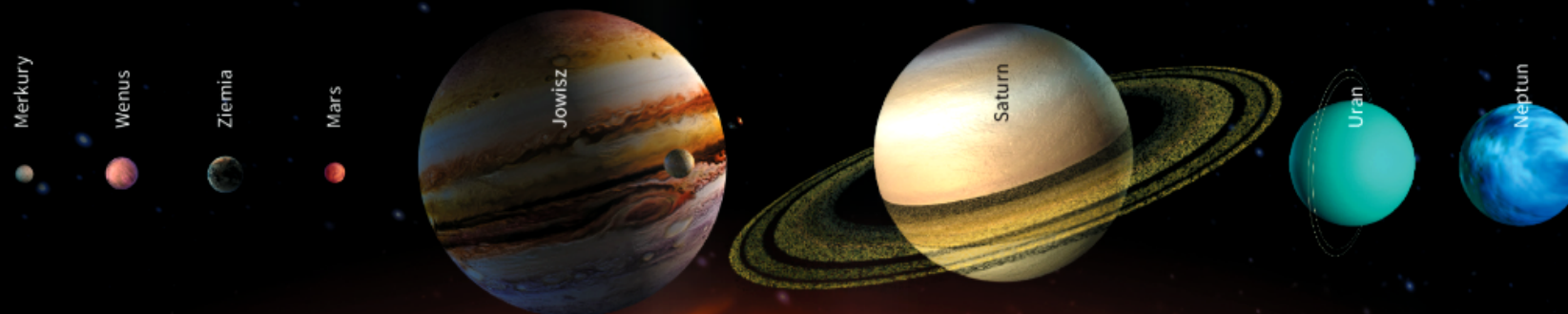
$$1 \text{ km} = \frac{1 \text{ au}}{1,5 \cdot 10^8}$$

Wobec tego otrzymujemy:

$$384 \text{ 000 km} = \frac{384 \text{ 000 au}}{1,5 \cdot 10^8} = 0,00256 \text{ au}$$

Teraz widać, jak blisko nas – w porównaniu ze Słońcem – znajduje się Księżyc.

² ang. *astronomical unit*.



Ryc. 19.1. Główne obiekty Układu Słonecznego (zachowana skala wielkości, ale nie odległości)

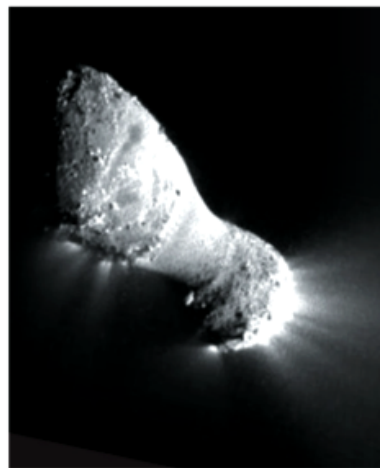
Budowa Układu Słonecznego

Choć Układ Słoneczny składa się z niewyobrażalnej ilości obiektów, Słońce skupia w sobie prawie 99,9 % całej jego masy. Pozostałe 0,1 % to przede wszystkim osiem planet.

Najbliżej Słońca znajdują się cztery niewielkie **skaliste planety**, w tym Ziemia. W dalszej odległości znajdują się cztery kolejne planety, tzw. **gazowe olbrzymy**. Mają one zupełnie inną budowę niż planety skaliste, a każda z nich ma pierścienie oraz wiele własnych księżyców. Niektóre księżyce są zadziwiające; są wśród nich lodowe globy, jeden ma wiele czynnych wulkanów, a inny – jeziora z gazu ziemnego. Między tymi dwiema grupami planet znajdziemy tysiące mniejszych obiektów, tzw. **planetoid**, nazywanych również **asteroidami**. Co roku odkrywane są nowe, a odkryć dokonują także uczniowie polskich szkół. Jeszcze więcej planetoid krąży w przestrzeni poza Neptunem. Odkryto tam również kilka **planet karłowatych**, czyli obiektów kulistych mniejszych od planet, lecz większych od planetoid. Jedną z nich, o nazwie Pluton, znamy od 1930 roku i do niedawna traktowaliśmy ją jako planetę. Jeszcze dalej od centrum układu, w odległościach przekraczających nawet 500 au, znajdziemy ogromną liczbę **komet** – małych ciał, które krążą wokół Słońca po bardzo wydłużonych orbitach. Jądra komet składają się w głównej mierze z lodu wodnego wymieszanego ze związkami organicznymi. Niektóre z komet pojawiają się czasem w obszarach bliskich Ziemi. Wtedy, ogrzane promieniami Słońca, parują i można podziwiać ich piękne warkocze. Gdy Ziemia wejdzie w pas pyłu pozostawianego przez komety, obserwujemy szczególnie dużo **meteorów**, popularnie zwanych spadającymi gwiazdami. Zwróćmy uwagę na rycinę 19.4, która pokazuje, jak płaski jest Układ Słoneczny (nie dotyczy to komet). Wszystkie planety krążą niemal w jednej płaszczyźnie i obiegają Słońce w jedną stronę. W tę samą stronę obraca się Słońce dookoła własnej osi oraz wirują wszystkie planety z wyjątkiem Wenus.



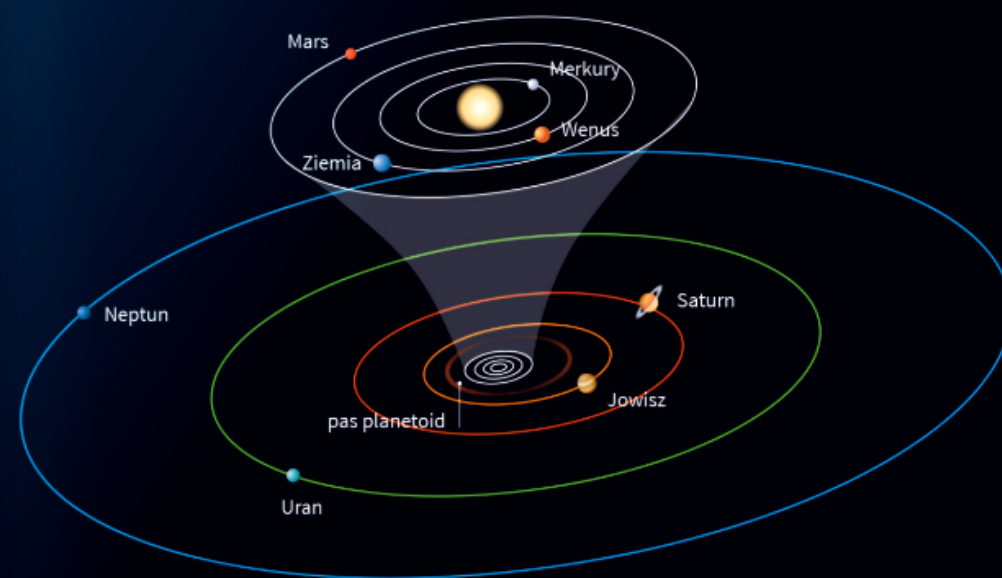
Ryc. 19.2. Kometa Halleya z długim warkoczem



Ryc. 19.3. Jądro komety Hartley 2 z widocznymi strugami materii „parującej” pod wpływem promieniowania słonecznego

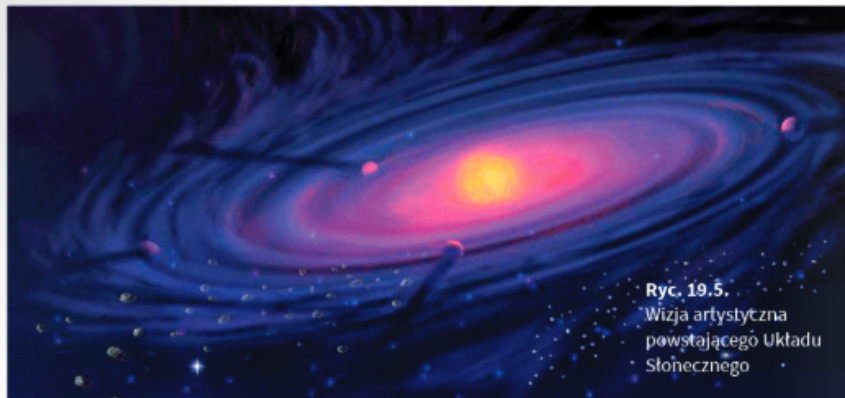
Tabela 1. Podstawowe dane dotyczące planet Układu Słonecznego

Planeta	Średnia odległość od Słońca (au)	Okres obiegu (lata)	Okres obrotu (dni)	Średnia prędkość na orbicie (km/s)	Masa planety/masa Ziemi	Średnia gęstość (tona/m ³)	Promień planety/promień Ziemi
Merkury	0,39	0,24	58,64	47,87	0,06	5,43	0,38
Wenus	0,72	0,62	243,01	35,02	0,82	5,24	0,95
Ziemia	1	1	1	29,78	1	5,52	1
Mars	1,52	1,88	1,03	24,13	0,11	3,94	0,53
Jowisz	5,20	11,86	0,41	13,07	317,83	1,34	10,97
Saturn	9,54	29,45	0,45	9,64	95,16	0,71	9,14
Uran	19,19	84,07	0,72	6,80	14,54	1,25	3,98
Neptun	30,07	164,88	0,67	5,48	17,15	1,64	3,87



Ryc. 19.4. Orbity planet (skala odległości została zachowana)

Powstanie i wiek Układu Słonecznego



Ryc. 19.5.
Wizja artystyczna
powstającego Układu
Słonecznego

Jak i kiedy uformował się Układ Słoneczny? Nie znamy szczegółów, bo było to dawno temu – ok. 4,5 miliarda lat. **Układy planetarne powstają w mgławicach – gigantycznych obłokach materii.** Czasem część obłoku pod wpływem różnych procesów zagęszcza się i to zagęszczenie przyciąga grawitacyjnie sąsiadującą materię. Tak prawdopodobnie powstał nasz Układ Słoneczny. Gdy obłok kurczy się grawitacyjnie, jednocześnie wirując (niemal wszystkie obiekty we Wszechświecie wirują), spłaszcza się wskutek ruchu obrotowego. Gęstość i temperatura rosną, szczególnie w samym środku zagęszczenia. Tak powstaje każda gwiazda i tak narodziło się Słońce. Z pozostałego gazu i pyłu krążących dookoła młodego Słońca uformowały się – na skutek nieustannych zderzeń – planetoidy, komety, a w końcu i planety. Księżyc powstał prawdopodobnie wskutek zderzenia z Ziemią planety wielkości Marsa. Taka teoria wyjaśnia całkiem dobrze obserwowane cechy Układu Słonecznego.

Skąd to wszystko wiemy? Istotnym źródłem tej wiedzy są **meteoryty**, czyli okruchy kosmicznej materii, które spadły na powierzchnię Ziemi. To bardzo cenne znaleziska. Wiele z nich to najbardziej pierwotna materia Układu Słonecznego (mają 4,5 miliarda lat).



Ryc. 19.6. Meteoryt żelazny. Na Ziemię regularnie spadają kawałki litego żelaza z nikłem. Świetnie widoczne są tu ślady stopienia powierzchni podczas przejścia przez atmosferę



Ryc. 19.7. Meteoryt kamienny – takie spadają najczęściej. Charakterystyczna czarna skorupa powstała na skutek rozgrzewania się kamienia podczas przejścia przez atmosferę

Nie jest łatwo znaleźć meteoryty, ale warto wiedzieć, że czasem z nieba spadają kamienie. Jeden z ostatnich meteorytów znalezionych w Polsce został wypatrzony w 2004 roku przez dwunastoletnią dziewczynkę. Zwróciła uwagę na dziwny kamyk tylko dlatego, że wiedziała już coś o meteorytach. Z kolei na Mazurach zdarzył się inny przypadek. Chłopak idący polem zobaczył, jak z nieba spada kamień. Nie wykazał jednak dostatecznego zainteresowania zjawiskiem, bo nic nie wiedział o meteorytach. W ten sposób cenny okaz przepadł.

Meteoryty dość łatwo można kupić. Nie wszystkie są drogie – praktycznie każdy może mieć w domu skrawek kosmicznej skały. Na przykład okazy pokazane na zdjęciach (ryc. 19.6 i 19.7) są własnością jednego z autorów podręcznika. Wiele informacji o meteorytach można znaleźć na stronach Polskiego Serwisu Meteorytów.

PODSUMOWANIE

- ▶ **Układ Słoneczny** to Słońce (zawierające 99,9 % masy całego Układu), cztery planety skaliste, cztery gazowe olbrzymy, planety karłowate, księżyce, planetoidy oraz komety.
- ▶ **Układ Słoneczny** powstał ok. 4,5 miliarda lat temu w wyniku grawitacyjnego kurczenia się gigantycznego obłoku gazu.
- ▶ **Meteoryty** to kosmiczna materia, która spadła na powierzchnię Ziemi.

PYTANIA I ZADANIA

1. Napisz w zeszycie, które z planet:
 - a) mają największą oraz najmniejszą masę,
 - b) obracają się najszybciej oraz najwolniej wokół swojej osi,
 - c) mają największą oraz najmniejszą gęstość.
2. Średnica Słońca wynosi 1,4 mln km. Wyraż tę średnicę w jednostkach astronomicznych.
3. Wywnioskuj z tabeli 1., która planeta najbardziej zbliża się do Ziemi. Oblicz najmniejszą odległość tej planety od Ziemi. Wynik podaj w kilometrach.
4. Gdybyśmy chcieli wykonać model Układu Słonecznego w odpowiedniej skali, a Słońce byłoby reprezentowane przez dużą dynię, jakie owoce lub inne przedmioty mogłyby przedstawiać planety? Skorzystaj z danych zamieszczonych w tabeli 1.
5. Przypuśćmy, że Słońce reprezentuje dynia. W jakich odległościach od niej trzeba byłoby umieścić owoce obrazujące planety, żeby były zachowane proporcje odległości? Gdzie będzie w tej skali najdalsza planeta Układu Słonecznego?

20. Prawo grawitacji

- Isaac Newton – „założyciel” fizyki
- Prawo grawitacji
- Przyspieszenie grawitacyjne
- Masa Ziemi

→ **Przypomnij sobie** zasady dynamiki Newtona.

Nie można zrozumieć struktury Układu Słonecznego bez znajomości prawa grawitacji, zwanego też prawem powszechnego ciążenia. Sformułował je Isaac Newton w słynnym dziele *Matematyczne zasady filozofii naturalnej* ogłoszonym w 1687 roku.

Isaac Newton to – obok Alberta Einsteina – najbardziej znacząca postać w dziejach fizyki. Ten angielski uczony samodzielnie sformułował zasady dynamiki. Ponadto odkrył prawo grawitacji, za pomocą którego wyjaśnił ruchy planet i pływy oceanów. Jest współtwórcą optyki (np. skonstruował pierwszy teleskop zwierciadlany). Właściwie można przyjąć, że to od jego prac rozpoczęła się fizyka, jaką znamy, opisująca świat językiem matematyki. Przy okazji rozwiązywania problemów z mechaniki Newton zapoczątkował rachunek

różniczkowy i całkowity, nazywany „największym pojedynczym osiągnięciem w historii matematyki”. Jednak większość długiego życia poświęcił na zgłębianie tajemnic Biblii. Mimo tak wielkich osiągnięć Newton zdawał sobie sprawę z tego, że każde odkrycie rodzi następne pytania, czemu dał wyraz w pięknej refleksji: „Nie wiem, jakie wyobrażenie ma o mnie świat, lecz sam sobie wydaję się tylko chłopcem biegającym po brzegu morza i bawiącym się znajdowaniem tu i tam gładszych niż zwykle kamyczków lub piękniejszych niż zwykle muszli, podczas gdy ogromny ocean prawdy leży cały niezbadany przede mną”³.



Ryc. 20.1. Isaac Newton, 1643–1727

Prawo grawitacji

Sformułujmy teraz współczesnym językiem prawo grawitacji.

Prawo grawitacji

Każde dwa punktowe ciała przyciągają się siłami o wartości wprost proporcjonalnej do iloczynu ich mas, a odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi:

$$F_g = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1)$$

gdzie:

F_g – siła grawitacji (ciążenia),

M, m – masy ciał,

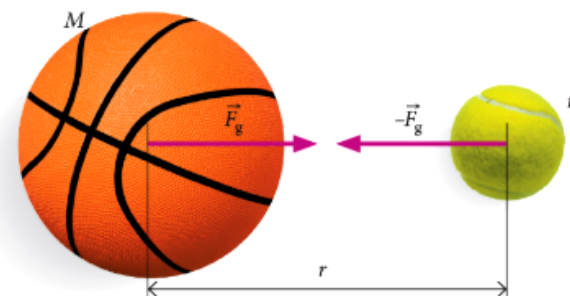
r – odległość między ciałami,

G – współczynnik proporcjonalności, nazywany w tym przypadku **stałą grawitacji**.

Doświadczalnie wyznaczono ją dopiero pod koniec XVIII wieku.

$$G \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

Zgodnie z prawem grawitacji przyciągają się każde dwa ciała we Wszechświecie, więc również szafa z biurkiem, zeszyt z książką itd. Jednak stała grawitacji jest bardzo mała, zatem w przypadku niewielkich mas siła grawitacji jest praktycznie niedostrzegalna. Ziemia ma ogromną masę, więc siły, jakimi przyciąga drobne ciała, są doskonale widoczne. Prawo grawitacji mówi o ciałach punktowych, bo tylko wtedy jest oczywiste, co jest odległością między nimi. Inaczej jest w przypadku ciał rozciągłych. Jaka jest np. odległość między dwoma ziemniakami w siatce na zakupy? Na szczęście nie musimy tego określać. W przypadku jednorodnych kul już Newton udowodnił, że przyciągają się one tak, jak gdyby cała masa była skupiona w ich środku. Kule nie muszą być nawet jednorodne, wystarczy, że składają się z jednorodnych, sferycznych warstw. Wobec tego przy obliczaniu siły grawitacji dla kul trzeba brać pod uwagę odległość między ich środkami. Planety, Słońce i Księżyc są prawie kuliste, a wszystkie ciała na powierzchni Ziemi w stosunku do jej ogromu można uważać za punktowe.



Ryc. 20.2. Dwie kule przyciągające się siłami grawitacji

³ E.F. Taylor, J. Wheeler, *Fizyka czasoprzestrzeni*, PWN, Warszawa 1972.

Warto pamiętać o jeszcze jednej rzeczy: zgodnie z III zasadą dynamiki Newtona oba ciała przyciągają się wzajemnie siłami o tej samej wartości. Jeśli Ziemia przyciąga człowieka, to człowiek również przyciąga Ziemię – i to siłą o tej samej wartości!

Przyspieszenie grawitacyjne

Jeśli pominąć opór powietrza, wszystkie ciała spadają na Ziemię z jednakowym przyspieszeniem (rozdział 9.). Wynika to wprost z prawa grawitacji. Rozważmy np. doniczkę spadającą z balkonu. Załóżmy, że działa na nią tylko siła grawitacji $\vec{F}_g$, równa ciężarowi ciała. Wtedy ze wzoru (1) możemy obliczyć przyspieszenie doniczki, które będzie równe przyspieszeniu ziemskiemu g . Przy takich założeniach II zasada dynamiki dla tego przypadku wygląda następująco:

$$g = \frac{F_g}{m} \quad (2)$$

Warto zauważyć, że m to masa doniczki, a nie Ziemi. Do powyższego wzoru możemy podstawić wzór z prawa grawitacji (1):

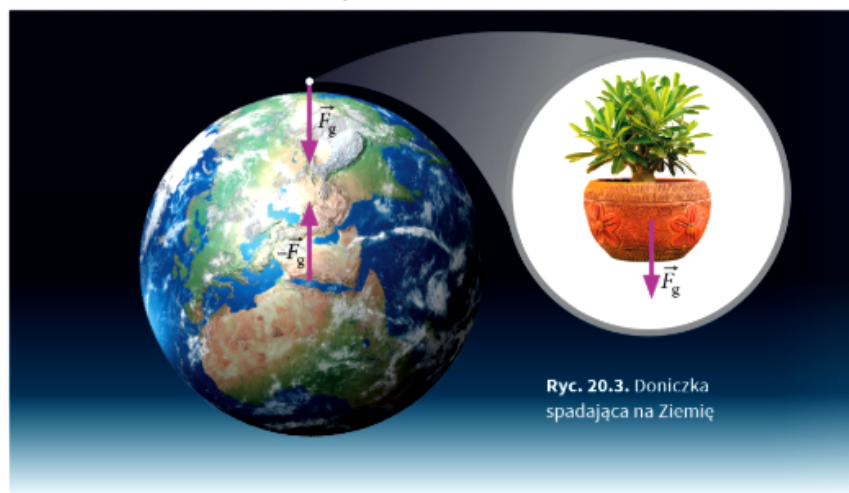
$$g = \frac{G M m}{r^2} \cdot \frac{1}{m} = G \frac{M}{r^2} \quad (3)$$

Masa doniczki nie występuje we wzorze na przyspieszenie. Przyspieszenie to zależy tylko od masy Ziemi i odległości spadającego ciała od środka Ziemi. Wzór (3) pozwala obliczyć **przyspieszenie grawitacyjne** – bo taką ma ono nazwę – na dowolnej planecie, księżycu czy gwiazdzie. Na powierzchni naszej planety jest ono w przybliżeniu równe przyspieszeniu ziemskiemu i ma wartość ok. $9,8 \text{ m/s}^2$.

Wzór (2) można napisać też tak:

$$F_g = m \cdot g \quad (4)$$

To doskonale znana formuła na ciężar ciała.



Ryc. 20.3. Doniczka spadająca na Ziemię

Uwaga na nazewnictwo! Nie wolno mylić stałej grawitacji G z przyspieszeniem grawitacyjnym g . G jest liczbą taką samą w całym Wszechświecie, natomiast g jest inne na powierzchni każdej planety. Z kolei grawitacja to zjawisko polegające na tym, że wszystkie ciała się przyciągają.

WARTO WIEDZIEĆ

Masa Ziemi

Naszą planetę możemy „zważyć” dzięki prawu grawitacji. Użyjemy wzoru (3). Jeśli zmierzylismy promień Ziemi i przyspieszenie grawitacyjne, masa Ziemi jest jedyną niewiadomą w tym wzorze. Wyznamy masę Ziemi z dokładnością do trzech cyfr znaczących. Przyjmijmy:

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$r = 6370 \text{ km} = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$$

Ze wzoru (3) otrzymujemy po przekształceniu:

$$M = \frac{g \cdot r^2}{G} = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (6,37 \cdot 10^6 \text{ m})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}} \approx \frac{3,98 \cdot 10^{14} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2}} \approx 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

Nasz wynik jest taki sam (z dokładnością do trzech cyfr znaczących), jak wynik podawany na podstawie znacznie bardziej szczegółowych pomiarów. Na przykład Wikipedia podaje, że masa Ziemi wynosi $M = (5,9722 \pm 0,0006) \cdot 10^{24} \text{ kg}$. Niepewność wyznaczenia masy Ziemi wynosi zatem $6 \cdot 10^{20} \text{ kg}$, czyli 600 milionów miliardów ton! Jednak warto obliczyć niepewność względną tego pomiaru, czyli stosunek niepewności pomiaru do mierzonej wartości. W tym przypadku wynosi ona:

$$\frac{\Delta M}{M} \approx \frac{6 \cdot 10^{20}}{6 \cdot 10^{24}} \approx 0,0001$$

Wobec tego masę naszej planety znamy z dokładnością do 0,01 %.

Masa Ziemi wynosi ok. $6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$. Masa ta jest niewyobrażalnie duża. Nic dziwnego, że Ziemia się nie porusza, gdy np. odbijamy się od niej i skaczemy do wody, choć działamy na nią taką samą siłą, jak ona na nas.

Układ Ziemia-Księżyc

Przyjrzyjmy się bliżej układowi Ziemia-Księżyc.

PRZYKŁAD 1.

Obliczmy w przybliżeniu siłę przyciągania między Księżycem a Ziemią.

Masę Ziemi oznaczmy jako M , masę Księżyca – m , a odległość między nimi – r . W tablicach astronomicznych możemy znaleźć te dane. Zapiszmy je w zaokrągleniu do dwóch cyfr znaczących, bo nie musimy znać bardzo dokładnego wyniku.

$$M = 6,0 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$m = 7,3 \cdot 10^{22} \text{ kg}$$

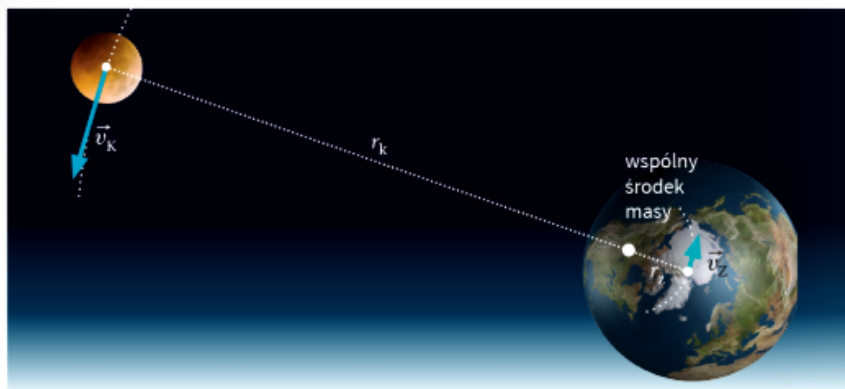
$$r = 384000 \text{ km} \approx 3,8 \cdot 10^8 \text{ m}$$

Podstawmy te dane do wzoru (1):

$$F_g = G \frac{M m}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{6 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 7,30 \cdot 10^{22} \text{ kg}}{(3,8 \cdot 10^8 \text{ m})^2} \approx 2,0 \cdot 10^{20} \text{ N}$$

Ziemia przyciąga Księżyc siłą ok. 200 miliardów miliardów niutonów! Jest to siła dośrodkowa utrzymująca Księżyc na orbicie okołozemskiej. Jednak również Księżyc przyciąga Ziemię siłą o tej samej wartości, lecz przeciwnie skierowaną. Ta niczym niezrównoważona siła musi spowodować krążenie Ziemi. **Obydwa ciała okrążają z tym samym okresem (lecz po orbitach o różnych promieniach) wspólny środek masy** (ryc. 20.4).

W przypadku układu dwóch ciał środek masy jest zawsze bliżej ciała cięższego. Ponieważ masa Ziemi jest 81 razy większa od masy Księżyca, środek masy układu Ziemia–Księżyc jest odległy tylko o niecałe 5000 km od środka Ziemi, zatem leży głęboko pod jej powierzchnią. Wobec tego nasza planeta krąży dookoła wspólnego środka masy po niewielkiej orbicie, podczas gdy Księżyc porusza się po orbicie o promieniu 81 razy większym. Tylko w przybliżeniu możemy mówić, że Księżyc obiega Ziemię (lub że np. Ziemia obiega Słońce).



Ryc. 20.4. Ziemia i Księżyc okrążają wspólny środek masy (skala odległości nie została zachowana)

PODSUMOWANIE

► Prawo grawitacji

Każde dwa punktowe ciała przyciągają się siłami o wartości wprost proporcjonalnej do iloczynu ich mas, a odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi:

$$F_g = G \frac{Mm}{r^2}$$

► Ciało w pobliżu planety (księżyca, gwiazdy) na skutek działania siły grawitacji (i gdy pominiemy opory ruchu) spada z **przyspieszeniem grawitacyjnym** g , zależnym tylko od masy planety oraz odległości od jej środka:

$$g = G \frac{M}{r^2}$$

PYTANIA I ZADANIA

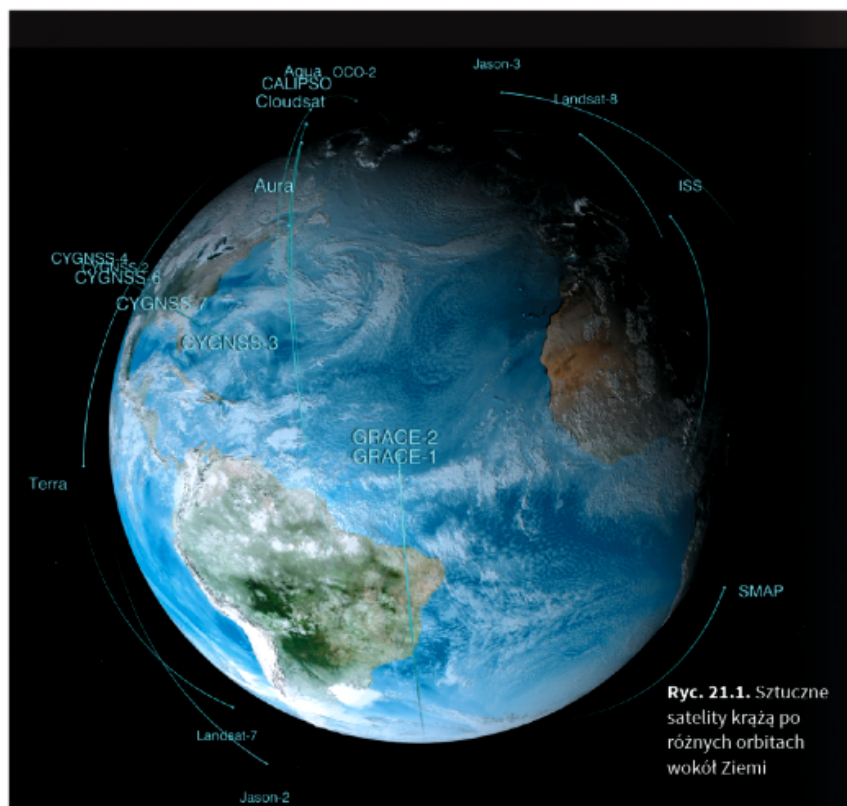
1. Oszacuj siłę ciężkości działającą między tobą a kolegą siedzącym obok. Czy możesz zmierzyć tę siłę za pomocą prostych przyrządów?
2. Przyspieszenie grawitacyjne na Księżycu jest sześć razy mniejsze niż na Ziemi. Astronauta ważący 80 kg chodził po powierzchni Księżyca w skafandrze ważącym również 80 kg. Ile razy lżejszy czuł się ten astronauta ze skafandrem na Księżycu niż bez skafandra na Ziemi?
3. Kometa Halleya okrąża Słońce po bardzo wydłużonej orbicie – najmniejsza jej odległość od Słońca to 0,6 au, a największa to 35 au. Ile razy większą siłą przyciąga Słońce komętę w najbliższym punkcie w porównaniu z punktem najdalszym?
4. Astronauta na Księżycu (gdzie przyspieszenie grawitacyjne jest sześć razy mniejsze niż na Ziemi) waży swojego kolegę na wadze szalkowej oraz sprężynowej. Kolega na Ziemi waży 70 kg. Co pokaże jedna, a co druga waga? Dlaczego?
5. Jaki wpływ na przyspieszenie spadających ciał ma fakt, że Ziemia wykonuje ruch obrotowy (siła bezwładności)? Przeanalizuj ten problem w przypadku, gdy ciało znajduje się kolejno: a) na równiku, b) w Polsce, c) na biegunach Ziemi. Sporządź odpowiednie rysunki, zaznaczając siłę grawitacji oraz bezwładności (wynikającą z obrotu Ziemi) działającą na człowieka.

21. Satelity. Prędkość orbitalna

- Satelity naturalne i sztuczne
- Prędkość orbitalna
- Satelity geostacjonarne

→ **Przypomnij sobie** prawo grawitacji i wiadomości o sile dośrodkowej.

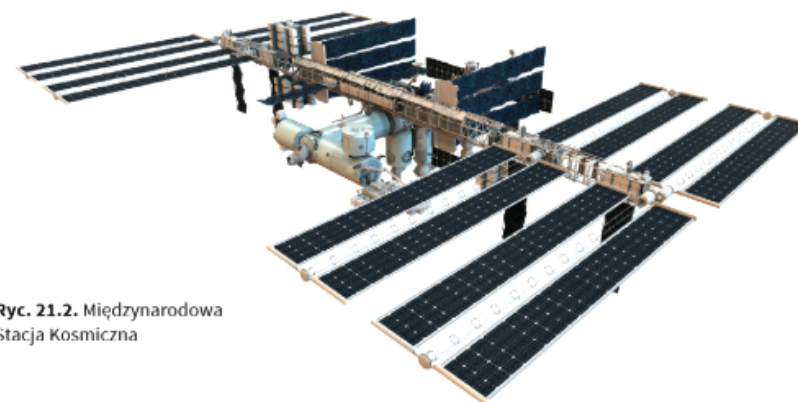
Dlaczego tak wiele ciał we Wszechświecie krąży wokół innych, bardziej masywnych? Trzeba zrozumieć ten ruch po orbitach, żeby zrozumieć kosmos, bezpiecznie wysłać ludzi w przestrzeń kosmiczną i umieszczać w niej sztuczne satelity, którym tak wiele zawdzięczamy.



Ryc. 21.1. Sztuczne satelity krążą po różnych orbitach wokół Ziemi

Sztuczne satelity

Satelita (ten satelita, rzeczownik rodzaju męskiego) to w astronomii obiekt okrążający inne ciało o większej masie. Na przykład księżycy są satelitami swoich planet, a niektóre małe planetoidy również mają swoje satelity. Od 1957 roku w kosmosie krążą także sztuczne satelity – obiekty wysłane przez człowieka, głównie obiegujące Ziemię, a także niektóre inne planety, takie jak Mars, Jowisz czy Saturn. **Wokół Ziemi krąży parę tysięcy sztucznych satelitów oraz jeszcze więcej odłamków pozostałych po nich.** Kilkanaście tysięcy sztucznych satelitów uległo już zniszczeniu – spaliły się w górnych warstwach atmosfery. Bez tych niewielkich obiektów (większość z nich ma tak małe rozmiary, że zmieściłyby się w pokoju) nie sposób wyobrazić sobie współczesnego życia. Wymieńmy chociażby telewizję satelitarną lub system GPS. Największym i najjaśniejszym sztucznym satelitą Ziemi jest Międzynarodowa Stacja Kosmiczna, czyli ISS⁴, budowana od 1998 roku.



Ryc. 21.2. Międzynarodowa Stacja Kosmiczna

Obserwowanie satelitów

Sztuczne satelity Ziemi są łatwym i wdzięcznym obiektem obserwacji. Codziennie można zobaczyć niektóre z nich gołym okiem: to świecące punkty, które nie mrugają i wolno przemieszczają się po niebie. Samoloty poruszają się podobnie, lecz mrugają kolorowymi światłkami. Satelity świecą tylko odbitym światłem słonecznym, stąd też czasem nagle znikają, gdy są jeszcze wysoko nad horyzontem. Zdarza się to wtedy, gdy wchodzi w cień Ziemi. Niektóre satelity, tzw. Iridium, puszcza w naszą stronę silne błyski. Szczególnie atrakcyjnym obiektem obserwacji jest Międzynarodowa Stacja Kosmiczna. Widać ją jako bardzo jasny punkt przesuwający się przez kilka minut po niebie. Na rycinie 21.3 przedstawiono przelot ISS na tle gwiazd. Czas ekspozycji był na tyle długi, że pozostawiła ona widoczny ślad.

⁴ ang. *International Space Station*.

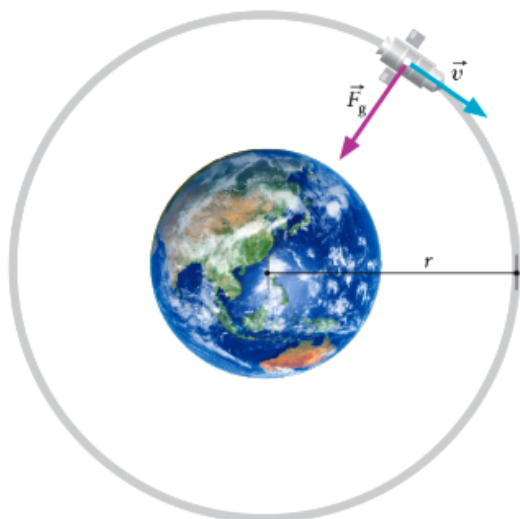


Ryc. 21.3. Przełot Międzynarodowej Stacji Kosmicznej

Wszystkie widoczne przełoty sztucznych satelitów nad każdą miejscowością znajdziesz dokładnie opisane na stronie www.heavens-above.com.

Prędkość orbitalna

Spróbujmy zrozumieć ruch takiego satelity i obliczyć jego prędkość. Załóżmy, że porusza się on po orbicie kołowej. W rzeczywistości większość satelitów ma orbity bardzo zbliżone do okręgu. Popatrzmy na rycinę 21.4. Żeby satelita mógł poruszać się po okręgu, musi na niego działać siła dośrodkowa (rozdział 10.).

Ryc. 21.4. Satelita obiegający Ziemię po okręgu o promieniu r z prędkością v

Oczywiście rolę tę odgrywa siła grawitacji skierowana do środka Ziemi, czyli do środka orbity. Jest to zresztą jedyna siła działająca na satelitę, ponieważ silniki – o ile satelity je mają – są włączane tylko po to, by zmienić orbitę. Satelity są umieszczane ponad atmosferą, zatem siła oporu powietrza w zasadzie nie występuje.

Znamy już (z rozdziału 10.) wzór na siłę dośrodkową:

$$F_d = \frac{mv^2}{r} \quad (1)$$

Z drugiej strony wiemy, że to siła grawitacji:

$$F_g = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2)$$

jest w tym wypadku siłą dośrodkową. Wobec tego zapisujemy, że:

$$F_d = F_g$$

Podstawiamy teraz wzory (1) oraz (2) i otrzymujemy:

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2}$$

Po uproszczeniu równania (m oraz r) wyznaczamy prędkość satelity:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (3)$$

Otrzymaliśmy wzór pozwalający obliczyć **prędkość orbitalną**, czyli prędkość satelity poruszającego się po okręgu o promieniu r wokół planety o masie M . Zwróćmy uwagę, że **na danej orbicie kołowej jest możliwa tylko jedna prędkość satelity**. Każda zmiana prędkości satelity oznacza zmianę orbity. Ze wzoru (3) łatwo też wywnioskować, że im większy promień orbity, tym mniejsza prędkość satelity, a jego masa nie ma tutaj znaczenia.

PRZYKŁAD 1.

Obliczmy (z dokładnością do trzech cyfr znaczących) prędkość, z jaką Międzynarodowa Stacja Kosmiczna krąży ok. 400 km nad powierzchnią Ziemi. Promień orbity ISS to promień Ziemi (6370 km) plus 400 km, czyli 6770 km. Masa Ziemi to $5,97 \cdot 10^{24}$ kg.

Podstawiamy dane do wzoru:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6770 \text{ km}}} = \sqrt{\frac{39,8 \cdot 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}^2}{6,77 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{kg}}} \approx \\ &\approx \sqrt{5,88 \cdot 10^7 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}}} = \sqrt{58,8 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} \approx 7,67 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Wyrażmy tę prędkość w km/h.

$$7,67 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7,67 \cdot 10^3 \cdot \frac{10^{-3} \text{ km}}{\frac{1}{3600} \text{ h}} = 7,67 \cdot 3600 \frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 27\,600 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

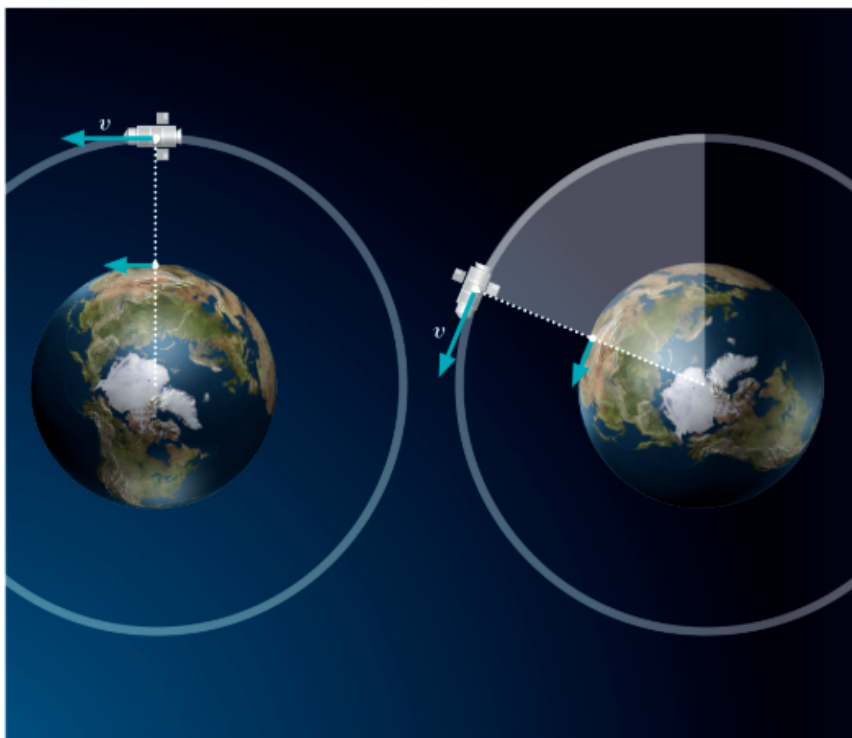
Jest to naprawdę duża prędkość. Na przykład nad Polską stacja przelatuje trochę ponad... 1 minutę.



Co należy zrobić, by umieścić satelitę na orbicie? Trzeba wynieść to urządzenie ponad atmosferę, czyli na wysokość co najmniej 200 km, i nadać mu prędkość skierowaną poziomo, o wartości trochę ponad 7,5 km/s. Wtedy można już wyłączyć silniki – obiekt będzie poruszał się po okręgu ze stałą prędkością, z wykorzystaniem wyłącznie ziemskiej grawitacji.

Satelity geostacjonarne

Satelita geostacjonarny to taki, którego cały czas można zobaczyć w jednym punkcie nieba. Takie satelity to podstawa działania telewizji satelitarnej. Anteny ustawione są na stałe w jednym miejscu i skierowane w jeden punkt nieba, zatem ciągły sygnał mogą im zapewnić tylko satelity nieruchome względem anteny. Czy to możliwe? Owszem. Wystarczy, że umieścimy takiego satelitę na orbicie kołowej w płaszczyźnie równika z okresem obiegu równym jednej dobie. Wtedy będzie on krążył niejako w tym samym tempie, w którym obraca się Ziemia (ryc. 21.5). Satelity krążące blisko Ziemi mają dużo krótsze okresy obiegu. Satelita geostacjonarny krąży po orbicie o promieniu ok. 42 tys. km.



Ryc. 21.5. Satelita geostacjonarny wciąż „wisi” w jednym punkcie nieba nad anteną

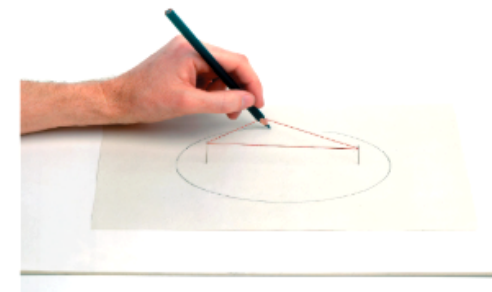


WARTO WIEDZIEĆ

Orbity eliptyczne

Orbity wielu sztucznych satelitów nie są okręgami, lecz elipsami. Elipsa to krzywa, którą łatwo można narysować. W dwa punkty nazywane ogniskami elipsy wbijamy pinezki, zahaczamy o nie sznurek i napinając go na długopisie, rysujemy właśnie elipsę (ryc.).

Elipsy mogą być bardzo spłaszczone (ogniska daleko od środka) lub zbliżone do okręgu (ogniska blisko środka). Jeśli ziemski satelita porusza się po elipsie, to Ziemia jest w jednym z ognisk tej elipsy.



Planety można uważać za satelity Słońca. Ich orbity są elipsami, a Słońce jest w jednym z ognisk każdej z takich elips. Na początku stycznia Ziemia jest najbliżej Słońca – w odległości 147 mln km, a na początku lipca jest najdalej – w odległości 152 mln km. Różnica odległości wynosi aż 5 mln km, ale jednocześnie można obliczyć, że odległość Ziemi od Słońca zmienia się w ciągu roku tylko o 3 %. Orbity planet można w pierwszym przybliżeniu traktować jako okręgi, bo są bardzo do nich podobne, ale orbity komet to z kolei bardzo wydłużone elipsy.

Powszechność kosmicznego krążenia

Wzór (3) na prędkość orbitalną otrzymaliśmy z zastosowaniem tylko podstawowych praw fizyki. Rycina 21.4 mogłaby równie dobrze przedstawiać księżyc krążący wokół pewnej planety lub planetę okrążającą gwiazdę. Wobec tego wzór (3) pozwala wyznaczyć prędkość każdego obiektu okrążającego po okręgu wskutek działania siły grawitacji ciała o wielokrotnie większej masie. Jeśli chcemy obliczyć z tego wzoru prędkość naszego Księżyca na orbicie okołozemskiej, trzeba do niego podstawić masę Ziemi. Jeśli chcemy wyznaczyć prędkość samej Ziemi w ruchu wokół Słońca, musimy podstawić masę Słońca. Dlaczego we Wszechświecie obserwujemy tyle ciał obiegających bardziej masywne ciała po okręgu lub innych bardziej skomplikowanych krzywych? Po pierwsze dlatego, że siła grawitacji świetnie odgrywa rolę siły dośrodkowej. Po drugie – ciała, które nie miały prędkości koniecznej do ruchu po orbicie, już dawno spadły na sąsiednie obiekty o większej masie.



PODSUMOWANIE

- ▶ **Satelita** to ciało obiegające pod wpływem siły grawitacji inne, bardziej masywne ciało.
- ▶ **Sztuczne satelity** zostały umieszczone w kosmosie przez ludzi.
- ▶ Każdy satelita poruszający się po okręgu o promieniu r ma tzw. **prędkość orbitalną**, wyrażoną wzorem:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

gdzie M jest masą ciała centralnego.

- ▶ **Satelity geostacjonarne** obiegają Ziemię w czasie jednej doby.

PYTANIA I ZADANIA

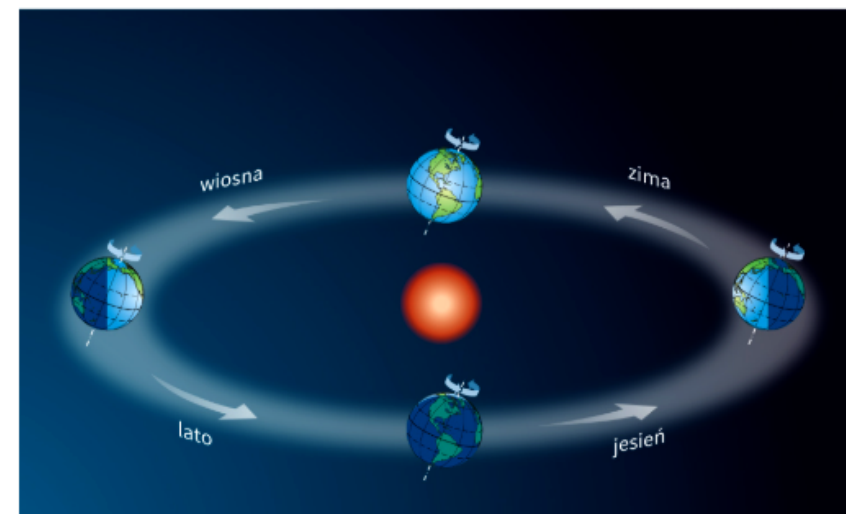
1. Oblicz okres obiegu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Dane i wzory potrzebne do obliczeń znajdziesz w tekście przykładu.
2. Jaką prędkość ma Księżyc – naturalny satelita Ziemi – krążący wokół niej w odległości 384 000 km?
3. Sprawdź w internecie i wyjaśnij, jakie są główne zadania wykonywane przez satelity.
4. Większość satelitów wystrzeliwuje się tak, że krążą z zachodu na wschód. Dlaczego? Wskazówka: zastanów się, czy do nadania prędkości orbitalnej można wykorzystać ruch wirowy Ziemi.
5. Satelity widoczne są po zmierzchu oraz przed świtem. Nie widać ich na naszym niebie około północy. Dlaczego? Wskazówka: w środkowej części nocy Słońce jest głęboko pod horyzontem.

22. Wyznaczanie mas planet i gwiazd

- Metoda ważenia Słońca, planet i gwiazd
- Czarna dziura w centrum Galaktyki

→ **Przypomnij sobie** prawo grawitacji i wiadomości o ruchu po okręgu.

Bez znajomości prawa grawitacji nie potrafilibyśmy zrozumieć ruchu planet, gwiazd i satelitów. Nic też byśmy nie wiedzieli o masach ciał niebieskich. Jeśli jednak mamy tak potężne narzędzie, jakim jest prawo grawitacji, możemy względnie łatwo „zważyć” Ziemię, Słońce czy planety.



Ryc. 22.1. Ziemia na orbicie wokółsłonecznej (skale wielkości i odległości nie zostały zachowane)

Spróbujmy się zastanowić, jak można wyznaczyć masę ciał niebieskich. Rozważmy na przykład Słońce (ryc. 22.1). Dookoła Słońca krążą planety, m.in. Ziemia. Prędkość orbitalną naszej planety możemy obliczyć ze wzoru (3) z rozdziału 21:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (1)$$

gdzie M to masa Słońca, a r – promień orbity ziemskiej.

Przekształćmy ten wzór (podnieśmy obie strony do potęgi drugiej) i wyznaczmy z niego M :

$$M = \frac{rv^2}{G} \quad (2)$$

Z rozdziału 10. wiemy, że prędkość w ruchu po okręgu można opisać wzorem:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (3)$$

Wzory (2) i (3) pozwalają obliczyć masę każdego ciała niebieskiego, które ma przynajmniej jednego satelitę. Na podstawie obserwacji trzeba najpierw wyznaczyć promień orbity oraz okres obiegu satelity. Następnie ze wzoru (3) należy obliczyć jego prędkość i na koniec ze wzoru (2) – szukaną masę ciała centralnego, dookoła którego krąży satelita.

PRZYKŁAD 1.

Obliczmy masę Słońca. Wybierzmy Ziemię jako obiegającego je satelitę. Skorzystajmy z danych w tabeli w rozdziale 19.

$$v \approx 29,8 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 29,8 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$r = 1 \text{ au} = 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

Dane podstawiamy do wzoru (2), a obliczenia przeprowadzamy z dokładnością do trzech cyfr znaczących:

$$M = \frac{1,50 \cdot 10^{11} \text{ m} \cdot \left(29,8 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2}} \approx \frac{1330 \cdot 10^{17} \text{ m} \cdot \text{kg}^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{s}^2} \approx 199 \cdot 10^{28} \frac{\text{m} \cdot \text{kg}^2}{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{s}^2} =$$

$$= 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

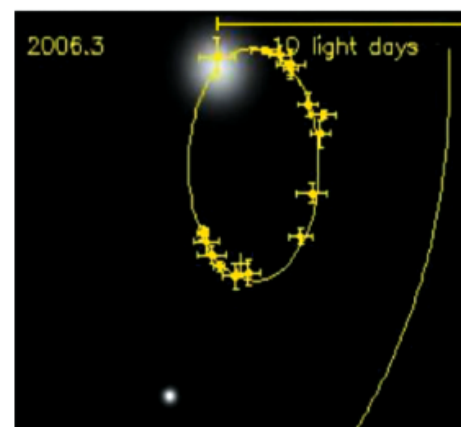
Otrzymany przez nas wynik jest taki sam – z dokładnością do trzech cyfr znaczących – jak podawany w różnych źródłach.

Masa Słońca to 2 miliardy miliardów miliardów ton. Właśnie z powodu tej ogromnej masy to planety krążą wokół niego, a nie na odwrót. Choć masy planet – szczególnie Jowisza – są imponujące, przypomnijmy raz jeszcze, że samo Słońce to prawie 99,9 % masy całego Układu Słonecznego.

O znaczeniu wzoru (2) dobitnie świadczy choćby taki szczegół: w czasach młodości autorów tego podręcznika nie znano np. masy Plutona i dopiero gdy w 1978 roku odkryto księżyc Plutona – Charon – wyznaczenie masy ze wzoru (2) stało się stosunkowo proste.

Supermasywna czarna dziura

Słońce zalicza się do grona miliardów gwiazd należących do olbrzymiego układu zwanego **Galaktyką** lub **Drogą Mleczną**.



Ryc. 22.2. Gwiazda S2 obiegająca centrum Galaktyki. Krzyżyki pokazują zmierzone położenia gwiazdy wraz z niepewnością pomiarową. 10 dni świetlnych (10 light days) to odległość, którą światło przebywa w ciągu 10 dni

Na rycinie 22.2 zilustrowano bardzo dokładne pomiary położenia gwiazdy oznaczanej jako S2, leżącej najbliżej centralnego punktu Galaktyki. Okres obiegu tej gwiazdy wynosi ok. 15 lat. Nie wiemy jednak, czy płaszczyzna orbity tej gwiazdy jest prostopadła do kierunku obserwacji. Nasuwa się kluczowe pytanie: wokół czego krąży ta gwiazda o masie 15 razy większej od masy Słońca? Zgodnie z prawem grawitacji musi ją przyciągać ciało leżące wewnątrz orbity, o masie zdecydowanie większej. Ze wzorów (2) i (3) można łatwo obliczyć tę masę (patrz zadanie 5.). Po dokładnej analizie okazuje się, że ten tajemniczy i zupełnie niewidzialny obiekt ma masę ponad 4 miliony razy większą od masy Słońca! Według naszej wiedzy może to być tylko **czarna dziura**. Właśnie w ten sposób udowodniono, że **w samym centrum Drogi Mlecznej znajduje się supermasywna czarna dziura**. Jeśli rozumiemy prawa przyrody, możemy widzieć rzeczy niewidzialne.

Czarne dziury

Prędkość światła w próżni to maksymalna możliwa prędkość w przyrodzie. Zastanówmy się, czy mogą istnieć planety lub gwiazdy o tak potężnej grawitacji, że światło okrążałoby je po okręgu. Po wstawieniu do wzoru (1) $v = c$ otrzymamy warunek na masę i promień takiego ciała⁵:

$$r = \frac{GM}{c^2} \quad (4)$$

Faktycznie istnieją obiekty o tak olbrzymim przyciąganiu, że nie może z nich uciec nawet światło. Właśnie te ciała noszą nazwę czarnych dziur. Niestety, prawo grawitacji Newtona nie wystarczy, by je poprawnie opisać. Do tego niezbędna jest teoria grawitacji Einsteina (patrz tekst *Najszczęśliwsza myśl Einsteina*). Na szczęście podstawowy warunek definiujący czarną dziurę jest na tyle prosty, że możemy go tu przytoczyć. Otóż czarną dziurą jest każde ciało, którego masa mieści się w kuli o promieniu danym wzorem (4).

⁵ Często podaje się dwukrotnie większą wartość promienia czarnej dziury, niż wynika ze wzoru (4), jednak jest ona prawdziwa tylko dla nieobracających się czarnych dziur.

Ze wzoru (4) można obliczyć, że na przykład czarna dziura o masie Ziemi musiałaby mieć rozmiar mniejszy od piłeczki pingpongowej! Nie znamy sił mogących ścisnąć naszą planetę do tak małych rozmiarów, ale wiemy, że ciała o olbrzymich masach mogą się w pewnych warunkach zapaść pod wpływem własnej grawitacji tak mocno, że powstanie czarna dziura.

Bez prawa ciężenia i wzoru (2), który z tego prawa wynika, wyznaczenie mas Słońca czy planet byłoby niemożliwe. Na tym polega potęga nauki: znajomość praw natury pozwala nam osiągnąć rzeczy dotąd nieosiągalne. Jednak zawsze jest jakieś „ale”. Jeśli gwiazda ma satelitę – co jest na szczęście powszechne – możemy poznać dokładnie jej masę. Jeśli żyje samotnie, wyznaczenie jej masy jest znacznie trudniejsze.

PODSUMOWANIE

- ▶ Prawo powszechnego ciężenia pozwala zważyć każde ciało niebieskie mające satelitę.
- ▶ **Czarne dziury** to obiekty o tak potężnej grawitacji, że nawet światło nie może ich opuścić.
- ▶ W centrum Galaktyki, czyli Drogi Mlecznej, znajduje się **supermasywna czarna dziura**.

PYTANIA I ZADANIA

1. Oszacuj, ile razy masa Słońca jest większa od masy Ziemi.
2. Dla których planet nie można wyznaczyć masy za pomocą wzorów (2) i (3)?
3. Naukowcy postanowili umieścić sondę badawczą na orbicie wokół Wenus, dzięki czemu będą mogli m.in. wyznaczyć dokładniej masę tej planety. Jak powinni zaplanować misję i co należy zmierzyć?
4. Wyznacz masę Jowisza. Potrzebne dane odczytaj z tabeli.

Nazwa księżyca	Średnica (km)	Promień orbity (tys. km)	Okres obiegu (doba ziemska)	Gęstość (g/cm ³)	Przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni (m/s ²)
Io	3643	421	1,77	3,53	1,8
Europa	3122	671	3,55	3,01	1,31
Ganimedes	5262	1070	7,16	1,94	1,43
Kallisto	4821	1883	16,7	1,83	1,23

5. Na podstawie informacji zawartych w rozdziale 22. i rycinie 22.2 oszacuj masę czarnej dziury w centrum Galaktyki. Załóż, że gwiazda S2 porusza się po okręgu, który widzimy pod pewnym kątem.



23. Nieważkość i przeciążenie

- Stan nieważkości
- Przeciążenie

→ Przypomnij sobie wiadomości o sile bezwładności.



Ryc. 23.1. Stephen Hawking unoszący się w stanie nieważkości

Nieważkość

Na rycinie 23.1 przedstawiono wybitnego, nieżyjącego już fizyka Stephena Hawkinga unoszącego się w stanie nieważkości. Od wielu lat sparaliżowany, marzył o tym przeżyciu. Aby tego doświadczyć, nie musiał polecieć w kosmos. Zdjęcia zostały zrobione wewnątrz samolotu, który mniej więcej przez 20 sekund poruszał się z przyspieszeniem ziemskim. Dlaczego Stephen nie spada na podłogę? Oczywiście spada, z przyspieszeniem ziemskim $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. Tak spadają wszystkie ciała, na które działa tylko siła ciężkości. Wobec tego podłoga również spada z tym samym przyspieszeniem g . Ponieważ Stephen i podłoga spadają tak samo, odległość między nimi się nie zmienia. Skoro wszystkie przedmioty w samolocie (oraz sam samolot) spadają z tym samym przyspieszeniem, nie wywierają nacisku na podłogę.

Nieważkość to stan występujący podczas ruchu odbywającego się wyłącznie pod wpływem siły grawitacji.

Gdzie występuje stan nieważkości? Rzecz jasna – na statkach kosmicznych okrążających Ziemię, bo działa na nie tylko przyciąganie grawitacyjne naszej planety. Wobec tego

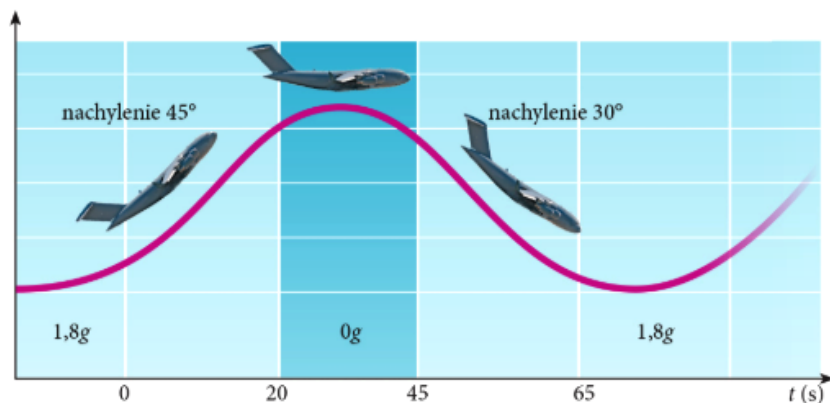
astronauci spadają z takim samym przyspieszeniem jak sam statek. W stanie nieważkości różne substancje zachowują się w sposób dla nas nieoczekiwany. Nawet duże porcje wody tworzą krople unoszące się swobodnie w powietrzu. Bez wymuszonej wentylacji płomień od razu gaśnie, a astronauci udusiliby się, nawet gdyby oddychali w atmosferze czystego tlenu.

Jednak stan nieważkości może występować nie tylko w kosmosie. Przyjrzyjmy się pękowi kluczy zwisającemu na sznurku. Dlaczego zwisa? Bo działa na niego w dół siła ciężkości. Jednak nie tylko dlatego. Działa na niego również siła pochodząca od sznurka, równoważąca siłę ciężkości. Jeśli jednak rzucimy klucze w górę lub na skos, to podczas lotu niekoniecznie będą zwisały w dół – będzie działała na nie tylko siła ciężkości, więc będą w stanie nieważkości.

DOŚWIADCZENIE 1.

Napełnij wodą plastikową butelkę. Zrób w niej otwór, z którego woda może wyciekać (czy jeden otwór wystarczy?). Następnie rzuć butelkę, najlepiej w górę na ukos. Czy w trakcie lotu woda nadal wycieka? Jeśli tego dobrze nie widzisz, nakręć film i go obejrzyj. Doświadczenie wykonaj na dworze.

Żeby Stephen Hawking mógł wreszcie przez chwilę unosić się pod sufitem, musiał najpierw wznieść się w górę samolotem. Na rycinie 23.2 można zobaczyć, jak leciał przewożący go samolot. W obszarze zaznaczonym na wykresie ciemniejszym kolorem silniki działały tak, by tylko zrównoważyć siły działające na samolot ze strony powietrza. Wtedy samolot poruszał się z przyspieszeniem ziemskim.



Ryc. 23.2. Tor ruchu samolotu, w którym można doświadczyć nieważkości

Przeciążenie

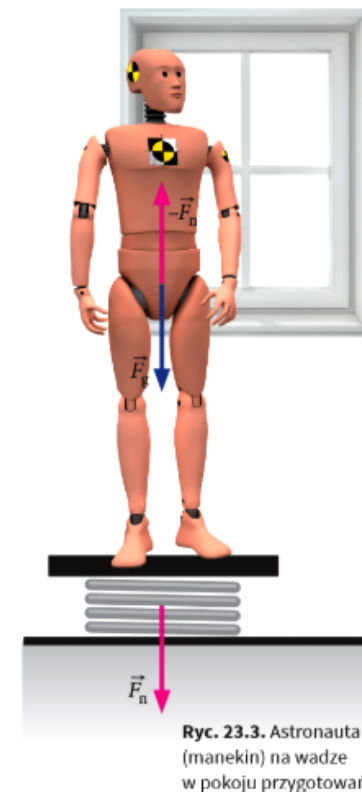
W czasie wznoszenia się samolotu ruchem przyspieszonym Stephen Hawking przeżył zupełnie inny stan. Spróbujmy to zrozumieć na przykładzie astronauty znajdującego się w startującej rakiecie. Zakładamy najpierw, że astronauta zważył się przed lotem w pokoju przygotowań (ryc. 23.3).

Na astronautę działa oczywiście siła ciężkości $\vec{F}_g$. Jednocześnie astronauta działa na wagę siłą nacisku o wartości F_n , a waga na niego siłą o tej samej wartości, ale przeciwnie skierowaną (III zasada dynamiki). Astronauta zgodnie z I zasadą dynamiki może być w spoczynku tylko wtedy, gdy działające na niego siły równoważą się. Dlatego właśnie waga pokazuje ciężar astronauty.

Jeśli astronauta leci w górę z pewnym przyspieszeniem a , musimy się zdecydować, w jakim układzie odniesienia rozpatrzmy jego stan. Zrobmy to w układzie rakiety. Jest to układ nieinercyjny, zatem na astronautę działa siła bezwładności skierowana w dół (patrz rozdział 11.). W tym układzie astronauta jest w spoczynku, stąd z I zasady dynamiki wynika, że siła nacisku musi zrównoważyć sumę sił ciężkości i bezwładności. Wobec tego waga pokaże więcej, niż astronauta waży w pokoju przygotowań (ryc. 23.4).

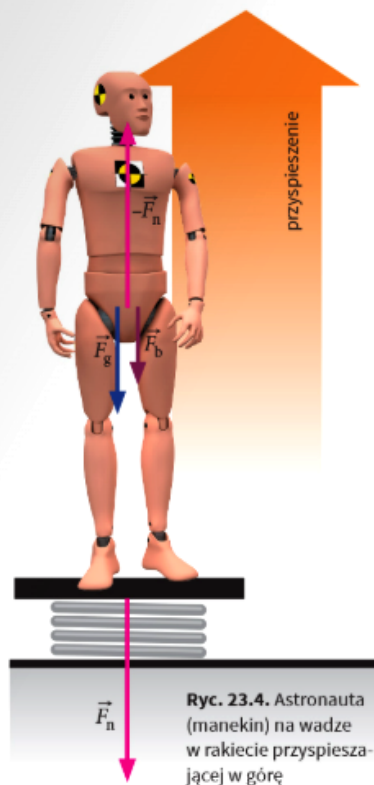
Taki stan nazywamy **przeciążeniem**. Najczęściej występuje on wtedy, gdy ciało ma przyspieszenie skierowane w górę lub poziomo. W układzie związanym z przyspieszającym ciałem przyczyną tego stanu jest siła bezwładności. Zauważmy, że nadaje ona wszystkim ciałom takie samo przyspieszenie – przeciwne do przyspieszenia samego układu. Siła ciężkości również nadaje wszystkim ciałom takie samo przyspieszenie. Trudno więc odróżnić efekty działania obu sił⁶. Wobec tego w układzie nieinercyjnym stwierdzamy po prostu, że wszystkie ciała są cięższe.

Przeciążenie to stan, gdy wypadkowa sił ciężkości i bezwładności ma wartość większą od ciężaru ciała.



Ryc. 23.3. Astronauta (manekin) na wadze w pokoju przygotowań

⁶ Przeczytaj tekst *Najszczęśliwsza myśl Einsteina*, s. 222.



Ryc. 23.4. Astronauta (manekin) na wadze w rakiecie przyspieszającej w górę

Stopień przeciążenia wyraża się najczęściej w krotności przyspieszenia ziemskiego g . Na przykład jeśli samolot wznosi się z przyspieszeniem równym $1,8g$ (ryc. 23.2), przeciążenie pasażera wynosi $2,8g$ (bo suma siły ciężkości i siły bezwładności jest $2,8$ razy większa od ciężaru). Duże przeciążenie może być niebezpieczne, bo wszystkie narządy naszego ciała naciskają wówczas na swoje podłoże siłą dużo większą od ich ciężaru. Zachowują się tak, jak gdyby były cięższe. Na przykład krew z głowy odpływa w dół, co może spowodować omdlenie lub chwilową utratę wzroku. Łatwo stąd wywnioskować, że przeciążenia łatwiej się znosi w pozycji leżącej.

Przeciążenia możemy doświadczyć (przez moment) w szybkiej windzie ruszającej w górę. Jeśli ktoś korzysta ze skateparku lub jeździ na nartach, powinien być przygotowany na większe wyzwania (przykład 1.). Na rycinie 23.5 przedstawiono pilota do-



Ryc. 23.5. Na zdjęciach pokazano, co dzieje się z pilotem w stanie przeciążenia

świadczającego dużego przeciążenia. Niebezpieczne dla życia przeciążenia zdarzają się podczas wypadków samochodowych. Gdy auto gwałtownie hamuje, pasażer jest narażony na ogromne przeciążenie. Chyba rekordowe przeciążenie przeżył kierowca Formuły 1 David Purley (ryc. 23.6) w roku 1977, gdy jego pojazd, jadący z prędkością 173 km/h , uderzył w ścianę (droga hamowania wynosiła 66 cm). Przeciążenie przez ułamek sekundy wynosiło ok. $180g$!



Ryc. 23.6. David Purley po wypadku, który przeżył w 1977 roku, powrócił do wyścigów samochodowych

PRZYKŁAD 1.

Obliczmy przeciążenie, jakiego doświadcza deskorolkarz zjeżdżający z pochyłości na rampie.

Załóżmy, że porusza się on po okręgu. Z ryciny widać, że promień tego okręgu jest w przybliżeniu równy wysokości, z której zjeżdża nasz obiekt. Najpierw ustalmy, jaką prędkość osiąga deskorolkarz w najniższym położeniu. Opory ruchu pomijamy. Prędkość osiągniętą przy zjeździe z wysokości h możemy obliczyć ze wzoru (rozdział 16.):

$$v^2 = 2hg$$

W najniższym punkcie na deskorolkarza działa (w jego własnym układzie nieinercyjnym) siła bezwładności (rozdział 11.) dana w ruchu po okręgu wzorem:

$$F_b = \frac{mv^2}{r}$$

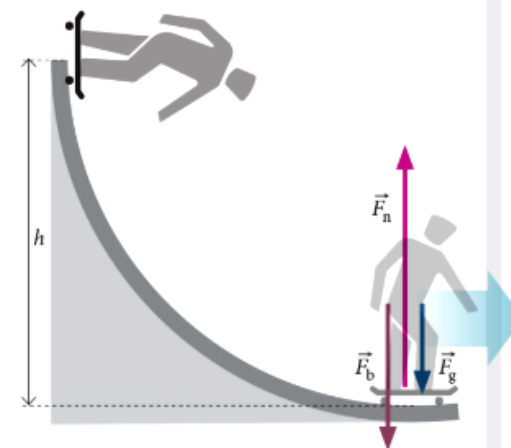
Podstawiamy $r = h$ oraz wyrażenie na kwadrat prędkości i otrzymujemy:

$$F_b = \frac{m \cdot 2hg}{h} = 2mg$$

Siła bezwładności jest zatem dwukrotnie większa od ciężaru deskorolkarza, niezależnie od jego masy i promienia pochyłości rampy! Żeby deskorolkarz zachował równowagę (spoczynek w swoim układzie), musi na niego działać siła nacisku równoważąca sumę siły ciężkości i siły bezwładności, czyli:

$$F_n = mg + 2mg = 3mg$$

Deskorolkarz doświadcza więc przeciążenia $3g$. Nie każdy jest w stanie utrzymać równowagę, gdy nagle staje się trzykrotnie cięższy. Warto wziąć to pod uwagę przed podobnymi wyczynami. To samo dotyczy np. narciarza, który pokonuje spory dołek.



Międzynarodowa Stacja Kosmiczna

ISS (International Space Station) jest największym sztucznym satelitą Ziemi – jej wielkość jest porównywalna z boiskiem piłkarskim. Stacja krąży wokół naszej planety na wysokości ok. 400 km. Na jej pokładzie może jednocześnie pracować maksymalnie 6 astronautów.

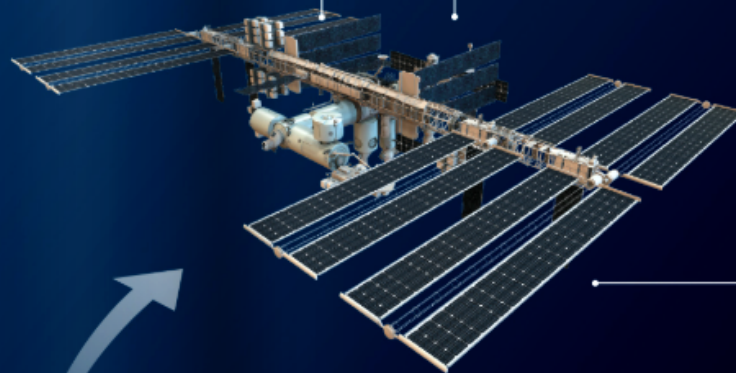
Podczas spaceru kosmicznego astronauta jest połączony ze statkiem linką lub specjalnym przewodem bądź korzysta z silników odrzutowych

W plecaku znajduje się zapas powietrza oraz urządzenia podtrzymujące życie

Skafander stanowi jedyną ochronę astronauty przed promieniowaniem słonecznym i zabójczą próżnią



Międzynarodowa Stacja Kosmiczna składa się z 16 modułów stanowiących całość. Źródłem zasilania ISS są baterie słoneczne. Stacja jest tak duża, że jest dobrze widoczna z powierzchni Ziemi



Pojęcia „góra” i „dół” na pokładzie stacji kosmicznej są względne. Podczas posiłku można również unosić się nad stołem



W stanie nieważkości kropla wody – nawet duża – przyjmuje kształt kuli.



W stanie nieważkości astronautom grozi utrata masy mięśniowej. Codzienna porcja ćwiczeń w pokładowej siłowni ogranicza negatywny wpływ nieważkości na organizm

400 km

6400 km



Zauważmy, że stan nieważkości można również wyjaśnić za pomocą siły bezwładności. Gdy spadamy z przyspieszeniem ziemskim, układ odniesienia związany z naszym ciałem jest nieinercjalny. Działa na nas siła bezwładności skierowana przeciwnie do siły ciężkości. Zgodnie ze wzorem z rozdziału 11. ma ona wartość mg czyli taką jak siła ciężkości. Wobec tego siła bezwładności równoważy siłę ciężkości. Zatem spadając swobodnie, nie czujemy swojego ciężaru, bo równoważy go siła bezwładności. **Nieważkość to stan, gdy siła bezwładności równoważy siłę grawitacji.**

PODSUMOWANIE

- ▶ **Nieważkość** to stan, gdy nie odczuwamy swojego ciężaru. Występuje on np. podczas swobodnego spadania.
- ▶ **Przeciążenie** to stan, gdy wypadkowa sił ciężkości i bezwładności ma wartość większą od ciężaru ciała.
- ▶ **Przeciążenie** występuje najczęściej w układach poruszających się z przyspieszeniem skierowanym poziomo lub do góry.

PYTANIA I ZADANIA

1. Czy pasażer w windzie, w której przecięto wszystkie podtrzymujące ją liny oraz usunięto blokadę awaryjną, będzie w stanie nieważkości? Pomijamy opory ruchu. Uzasadnij swoją odpowiedź.
2. Jaką siłą naciska na fotel astronauta o masie 80 kg w chwili, gdy przyspieszenie rakiety startującej z Ziemi wynosi $5,5g$?
3. Jarek wsiada na parterze do szybkiej windy. Ma ze sobą wagę sprężynową. Z ciekawości staje na niej i zaczyna wjeżdżać na trzydzieste piętro. Opisz, jak zmienia się wskazanie wagi w czasie całej jazdy.
4. Obok Jarka (patrz zadanie 3.) stoi w windzie Beatka, trzymająca klatkę z kanarkiem na wadze szalkowej. Przy wsiadaniu waga jest zrównoważona. Czy w trakcie jazdy szalka wagi będzie się przechylać? Jeśli tak, to w którą stronę? Czy (i kiedy) kanarek będzie odczuwał przeciążenie?
5. Oblicz czas hamowania Davida Purleya (dane na s. 185). Uzasadnij również poprzez wykonanie odpowiednich obliczeń, że w tekście poprawnie podano wartość przeciążenia.

24. Budowa Wszechświata

- Rok świetlny
- Mgławice i gwiazdy
- Galaktyka, czyli Droga Mleczna
- Galaktyki we Wszechświecie

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o Układzie Słonecznym.



Ryc. 24.1. Gwiazdy krążące wokół Gwiazdy Polarnej

„A coś piękniejszego od nieba, które przecież ogarnia wszystko, co piękne?”⁷ – zapewne większość z nas podziela ten pogląd Mikołaja Kopernika. Oglądanie nocnego nieba w całym jego pięknie nie jest wcale takie łatwe w czasach, gdy nawet wsie mają nocą włączone oświetlenie, przy którym nie widać gwiazd. Z pewnością warto postarać się zobaczyć, jak naprawdę wygląda rozgwieżdżone niebo.

Sfera niebieska

Gdy patrzemy na migoczące słabo gwiazdy, od razu mamy wrażenie, że są bardzo, bardzo daleko. Ponieważ wszystkie gwiazdy są tak daleko, że nie potrafimy na oko odróżnić, które są bliżej, a które dalej, postrzegamy je jako leżące w jednakowej odległości od Ziemi.

⁷ Mikołaj Kopernik, *O obrotach*, PWN, Warszawa-Kraków 1976, s. 7.



Ryc. 24.2. Zdjęcie gwiazdozbioru Orion, widocznego w Polsce jesienią i zimą

Nocne niebo wygląda zatem tak, jakby było namalowane na wewnętrznej powierzchni kuli, podczas gdy my stoimy w jej środku. Dlatego od niepamiętnych czasów mówi się o **sferze niebieskiej**, na której leżą gwiazdy. Już w początkach cywilizacji zauważono, że sfera ta dokonuje pełnego obrotu w ciągu jednej doby i obraca się wokół osi, która w dzisiejszej epoce „przebija” ją tuż obok Gwiazdy Polarnej. Nic zatem dziwnego, że przez tysiąclecia pokolenia uczonych były absolutnie przekonane, że niebo obraca się wokół nieruchomej Ziemi (tekst 2, s. 226). Gwiazdy są rozrzucone na niebie zupełnie przypadkowo, jednak ludzie chcieli wprowadzić w ten chaos jakiś porządek. Podzielono zatem niebo na **gwiazdo-**

zbiory. Dwanaście z nich leży w tzw. pasie zodiaku i cieszy się szczególną sławą ze względu na swoje astrologiczne znaczenie. **Astrologia, czyli sztuka stawiania horoskopów, nie ma żadnego naukowego uzasadnienia.** Zodiak natomiast ma istotne znaczenie astronomiczne: właśnie w nim pojawiają się na niebie Słońce, Księżyc i wszystkie planety. Czy planety można zobaczyć bez teleskopu? Tak, tylko do obserwacji Neptuna konieczny jest teleskop. Na niebie planety wyglądają zupełnie podobnie do gwiazd i trzeba mieć trochę wprawy, by je od nich odróżnić (np. po uważnej obserwacji możemy stwierdzić, że nie mrugają). Planety wędrują na tle gwiazd, więc ich aktualne położenie na tle gwiazdozbiorów trzeba sprawdzić, np. w internecie. Warto zobaczyć na własne oczy Wenus, Marsa, Jowisza i Saturna. Każdy może robić ciekawe zdjęcia nieba, nie jest do tego konieczny profesjonalny sprzęt. Na przykład zdjęcia na s. 190 i 192 zostały wykonane tylko z użyciem amatorskiego sprzętu.

Rok świetlny i czasoprzestrzeń

Odległości od gwiazd są tak ogromne, że wyrażanie ich w kilometrach czy nawet w jednostkach astronomicznych (au) jest niepraktyczne. Odpowiednią jednostką odległości jest w tym przypadku rok świetlny. **Rok świetlny to odległość, jaką pokonuje w próżni światło w ciągu jednego roku.** Prędkość światła wynosi prawie 300 000 km/s. Światło mogłoby w ciągu jednej sekundy okrążyć Ziemię ponad siedem razy, a tu ma lecieć cały rok! Żeby ustalić, ile kilometrów ma rok świetlny, obliczmy najpierw, ile sekund ma rok:

$$1 \text{ rok} = 365,24 \text{ dni} = 365,24 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} = 31\,556\,736 \text{ s}$$

Najczęściej używanym symbolem roku świetlnego jest ly⁸, a zatem:

$$1 \text{ ly} = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot 31\,556\,736 \text{ s} = 9\,467\,020\,800\,000 \text{ km} \approx 9,5 \cdot 10^{12} \text{ km}$$

To olbrzymia odległość. W zaokrągleniu napiszemy, że rok świetlny to ok. 10¹³ km, czyli 10 bilionów kilometrów.

Najbliżej nas położona gwiazda – jeśli nie liczyć Słońca – to układ Alfa Centauri (niewidoczny z Polski), odległy o ponad cztery lata świetlne. Najjaśniejsza gwiazda nieba – Syriusz – jest oddalona o ponad osiem lat świetlnych. Najjaśniejsza spośród gwiazd zawsze w Polsce widocznych – Wega – mruga z odległości 25 lat świetlnych. A światło Gwiazdy Polarnej musi do nas lecieć 431 lat.

Prędkość światła w próżni to maksymalna możliwa prędkość ciał materialnych, zatem gdy patrzymy na gwiazdy, widzimy przeszłość. Gdy patrzymy na Węgę, widzimy ją w stanie, w jakim była ćwierć wieku temu. Żaden sygnał nie mógł podróżować do nas z Węgi krócej. Zatem gdy obserwujemy Węgę, naprawdę widzimy przeszłość sprzed 25 lat. Gdy patrzymy na Gwiazdę Polarą, widzimy jej obraz z czasów Jana Kochanowskiego i Stefana Batorego! Niestety, przeszłość można zobaczyć tylko w wypadku obiektów odległych przestrzennie. **Im dalej sięgamy w przestrzeń, tym głębiej patrzymy w przeszłość.** Nie możemy zobaczyć Wszechświata takiego, jaki jest teraz. To jeden z ważnych aspektów Einsteińskiej **czasoprzestrzeni**.

PRZYKŁAD 1.

Spróbujmy obliczyć, ile czasu potrzebuje światło, by dotrzeć ze Słońca do Neptuna?

Odległość odczytujemy np. z tabeli 1. w rozdziale 19. Przyjmijmy, że od Słońca do Neptuna jest 4,5 miliarda kilometrów. Wobec tego:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{4\,500\,000\,000 \text{ km}}{300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}} = \frac{45\,000}{3} \text{ s} = 15\,000 \text{ s} \approx 4,2 \text{ h}$$

Światło będzie lecieć ze Słońca do Neptuna trochę ponad cztery godziny. Można zatem powiedzieć, że Neptun znajduje się w odległości czterech godzin świetlnych od Słońca. Chyba nie warto przeliczać tej odległości na lata świetlne.

Gwiazdy i mgławice

Podstawowym składnikiem Wszechświata są gwiazdy – tak się przynajmniej wydaje, gdy patrzymy na niebo. Liczba gwiazd w obserwowanej części Wszechświata jest niewyobrażalnie duża (choć gołym okiem można zobaczyć najwyżej kilka tysięcy – scenariusz doświadczenia 5.). Jest ich więcej niż ziaren piasku na wszystkich plażach świata. Co to są gwiazdy? To obiekty świecące własnym światłem dzięki reakcjom jądrowym. Oprócz gwiazd obserwuje się **mgławice**, czyli gazowe obłoki zawieszone w bezkresnej międzygwiazdnej przestrzeni. Mają różne kolory i kształty, a niektóre z nich są wyjątkowo piękne. Najjaśniejsza z nich znajduje się w Orionie (ryc. 24.3) i można ją dostrzec bez problemów

⁸ ang. *light year*.



Ryc. 24.3. Wielka Mgławica w Orionie, w której rodzą się nowe gwiazdy

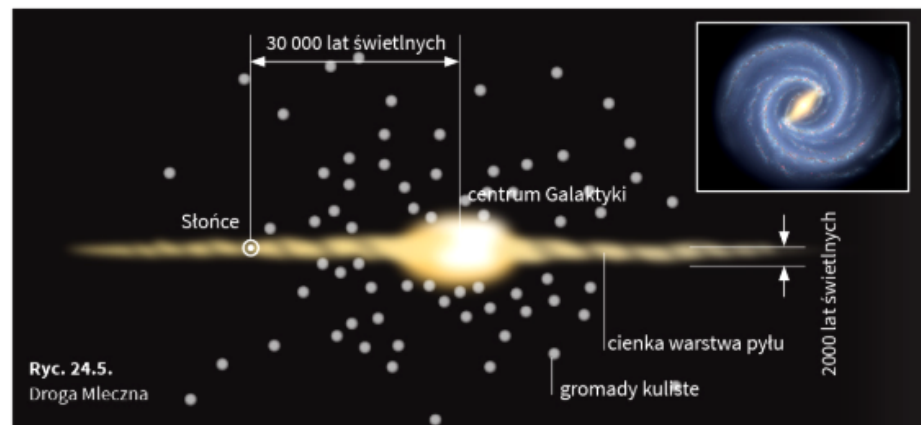


Ryc. 24.4. Droga Mleczna jest świetnie widoczna w warunkach ciemnego nieba

przez lornetkę, a nawet gołym okiem w warunkach ciemnego nieba. Właśnie w zgęszczeniach materii w takich mgławicach rodzą się nowe gwiazdy i układy planetarne.

Galaktyka

Gwiazdy nie żyją samotnie, ponieważ nawzajem przyciągają się grawitacyjnie. Praktycznie wszystkie gwiazdy i mgławice są skupione w ogromnych układach – **galaktykach** – zawierających często miliardy gwiazd. Naszą galaktykę nazywamy Drogą Mleczną lub po prostu Galaktyką. Ma ona kształt wyraźnie spłaszczonego dysku o średnicy ok. 100 tysięcy lat świetlnych i zawiera ponad 100 miliardów gwiazd. Gdy patrzymy poza miastem na nocne niebo, możemy łatwo zobaczyć Drogę Mleczną – od wewnątrz. Rzecz jasna, nikt nie zrobił zdjęcia Galaktyki z zewnątrz, ale potrafimy ją w miarę dokładnie przedstawić na rycinie 24.5. Wyraźnie widoczne są ramiona spiralne. Wszystkie gwiazdy i mgławice krążą dookoła gęstego centrum – w przeciwnym wypadku pospadałyby na nie z powodu przyciągania grawitacyjnego. Układ Słoneczny znajduje się dość daleko od centrum Drogi Mlecznej. Słońce wraz z całym Układem Słonecznym robi jedno okrążenie wokół centrum Galaktyki w ciągu ok. 200 milionów lat.



Ryc. 24.5. Droga Mleczna

Inne galaktyki

W widzialnym Wszechświecie znajduje się najprawdopodobniej ponad 100 miliardów galaktyk. Jedną z nich – najbliższą podobną do nas sąsiadkę – widać z Polski przez cały rok gołym okiem. To Galaktyka Andromedy (zwana również M31). Przedstawiono ją na rycinie 24.6. To zdjęcie zostało zrobione przez teleskop. Gołym okiem można dojrzeć tylko słabą plamkę. Wprawdzie M31 zajmuje na niebie obszar zdecydowanie większy od Księżyca w pełni, ale tylko długie ekspozycje mogą to ujawnić. Mimo to warto na nią spojrzeć (najlepiej przez lornetkę), bo to najdalszy obiekt widoczny gołym okiem. Dzieli ją od nas 2,5 miliona lat świetlnych, czyli gdy patrzymy na Galaktykę Andromedy, widzimy przeszłość sprzed 2,5 miliona lat! Patrzymy na epokę, w której gatunek ludzki jeszcze nie istniał, a praludzie w Afryce dopiero schodzili z drzew i uczyli się poruszać na dwóch kończynach.

Ryc. 24.6. Galaktyka Andromedy



Galaktyki obserwujemy aż do odległości ok. 13 miliardów lat świetlnych. Przypomnijmy, że Układ Słoneczny istnieje zaledwie od niecałych 5 miliardów lat. Galaktyki przyciągają się grawitacyjnie i dlatego większość z nich tworzy grupy i gromady galaktyk (ryc. 24.7).

Ryc. 24.7. Gromada galaktyk

PODSUMOWANIE

- ▶ **Rok świetlny** to odległość, jaką światło pokonuje w próżni w ciągu roku – to ok. 10^{13} km.
- ▶ Im dalej patrzymy w przestrzeń, tym dalszą widzimy przeszłość.
- ▶ **Galaktyki** to skupiska miliardów gwiazd.
- ▶ Układ Słoneczny znajduje się w galaktyce nazywanej **Drogą Mleczną** lub po prostu Galaktyką.
- ▶ We Wszechświecie są miliardy galaktyk.

PYTANIA I ZADANIA

1. Jak długo leci światło od Słońca do Ziemi? W obliczeniach możesz skorzystać z danych z tabeli 1. w rozdziale 19.
2. Porównaj odległość Słońce–Neptun z odległością do najbliższej gwiazdy. Przyjmij, że odległość ta wynosi 4,3 ly.
3. Oszacuj, jaki był czas ekspozycji podczas wykonywania zdjęcia z ryc. 24.1.
4. Pierwsze sygnały radiowe emitowane przez człowieka opuściły Ziemię ok. 100 lat temu. Oszacuj, jakie rozmiary ma obszar, w którym fale te dziś można zarejestrować, i porównaj je z rozmiarami naszej Galaktyki (ryc. 24.5).
5. Oszacuj masę Galaktyki na podstawie informacji podanych w tym rozdziale na s. 192 oraz z zastosowaniem metody opisanej w rozdziale 22. Przyjmij, że Galaktyka działa grawitacyjnie na Słońce tak, jakby cała jej masa była skupiona w jej środku.



25. Ewolucja Wszechświata

- Prawo Hubble'a
- Wiek Wszechświata
- Teoria Wielkiego Wybuchu

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o budowie Wszechświata.

Co to jest Wszechświat? Jak wiele innych pojęć, to pojęcie także nie jest jednoznaczne. Możemy zdefiniować Wszechświat jako wszystko to, co istnieje, lecz nie będzie to jasna definicja. „Czy w takim razie Bóg jest częścią Wszechświata?” – mogliby spytać wierzący. Otóż nauka nie zajmuje się kwestią istnienia lub nieistnienia Boga, bo nie ma do tego odpowiednich narzędzi. Tak samo jak muzyka nie może nic powiedzieć o kolorach, fizyka nic nie mówi o Bogu, podobnie jak o uczuciach, moralności i wielu innych bardzo ważnych dla nas sprawach.

Wszechświat to dla nauki cała istniejąca materia. Oczywiście natychmiast można spytać, co to w ogóle jest materia, a odpowiedź będzie jeszcze trudniejsza niż w przypadku Wszechświata. Gdybyśmy kontynuowali te rozważania, napisalibyśmy podręcznik filozofii, a nie fizyki. Nauka zadowala się intuicyjnym rozumieniem podstawowych pojęć i to na ogół zupełnie wystarcza do budowania wspaniałych teorii, które całkowicie zmieniły oblicze ludzkiej egzystencji. Gdyby Einstein zastanawiał się, czym jest czas, zostałby filozofem. On jednak przyjął po prostu, że czas jest tym, co pokazują zegary, i to wystarczyło do skonstruowania teorii względności, która diametralnie zmieniła nasze rozumienie czasu. Załóżmy więc, że intuicyjnie rozumiemy już, co znaczy słowo „Wszechświat”, i zajmijmy się opisem jego powstania i rozwoju.

Prawo Hubble'a

Zapewne najważniejsze astronomiczne odkrycie XX wieku zostało dokonane w 1929 roku w USA, gdzie znajdował się wówczas największy teleskop na świecie. Kiedy Edwin Powell Hubble analizował wyniki pomiarów, ze zdumieniem zauważył, że prawie wszystkie galaktyki oddalają się od Drogi Mlecznej. **Zauważył także, że prędkość ucieczki galaktyk jest wprost proporcjonalna do ich odległości od nas.** Zależność tę nazywamy prawem Hubble'a.



Ryc. 25.1. Edwin Hubble podczas obserwacji

Rozszerzanie się Wszechświata

Prawo Hubble'a można wyrazić wzorem:

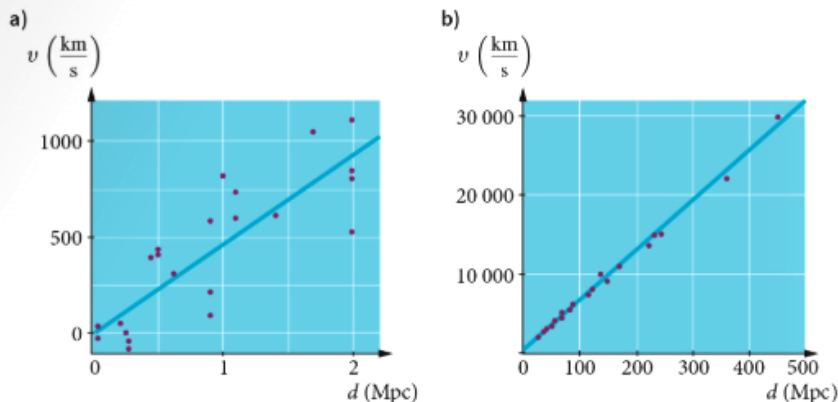
$$v = H \cdot d \quad (1)$$

gdzie:

v – prędkość, z jaką galaktyka się od nas oddala,

H – stała Hubble'a,

d – odległość galaktyki od naszej Drogi Mlecznej.



Ryc. 25.2. Oryginalne wyniki pomiarów z pracy Hubble'a przedstawiające zależność prędkości galaktyk od odległości do nich (a) i bardziej współczesny wykres (b); porównaj oś odległości na obu wykresach. Mpc to megaparsek – jednostka odległości równa ok. 3 mln lat świetlnych

Na rycinie 25.2a przedstawiono oryginalne dane z przełomowej pracy Hubble'a. Trzeba było genialnej intuicji, by założyć, że zaznaczone punkty układają się wzdłuż linii prostej. Od tego czasu jakość pomiarów zdecydowanie wzrosła, co widać na wykresie obok (ryc. 25.2b). Wyznaczenie stałej Hubble'a było bardzo trudne, choć sama proporcjonalność prędkości do odległości nie budziła kontrowersji. W książkach wydanych w różnych latach można znaleźć różne wartości tej stałej. Zgodnie z najlepszymi pomiarami dostępnymi w trakcie pisania tego podręcznika:

$$H \approx 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{ly}}$$

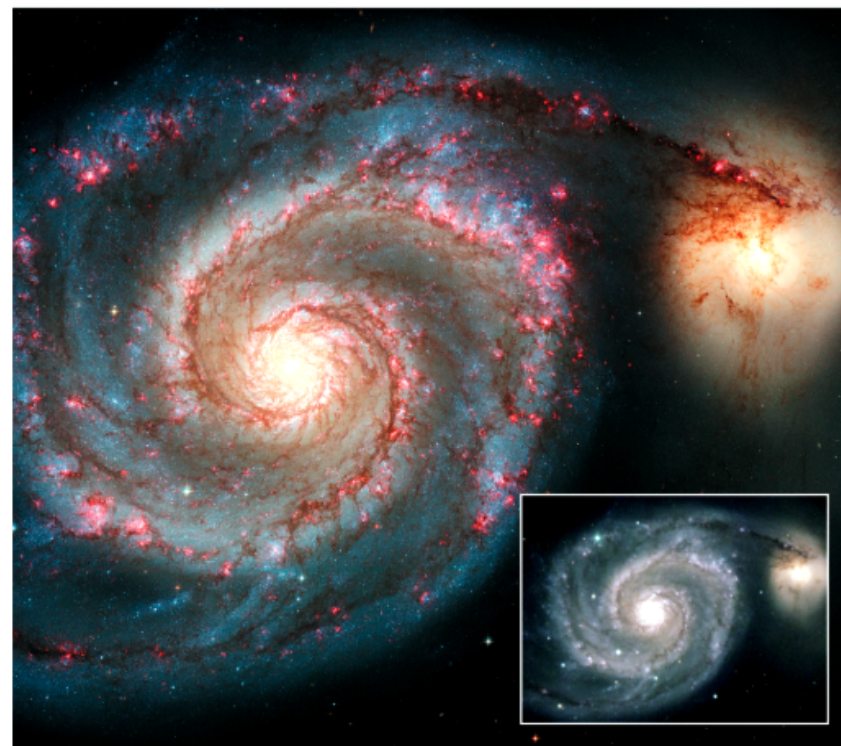
PRZYKŁAD 1.

Galaktyka Wir (M51) jest odległa od nas o 26 mln lat świetlnych. Jak szybko – zgodnie z prawem Hubble'a – powinna ona oddalać się od Drogi Mlecznej?

Odległość galaktyki Wir podstawiamy do wzoru (1):

$$v = 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{ly}} \cdot 26 \cdot 10^6 \text{ ly} \approx 55 \cdot 10^1 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 550 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Pomiary wykazały, że ta galaktyka oddala się od naszej z prędkością $(463 \pm 3) \text{ km/s}$. Różnica wynika stąd, że prawo Hubble'a jest spełnione tylko dla bardzo odległych galaktyk.



Ryc. 25.3. Galaktyka Wir (M51) oddala się od Ziemi z prędkością 550 km/s; zdjęcie wykonane przez kosmiczny teleskop, obok zdjęcie wykonane przez ucznia za pomocą teleskopu naziemnego zdalnie sterowanego przez internet

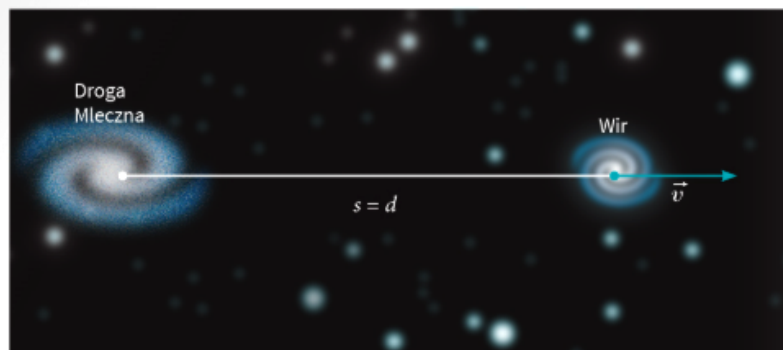
Prawo Hubble'a nie dotyczy bliskich siebie galaktyk, ponieważ przyciągają się one grawitacyjnie i to przeważa nad ogólną ucieczką. Z tego powodu Galaktyka Andromedy zbliża się do Drogi Mlecznej i za mniej więcej 2 miliardy lat prawdopodobnie nastąpi zderzenie obu galaktyk. Nie rozszerzają się również układy ciał związane siłami innymi niż grawitacyjne, np. wszystkie przedmioty wokół nas. Jednak wszystkie bardzo odległe galaktyki oddalają się od nas. Co ciekawe, można udowodnić, że **Wszechświat obserwowany z każdej galaktyki wygląda mniej więcej tak samo**. Wobec tego obserwujemy nie tyle ucieczkę galaktyk od Drogi Mlecznej, ile rozszerzanie się całego Wszechświata.

WARTO WIEDZIEĆ

Prawo Hubble'a a wiek Wszechświata

Prawo Hubble'a ma bardzo intrygującą własność. Rozważmy przykład galaktyki Wir, która ucieka od nas (ryc.). Skoro się od nas oddala, to kiedyś musiała być w jednym miejscu z naszą Galaktyką. Kiedy? Załóżmy, że ta galaktyka porusza się ze stałą prędkością. Jeśli podzielimy przebytą drogę przez prędkość, to obliczymy czas ruchu:

$$t = \frac{s}{v} \quad (2)$$



Przebyta droga s to odległość d od galaktyki. Z prawa Hubble'a (1) wynika, że:

$$d = \frac{v}{H}$$

Po podstawieniu do wzoru (2) otrzymujemy:

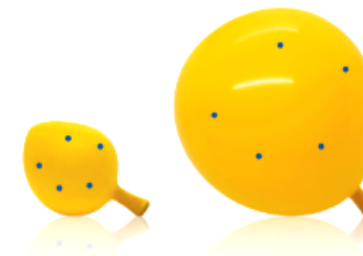
$$t = \frac{d}{v} = \frac{v}{H} \cdot \frac{1}{v} = \frac{1}{H} \quad (3)$$

Okazuje się, że odwrotność stałej Hubble'a wyznacza czas, który upłynął od momentu, gdy galaktyka Wir i Droga Mleczna były w jednym miejscu. To rozumowanie jest ogólne, więc możemy je zastosować również do innej galaktyki. Dla każdej galaktyki otrzymamy wzór (3). To znaczy, że odwrotność stałej Hubble'a pozwala obliczyć, ile lat temu wszystkie galaktyki były razem. Równanie (3) to zatem przybliżony wzór na **wiek naszego Wszechświata**.

W przeciwieństwie do innych stałych, które pozostają niezmiennie zarówno w czasie, jak i w przestrzeni, stała Hubble'a zmienia się w czasie. Można to wywnioskować wprost ze wzoru (3): wiek Wszechświata rośnie, zatem stała H w tym wzorze musi się zmieniać. W danej epoce Wszechświata jest wszędzie taka sama, zatem dotyczy wszystkich galaktyk, ale w każdej epoce jest inna. Sprawa jest bardziej skomplikowana, gdyż różne galaktyki widzimy przecież w różnych epokach. Pamiętajmy, że im dalej sięgamy w przestrzeń, tym głębszą przeszłość obserwujemy. Jednak dla stosunkowo bliskich galaktyk (takich jak Wir) możemy pominąć ten efekt.

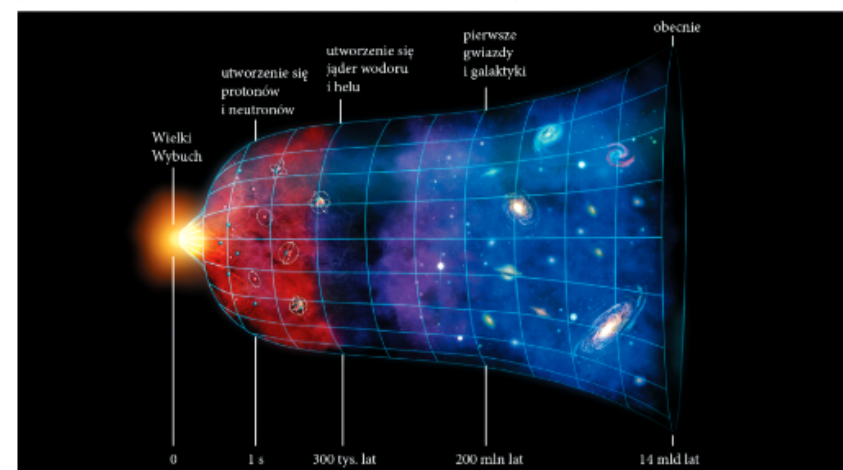
DOŚWIADCZENIE 1.

Do balonika przyklej co najmniej 5 cekinów lub skrawków papieru (albo namaluj flamastrzem małe wyraźne punkty). Nadmuchaj balonik. Zmierz, np. sznurkiem przyłożonym później do linijki, odległości od wybranego cekina do pozostałych. Następnie jeszcze bardziej nadmuchaj balonik i powtórnie zmierz odległości. Sprawdź, czy odległości między cekinami wzrosły wprost proporcjonalnie do siebie, tzn. czy stosunki odległości końcowej i początkowej od wybranego cekina do pozostałych cekinów są takie same.



Teoria Wielkiego Wybuchu

Z prawa Hubble'a można wywnioskować, że około 14 miliardów lat temu materia, z której składają się wszystkie obserwowane galaktyki, znajdowała się w jednym miejscu. Był to początek znanego nam Wszechświata. Nie istniały ani gwiazdy, ani galaktyki. Gęstość i temperatura były niewyobrażalnie duże. **Od tego momentu Wszechświat nieustannie się rozszerza.** Nie wiemy, co było przedtem i czy w ogóle było jakieś przedtem. W tym „wybuchu” powstała czasoprzestrzeń, którą znamy. Wiemy jednak całkiem dobrze, co się stało potem. W miarę rozszerzania się Wszechświata temperatura i gęstość materii malały. Potrafimy opisać, jak w pierwszej sekundzie od Wielkiego Wybuchu utworzyły się protony i neutrony – a około 300 tys. lat później atomy wodoru i helu (ryc. 25.4). Gdy utworzyły się atomy, Wszechświat stał się przezroczysty dla światła (podobnie jak przezroczyste jest powietrze). Potem na skutek grawitacji lokalne zgęszczenia materii przekształcały się w galaktyki, w których powstawały gwiazdy. W końcu 9 miliardów lat po Wielkim Wybuchu w zakątku jednej z galaktyk powstał Układ Słoneczny.



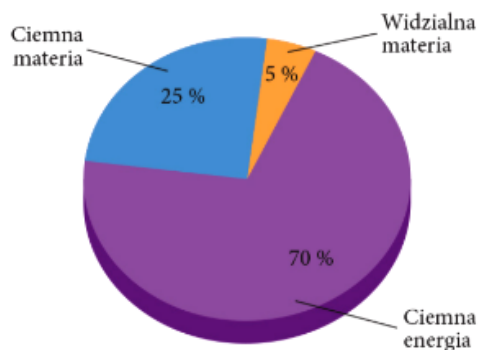
Ryc. 25.4. Schematyczne przedstawienie rozszerzającego się Wszechświata

F

To jeszcze nie koniec tajemnic...

Ekspansję Wszechświata opisuje ogólna teoria względności Alberta Einsteina. Według niej to nie galaktyki uciekają od nas w przestrzeni. To sama przestrzeń się rozszerza, podobnie jak powierzchnia balonu w doświadczeniu 1. Jeśli będziemy nadmuchiwać balonik, to cekiny będą się od siebie oddalać nie dlatego, że uciekają od siebie. Po prostu balonik puchnie. Zarówno galaktyki, jak i pozostałe ciała związane pewnymi siłami nie rozszerzają się, podobnie jak cekiny.

Czy Wszechświat rozszerza się w stałym tempie? Powinien raczej zwalniać, bo wszystkie galaktyki przyciągają się i siły grawitacji ograniczają ekspansję Wszechświata. Jednak wiele uzyskanych ostatnio danych wskazuje, że ekspansja przyspiesza. Przyczyną może być tzw. ciemna energia, o której naturze niewiele wiadomo. Nie jest to wcale jedyny nierozwiązany problem w naszym rozumieniu Wszechświata. Na przykład wiadomo również, że istnieje tzw. ciemna materia, czyli materia, której nie widzimy, bo nie świeci. Obserwujemy jednak, że grawitacyjnie wpływa na ruch gwiazd w galaktykach i stąd wiemy o jej istnieniu. Aktualnie uważa się, że cała widzialna materia – wszystkie gwiazdy i mgławice – to tylko 5 % całej materii Wszechświata. O pozostałych 95 % nie wiemy, jak dotąd, prawie nic (ryc. 25.5).



Ryc. 25.5. Procentowa zawartość składników Wszechświata zgodna ze stanem wiedzy w czasie pisania podręcznika

Cóż, taka jest istota nauki. Daje ona precyzyjne odpowiedzi na pytania dotyczące praw natury i budowy Wszechświata. Nie daje jednak odpowiedzi ostatecznych – i to różni ją od religii. Każda odpowiedź rodzi kolejne pytania, na które uzyskujemy dokładniejszą odpowiedź, a ona z kolei zawiera kolejne, bardziej wyrafinowane pytania. Każde pokolenie uczonych przesuwa tę granicę poznania dalej i dalej. Dla nas też jest miejsce w tej fascynującej przygodzie ludzkości.

F

PODSUMOWANIE

► Prawo Hubble'a

Odległe galaktyki oddalają się od nas z prędkością wprost proporcjonalną do ich odległości od Drogi Mlecznej:

$$v = H \cdot d$$

- Około 14 miliardów lat temu Wszechświat powstał w **Wielkim Wybuchu** i od tej chwili cały czas się rozszerza.

PYTANIA I ZADANIA

1. Czy Galaktyka Andromedy oddala się od nas zgodnie z prawem Hubble'a? Odpowiedź uzasadnij.
2. Wszechświat ciągle się rozszerza. Czy to znaczy, że odległości między domami i miastami również rosną? Odpowiedź uzasadnij na podstawie treści rozdziału.
3. Narysuj na osi liczbowej co najmniej trzy punkty symbolizujące galaktyki. Nasza galaktyka niech będzie w punkcie zerowym.
 - a) Narysuj wektory prędkości tych galaktyk. Przypisz im wybrane wartości prędkości, wprost proporcjonalne do odległości od punktu zerowego.
 - b) Sprawdź, wykonując odpowiednie obliczenia, czy w twoim modelu wszystkie narysowane galaktyki były w jednym miejscu w jednym czasie. Kiedy to było?
4. Wyszukaj w internecie informacje, jak dawno temu żyły dinozaury i ile wynosi wiek Ziemi. Oblicz, jaką część wieku Wszechświata stanowi każdy z tych czasów.
5. Nie wiemy, jak ogromny jest Wszechświat. Być może jest nawet nieskończony. Czy możliwe jest zaobserwowanie galaktyk odległych od naszej bardziej niż 14 mld lat świetlnych? Uzasadnij swoją odpowiedź na podstawie tekstu dwóch ostatnich rozdziałów.

GRAWITACJA I ASTRONOMIA

Słońce to kula gazowa o promieniu stukrotnie większym od promienia Ziemi. Skupia w sobie prawie całą masę Układu Słonecznego.

Merkury

Wenus

GROMADY GALAKTYK

W widzialnym Wszechświecie istnieją miliardy galaktyk; bliskie galaktyki przyciągają się grawitacyjnie i tworzą gromady.

Wszechświat powstał prawie 14 miliardów lat temu w tzw.

WIELKIM WYBUCHU

i od tej pory nieustannie się rozszerza.

DROGA MLECZNA

układ miliardów gwiazd, które przyciągają się grawitacyjnie o kształcie spłaszczonego dysku o średnicy około 100 tysięcy lat świetlnych

PRAWO HUBBLE'A

Odległe galaktyki oddalają się od siebie z prędkością wprost proporcjonalną do ich wzajemnej odległości.

$$v = H \cdot d$$

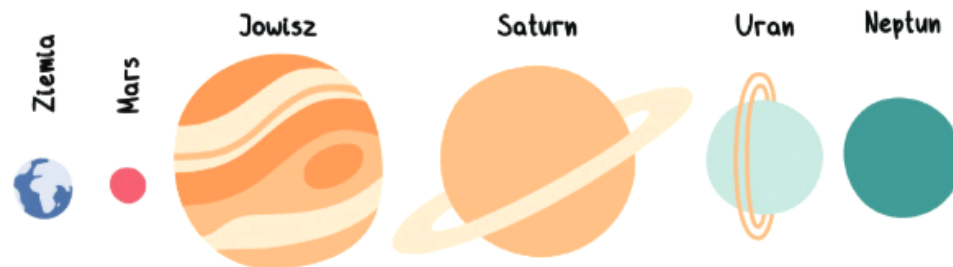
H – stała Hubble'a

ROK ŚWIETLNY

odległość, jaką pokonuje w próżni światło w czasie jednego roku

$$1 \text{ ly} \approx 9,5 \cdot 10^{12} \text{ km}$$

UKŁAD SŁONECZNY



+ planety karłowate

+ księżyce

+ planetoidy

+ komety

SATELITY GEOSTACJONARNE

okracają Ziemię w czasie jednej doby.



PRZECIĄŻENIE

stan, gdy wypadkowa sił ciężkości i bezwładności ma wartość większą od ciężaru ciała.

NIEWĄZKOSC

stan, który występuje podczas ruchu odbywającego się wyłącznie pod wpływem siły grawitacji.

PRZYSPIESZENIE GRAWITACYJNE

$$g = G \frac{M}{r^2}$$

prędkość orbitalna

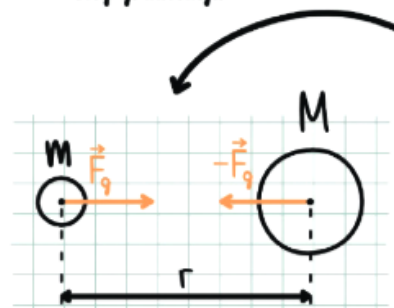
$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

PRAWO GRAWITACJI

Dwa ciała przyciągają się siłami grawitacji

$$F_g = G \frac{Mm}{r^2}$$

gdzie G to stała grawitacji.



PYTANIA I ZADANIA

1. Załóż, że Mars obiega Słońce po orbicie kołowej o promieniu 1,52 au. Oblicz maksymalną i minimalną odległość Marsa od Ziemi. Wyraź te odległości w kilometrach.
2. Planeta karłowata Eris krąży w średniej odległości 67 au od Słońca. Wyraź tę odległość w latach świetlnych.
3. Tryton jest księżycem Neptuna. Ma kształt kuli o promieniu 2700 km, a jego masa wynosi $2,1 \cdot 10^{22}$ kg. Oblicz przyspieszenie grawitacyjne i swój ciężar na powierzchni Trytona z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.
4. Satelitę przeniesiono na orbitę kołową o promieniu czterokrotnie większym od dotychczasowego. Czy prędkość orbitalna tego satelity po przeniesieniu będzie większa, czy mniejsza od początkowej? Ile razy?
5. Wskaż, w których miejscach jazdy na przedstawionej na rysunku kolejce górskiej jadącej bez napędu pasażerowie doświadczają przeciążenia, a w których stanu zbliżonego do nieważkości.



6. Na zdjęciach wykonanych w Borach Tucholskich widać dwa (te same) sztuczne satelity poruszające się po orbitach bliskich powierzchni Ziemi. Satelity były cały czas w zasięgu wzroku osoby wykonującej zdjęcia.



Oceń prawdziwość zdań. Zaznacz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe.

1.	Fotografie zostały wykonane w odstępie jednej godziny.	P	F
2.	Promień orbity satelity A jest mniejszy niż promień orbity satelity B.	P	F

7. Satelity przekazujące sygnały telewizyjne do odbiorników znajdujących się na powierzchni Ziemi powinny być nieruchome względem jej powierzchni. Muszą się poruszać wokół Ziemi bez napędu.

Zaznacz wszystkie zdania prawdziwe.

- I. Siłą powodującą ruch satelity wokół Ziemi jest siła grawitacji.
- II. Satelity telewizyjne, z których odbieramy sygnał, krążą wokół Ziemi w zenicie nad naszym krajem.
- III. Okres obiegu satelity telewizyjnego wynosi 24 godziny.
- IV. Satelity telewizyjne krążą w różnych odległościach od powierzchni Ziemi.

8. Wyobraźmy sobie, że pewien astronauta wziął na pokład Międzynarodowej Stacji Kosmicznej jedzenie w puszcze oraz otwieracz do konserw.

Wybierz właściwe dokończenie zdania spośród A i B oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–3.

Otwieranie puszek za pomocą otwieracza do konserw jest na pokładzie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej

A.	niemożliwe,	ponieważ	1.	przyczyną nacisku ostrza na puszkę są siły wywołane przez mięśnie astronauty.
			2.	na pokładzie stacji kosmicznej siły wzajemnego oddziaływania się równoważą.
B.	możliwe,		3.	w stanie nieważkości otwieracz oraz konserwa nic nie ważą.

9. Saturn krąży wokół Słońca po orbicie zbliżonej do okręgu. Wokół Saturna krąży (również po okręgu) największy księżyc w Układzie Słonecznym – Tytan. Napisz, jakie pomiary dotyczące ruchu wymienionych ciał niebieskich należy wykonać, aby wyznaczyć masę Saturna.
10. Im promień orbity satelity jest większy, tym prędkość orbitalna jest mniejsza. Ta sama zależność dotyczy energii kinetycznej satelity. Czy na tej podstawie można wysnuć wniosek, że im wyżej nad Ziemią chcemy umieścić satelitę, tym mniej potrzebujemy na to energii? Odpowiedź uzasadnij.

F Najważniejsze pojęcia w dziale

- czarna dziura [*black hole*] 179
- Droga Mleczna [*Milky Way*] 192
- galaktyka [*galaxy*] 192
- jednostka astronomiczna [*astronomical unit*] 159
- kometa [*comet*] 160
- meteoryt [*meteorite*] 162
- nieważkość [*weightlessness*] 181
- orbita [*orbit*] 160, 172
- planeta [*planet*] 160
- planetoida [*asteroid*] 160
- prawo grawitacji [*Newton's law of gravitation*] 165
- prawo Hubble'a [*Hubble's law*] 195
- prędkość orbitalna [*orbital speed*] 173
- przeciążenie [*load factor*] 183
- rok świetlny [*light year*] 190
- satelita [*satellite*] 171
- satelita geostacjonarny [*geostationary satellite*] 174
- siła grawitacji [*gravitational force*] 165
- teoria Wielkiego Wybuchu [*Big Bang theory*] 199
- Układ Słoneczny [*Solar System*] 158
- Wszechświat [*Universe*] 195

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 1. Siła dośrodkowa

s. 89 Proponujemy, aby doświadczenie wykonywać w dwuosobowych zespołach.

Problem badawczy

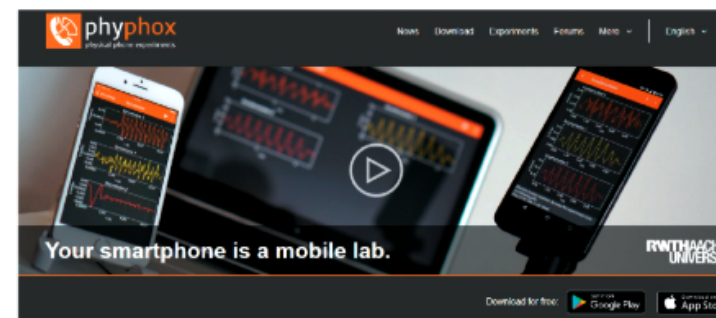
Czy w rzeczywistych warunkach siła dośrodkowa jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości?

Wstęp

Ciało może się poruszać ruchem jednostajnym po okręgu tylko wtedy, gdy działa siła dośrodkowa. Wartość tej siły obliczamy ze wzoru $F_d = \frac{mv^2}{r}$. Z tego wzoru wynika, że siła dośrodkowa jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości ciała poruszającego się po okręgu. Z II zasady dynamiki wiadomo, że przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do siły nadającej to przyspieszenie. Wystarczy zatem porównać przyspieszenie w ruchu po okręgu z kwadratem prędkości, aby odpowiedzieć na postawiony problem badawczy.

W proponowanym doświadczeniu będziemy sprawdzać tę zależność dla smartfona położonego na brzegu obracającej się karuzeli.

Przyspieszenie będziemy mierzyć za pomocą smartfona z zainstalowaną aplikacją Phyphox. Aplikacja ta jest darmowa i można ją zainstalować na smartfonach wyposażonych w system operacyjny Android lub iOS.



Przyrządy pomiarowe i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ karuzela (np. z placu zabaw)
- ▶ stoper
- ▶ taśma miernicza
- ▶ smartfon z aplikacją Phyphox

Hipoteza badawcza

W ruchu po okręgu przyspieszenie dośrodkowe smartfona umieszczonego na karuzeli jest wprost proporcjonalne do kwadratu jego prędkości.

Przebieg doświadczenia

1. Znajdź karuzelę z płaską platformą w kształcie okręgu.
2. Zamocuj mocno smartfon (np. za pomocą taśmy klejącej) i zmierz jego odległość od osi obrotu. Smartfon należy umieścić tak, żeby jego dłuższa krawędź była równoległa do promienia karuzeli.
3. Po rozpędzeniu karuzeli zmierz czas jednego pełnego obrotu karuzeli.
4. Zapisz w tabeli wyniki pomiarów czasu i przyspieszenia (zmierzonego przez smartfon).

Uwaga! Należy odróżnić przyspieszenie rozpędzające karuzelę od przyspieszenia dośrodkowego. Mierzone przyspieszenie będzie się zmieniać podczas rozpędzania karuzeli. Podczas jednostajnego ruchu smartfona po okręgu wartość ta pozostanie niemal stała.

5. Pomiar powtórz dla kilku różnych okresów obrotu karuzeli.

Nr pomiaru	Czas jednego obrotu karuzeli (s)	Zmierzone przyspieszenie ($\frac{m}{s^2}$)	$v = \frac{2\pi r}{t} \left(\frac{m}{s}\right)$	$v^2 \left(\frac{m^2}{s^2}\right)$
1				
2				
...				
8				

Opracowanie wyników pomiarów

1. Oblicz pozostałe parametry ruchu zapisane w tabeli (v , v^2).
2. Na papierze milimetrowym lub w arkuszu kalkulacyjnym przygotuj układ współrzędnych, w którym na osi poziomej będzie kwadrat prędkości v^2 , a na osi pionowej przyspieszenie zmierzone przez smartfon. Porady dotyczące przedstawiania danych na wykresie znajdziesz w niezbędniku matematycznym.
3. Zaznacz w układzie współrzędnych wyniki pomiarów.

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy punkty pomiarowe układają się wzdłuż prostej? Pamiętaj, że zmierzyłeś wartości z pewną niepewnością.
2. Czy hipoteza badawcza została potwierdzona?
3. Jakie czynniki miały największy wpływ na rozrzut punktów pomiarowych?

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 2. Siła nacisku na pochyłej powierzchni

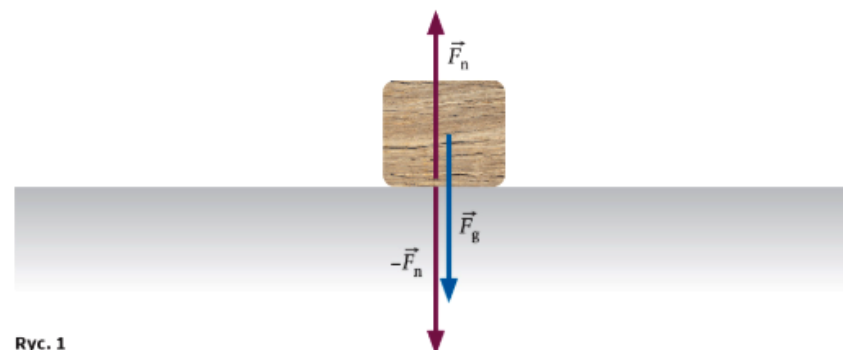
s. 106

Problem badawczy

W jaki sposób siła nacisku ciała na podłoże zależy od kąta nachylenia podłoża względem poziomu?

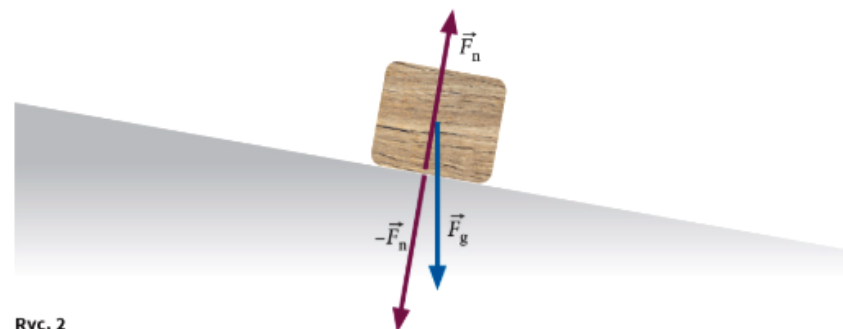
Wstęp

Na ciało leżące na powierzchni działa siła nacisku skierowana do niej prostopadle. Zgodnie z III zasadą dynamiki spoczywające ciało działa na powierzchnię siłą o tej samej wartości, lecz przeciwnie skierowaną.



Ryc. 1

Gdy powierzchnia jest ustawiona poziomo, a ciało swobodnie na niej spoczywa, to siła nacisku jest równa ciężarowi ciała (ryc. 1). Nieco inaczej jest, gdy ciało spoczywa na pochyłej powierzchni (ryc. 2).



Ryc. 2

W naszych badaniach waga domowa będzie służyć jako siłomierz mierzący nacisk. Aby wyznaczyć siłę nacisku, trzeba wskazania wagi w kilogramach pomnożyć przez $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. Zakładamy, że waga pokazuje siłę nacisku niezależnie od tego, jak waga ta jest ustawiona.

Przyrządy i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ waga kuchenna lub łazienkowa
- ▶ deska trochę większa od wagi z zamocowaną listewką uniemożliwiającą przesuwanie się wagi
- ▶ badany przedmiot na tyle lekki, aby utrzymała go taśma klejąca
- ▶ taśma klejąca
- ▶ kątomierz

Hipoteza badawcza

Im większy jest kąt nachylenia podłoża do poziomu, tym mniejsza jest siła nacisku ciała na podłoże.

Przebieg doświadczenia

1. Opracuj sposób pomiaru kąta między pochyłą deską a poziomem.
2. Przyklej przedmiot do powierzchni wagi taśmą klejącą tak, aby podczas przechylania wagi ani się nie przesunął, ani nie odpadł.
3. Postaw wagę z przedmiotem na desce tak, aby krawędzią opierała się o listewkę.
4. Odczytaj wskazania wagi przy różnych kątach nachylenia deski w zakresie od 0° do 45° . Wyniki zapisz w tabeli.

Nr pomiaru	Kąt nachylenia powierzchni do poziomu	Wskazania wagi	Siła nacisku
1			
2			
...			
10			

Opracowanie wyników pomiarów

1. Opisz metodę pomiaru kąta nachylenia deski.
2. Oszacuj niepewność pomiarową pomiaru kąta nachylenia deski.
3. Odszukaj w instrukcji obsługi lub oszacuj dokładność wagi i wyznacz niepewność pomiarową siły nacisku.
4. Narysuj wykres zależności siły nacisku od kąta nachylenia deski.

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy hipoteza badawcza została potwierdzona?
2. Czy punkty pomiarowe układają się wzdłuż linii prostej?
3. Z wykresu oszacuj kąt, dla którego siła nacisku jest równa połowie ciężaru ciała. Wynik zapisz z podaniem niepewności pomiarowej.
4. Jakie czynniki miały wpływ na precyzję przeprowadzenia pomiarów?

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 3. Siła tarcia

s. 77

Problem badawczy

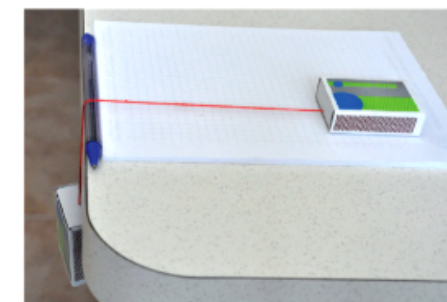
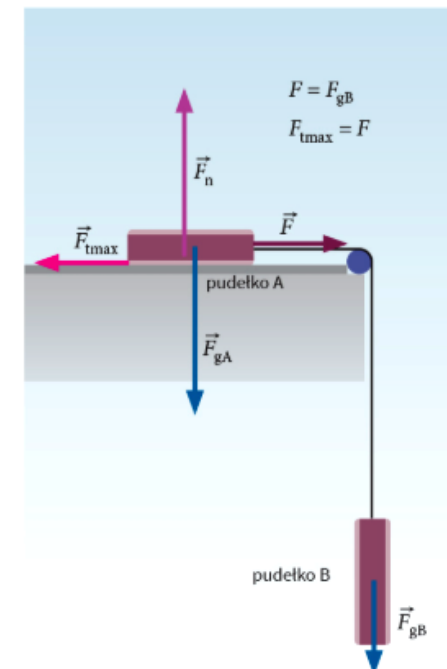
W jaki sposób maksymalna siła tarcia zależy od siły nacisku?

Wstęp

Na spoczywające ciało, które chcemy wprowadzić w ruch, działa siła tarcia statycznego. Siła ta zmienia swoją wartość od zera do wartości maksymalnej, którą osiąga w chwili ruszenia ciała. Będziemy mierzyć siłę zewnętrzną, przy której ciało zacznie się poruszać. Jest ona równa maksymalnej wartości siły tarcia statycznego. Pomiary siły tarcia są niedokładne i nie w pełni powtarzalne, gdyż ta siła zależy od niedostrzegalnych różnic w strukturze powierzchni, jej wilgotności albo zabrudzenia.

Rozważmy sytuację, w której dwa pudełka od zapalek połączone są sznurkiem i ułożone jak na rysunku. Masy pudełek należy zwiększać przez włożenie do nich monet. Z warunku równowagi sił wynika, że maksymalna siła tarcia statycznego działająca na pudełko A leżące na stole jest równa sile ciężkości działającej na wiszące pudełko B. Siła ciężkości jest wprost proporcjonalna do masy monet znajdujących się w pudełku (masa monet w pudełku powinna być dużo większa od masy pudełka i wówczas pomijamy masę pudełka). Podobnie siła nacisku działająca na pudełko leżące na stole jest wprost proporcjonalna do masy monet w tym pudełku. Wobec tego stosunek maksymalnej siły tarcia statycznego do siły nacisku będzie równy stosunkowi mas monet w pudełkach:

$$f = \frac{F_{l, \max}}{F_n} = \frac{m_B}{m_A}$$



Przyrządy pomiarowe i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ dwa pudełka po zapałkach
- ▶ monety
- ▶ mocna nić
- ▶ długopis

Hipoteza badawcza

Maksymalna siła tarcia statycznego jest wprost proporcjonalna do siły nacisku.

Przebieg doświadczenia

- Połącz pudełka ze sobą za pomocą nici. Jedno z pudełek ustaw na badanym podłożu (np. na papierze). Drugie niech swobodnie zwisa z krawędzi stołu. W celu zmniejszenia tarcia nici o krawędź stołu pomiędzy nitką a stół włóż długopis (jak na fotografii).
- W pudełku A ustawionym na stole umieść pewną liczbę monet, a następnie do wiszącego pudełka B włóż taką liczbę monet, aż układ pudełek zacznie się poruszać. Rodzaje i liczbę monet w poszczególnych pudełkach zapisz w tabeli.
- Pomiary należy powtórzyć dla różnych mas monet w pudełku A leżącym na stole i odpowiednio dobranych mas monet znajdujących się w wiszącym pudełku B.

	Rodzaje i liczba monet w pudełkach				
Pudełko A leżące na stole					
Pudełko B wiszące na nici					

Opracowanie wyników pomiarów

- Zapisz w tabeli masy monet w pudełkach. Na stronie internetowej NBP można sprawdzić masy poszczególnych monet.
- Dla każdego pomiaru wyznacz stosunek maksymalnej siły tarcia statycznego do siły nacisku. Wyniki zapisz w tabeli.

Masa monet w pudełku A					
Masa monet w pudełku B					
$\frac{F_{t\max}}{F_n}$					

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

- Czy hipoteza badawcza została potwierdzona?
- Jakie czynniki miały wpływ na wynik pomiarów?

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 4. Zmiany energii przy odbiciu

s. 118

Problem badawczy

Jaką część energii mechanicznej zachowuje spadająca piłeczka po odbiciu od podłoża?

Wstęp

Gdy puścimy swobodnie piłkę z pewnej wysokości, to po odbiciu dolatuje ona na mniejszą wysokość. Dzieje się tak dlatego, że podczas odbicia energia mechaniczna piłki się zmniejsza. Będziemy badać, czy zmniejszanie energii podczas odbicia zależy od początkowej wysokości, z której spada piłka. Do pomiarów będziemy używać smartfonu z aplikacją Phyphox. Wśród dostępnych w tej aplikacji pomiarów jest **(Nie)sprężyste odbicie**.

Materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ smartfon z aplikacją Phyphox
- ▶ linijka (lub miara taśmowa)
- ▶ piłeczka do tenisa stołowego
- ▶ różne rodzaje podłoża

Przebieg doświadczenia

- Przygotuj aplikację Phyphox do pomiarów.
- Wybierz podłoże do badań (np. drewniany blat biurka oraz ceramiczną posadzkę w łazience).
- Umieść piłeczkę do tenisa stołowego na ustalonej wcześniej wysokości.
- Uruchom aplikację Phyphox.
- Puść piłeczkę.
- Odczytaj z aplikacji, ile energii pozostało piłeczce po pierwszym odbiciu.
- Zmień wysokość początkową i powtórz czynności od 3. do 6.
- Uzyskane wyniki zapisz w tabeli.
- Czynności powtórz dla innego podłoża.

PODŁOŻE 1	Wysokość początkowa (cm)													
	Energia, która pozostała po pierwszym odbiciu (% początkowej)													
PODŁOŻE 2	Wysokość początkowa (cm)													
	Energia, która pozostała po pierwszym odbiciu (% początkowej)													

Opracowanie wyników pomiarów

1. Na podstawie wyników z tabeli narysuj dla danego rodzaju podłoża wykres zależności energii, która pozostała po pierwszym odbiciu (% początkowej energii), od początkowej wysokości.
2. Podobny wykres narysuj dla drugiego rodzaju podłoża.

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy stosunek energii po pierwszym odbiciu do energii początkowej zależy od wysokości, z jakiej spada piłeczka?
2. Które z badanych podłoży jest bardziej sprężyste? Odpowiedź uzasadnij.

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 5. Szacowanie liczby gwiazd widocznych na niebie**s. 191 Problem badawczy**

Czy obecność Księżyca na nocnym niebie ma wpływ na liczbę widocznych gwiazd?

Wstęp

Liczba gwiazd widocznych na niebie nie jest stała. Zależy od tego, czy obserwujemy niebo w mieście, czy daleko od światła miejskich. Więcej gwiazd zobaczymy w ciemną, bezksiężycową noc niż w czasie pełni Księżyca. Widoczność gwiazd zależy również od przejrzystości powietrza i wzroku samego obserwatora. Systematycznie prowadzone obserwacje mogą mieć charakter naukowy.

Od pewnego czasu zwraca się uwagę na zanieczyszczenie nocnego nieba sztucznym światłem. Wzrastająca liczba sztucznych światła (np. oświetlenie ulic, reklamy, podświetlanie budowli architektonicznych) powoduje, że w nocy przestaje być ciemno. Skutkuje to zachwianiem zegara biologicznego sterującego aktywnością zwierząt i ludzi. Może to być jedną z przyczyn zaburzeń snu u wielu osób, które w konsekwencji zaczynają być stale zmęczone i źle się czują.

Monitorowanie gwiazd widocznych na nocnym niebie pozwala nam w miarę obiektywnie porównywać zanieczyszczenie światłem w różnych miejscach na Ziemi.

Gdy ktoś patrzy bezpośrednio w niebo i próbuje liczyć gwiazdy, szybko może się zgubić. Które gwiazdy zostały już policzone, a które nie? Aby tego uniknąć, trzeba ograniczyć obszar obserwacji i patrzeć np. przez rurkę. Gdy średnica rurki przyłożonej do oka jest pięć razy mniejsza od jej długości, widzimy około $\frac{1}{200}$ część nieba. Wobec tego po pomnożeniu średniej arytmetycznej liczby gwiazd widocznych w rurce w różnych obszarach nieba przez 200 uzyskamy szacunkową liczbę gwiazd widocznych na całym niebie.

Materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ Rurka o średnicy 2–4 cm i długości pięć razy większej niż jej średnica (np. odpowiednio przycięta rurka po ręczniku papierowym).

Hipoteza badawcza

Obecność Księżyca na niebie w znaczący sposób wpływa na liczbę widocznych gwiazd.

Przebieg doświadczenia

Uwaga! Pomiary należy przeprowadzić dwukrotnie: raz, gdy na niebie nie ma Księżyca, i drugi raz, gdy Księżyc jest w pełni.

1. Po wyjściu z domu przez 5–10 minut postaraj się nie patrzeć na źródła światła, aby oczy przyzwyczyły się do ciemności.
2. Przyłóż rurkę do oka i skieruj ją w stronę dowolnego fragmentu nieba. Policzb gwiazdy widoczne w polu widzenia. Ważne, aby w trakcie liczenia nie zmieniać pozycji rurki.
3. Zanotuj wynik pomiarów (podczas notowania nie używaj latarki). Gdy w rurce nie ma żadnej gwiazdy, wpisujemy 0 – to też ważny wynik.
4. Czynności powtórz 15–20 razy – kieruj rurkę w różne losowo wybrane obszary nieba.

Opracowanie wyników pomiarów

1. Oblicz średnią arytmetyczną liczby gwiazd widocznych w rurce podczas pomiarów wykonanych w bezksiężycową noc oraz średnią arytmetyczną z pomiarów uzyskanych podczas pełni Księżyca.
2. Każdą z obliczonych średnich pomnóż przez 200. Otrzymasz szacunkową liczbę gwiazd widocznych w dniu obserwacji.

Omówienie wyniku doświadczenia

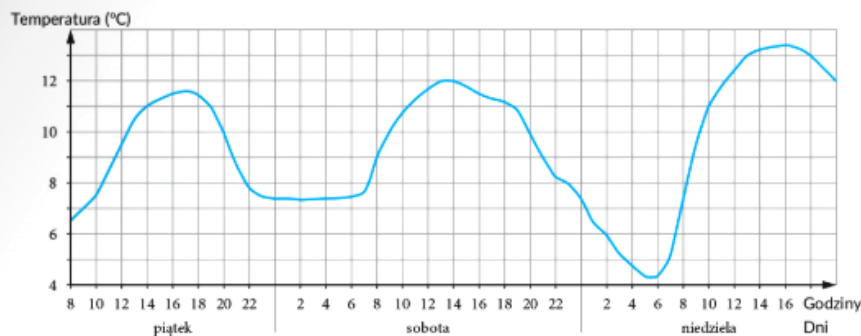
Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Porównaj wyniki uzyskane w czasie nocy bezksiężycowej i podczas pełni. Czy postawiona hipoteza została potwierdzona?
2. Jakie czynniki miały wpływ na wynik obserwacji?

NIEZBĘDNIK 1. Odczytywanie wykresów.

s. 16

Wiele zależności najlepiej przedstawić w postaci wykresów, a nie tabel z danymi, ponieważ ta metoda umożliwia znacznie łatwiejsze wyciąganie wniosków. Umiejętność odczytywania informacji i interpretowania wykresów przećwiczmy na przykładzie prognozy temperatury na koniec tygodnia (ryc. 1).



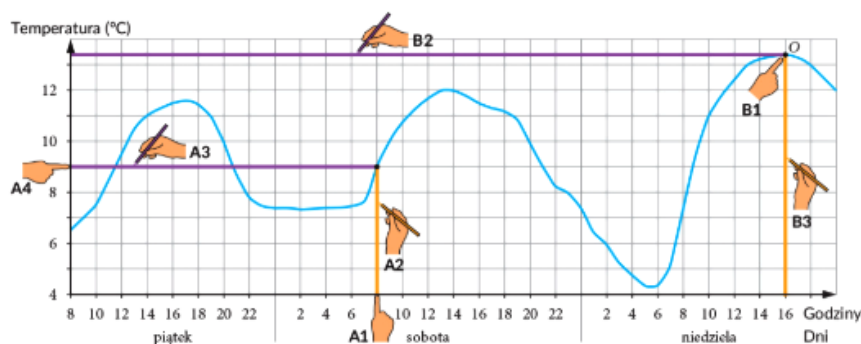
Ryc. 1. Wykres – prognoza temperatury

Na osi pionowej przedstawiono prognozowaną temperaturę w stopniach Celsjusza na szczycie Śnieżki, a na osi poziomej zaznaczono godziny i dni. Zależność temperatury od czasu przedstawiono za pomocą krzywej koloru niebieskiego.

Odczytanie pojedynczego pomiaru

Przypuśćmy, że chcemy się dowiedzieć, jaka będzie temperatura na Śnieżce w sobotę o godzinie 8.00 (ryc. 2). W tym celu wykonujemy poniższe czynności.

- A1. Na poziomej osi czasu odszukujemy punkt odpowiadający godzinie 8.00 w sobotę.
- A2. Z tego punktu rysujemy w górę odcinek pionowy (pomarańczowa linia), aż do przecięcia się z wykresem (narysowanym kolorem niebieskim).



Ryc. 2. Odczytywanie prognozowanych temperatur

- A3. Z punktu przecięcia pionowego odcinka z wykresem rysujemy odcinek poziomy w lewo (fioletowa linia).
- A4. Z punktu przecięcia poziomego odcinka z osią temperatury odczytujemy, że o tej porze będzie 9°C .

Odczytanie maksymalnej temperatury

Wykres pozwala nam też poznać wartość i moment wystąpienia maksymalnej temperatury podczas analizowanych dni (ryc. 2).

- B1. Odszukujemy najwyższy punkt wykresu. Oznaczamy go literą *O*.
- B2. Z tego punktu prowadzimy odcinek poziomy w lewo. Z punktu przecięcia tego odcinka z osią temperatury odczytujemy, że najwyższa prognozowana temperatura wynosi ok. $13,5^{\circ}\text{C}$.
- B3. Następnie z punktu *O* prowadzimy w dół odcinek pionowy. Z punktu przecięcia tego odcinka z osią czasu odczytujemy, że maksymalnej temperatury należy oczekiwać w niedzielę o godzinie 16.00.

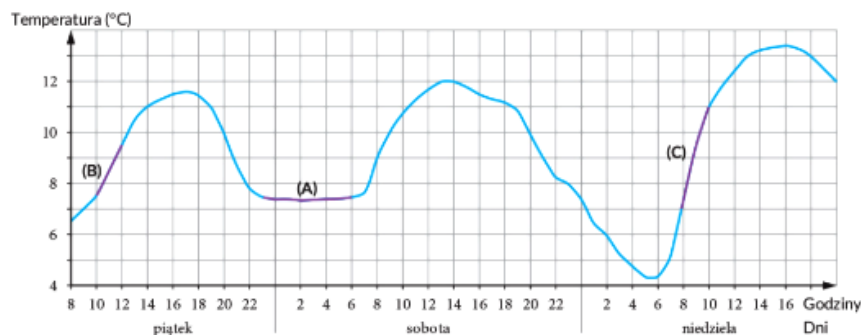
Analogicznie można odczytać minimalną temperaturę. Za punkt *O* należy wówczas przyjąć najniższy punkt wykresu – i powtórzyć sposób postępowania.

Prawidłowości na wykresie

Odczytajmy teraz kiedy temperatura się zmienia, a kiedy pozostaje stała (ryc. 3).

- (A) Widzimy, że w nocy z piątku na sobotę prognozowana temperatura między godziną 23.00 a 6.00 rano będzie prawie taka sama (około $7,5^{\circ}\text{C}$).

Zauważmy, że wykres jest w tym przedziale czasu praktycznie poziomy. **Poziomy wykres oznacza, że dana wielkość się nie zmienia.**



Ryc. 3. Odczytywanie prawidłowości na wykresie

Poszukajmy teraz przykładowych przedziałów czasu, w których temperatura rośnie.

- (B) W piątek między godziną 10.00 a 12.00 temperatura ma wzrosnąć od $7,5^{\circ}\text{C}$ do $9,5^{\circ}\text{C}$, czyli o 2°C .
- (C) W niedzielę między godziną 8.00 a 10.00 temperatura ma wzrosnąć od 7°C do 11°C , czyli o 4°C .

W przedziałach B i C temperatura rośnie, ale nie w tym samym tempie. W niedzielny poranek rośnie dwa razy szybciej niż w poranek piątkowy. Widzimy też, że krzywa temperatury bardziej stromo pnie się w górę w niedzielę rano niż w piątek rano. To oznacza, że **im bardziej stromy jest wykres, tym szybsze są zmiany danej wielkości.**

Analogiczna prawidłowość dotyczy spadku temperatury. Z wykresu można np. odczytać, że w piątek między godziną 18.00 a 20.00 temperatura będzie spadać szybciej niż w sobotę między godziną 16.00 a 18.00.

NIEZBĘDNIK 2. Sporządzanie wykresów.

s. 31

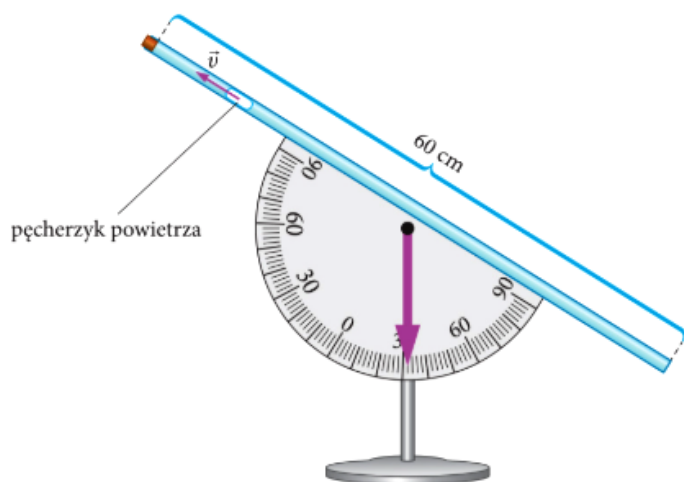
Naukowcy często sporządzają wykresy. Ten sposób przedstawiania danych jest szczególnie przydatny przy analizie danych z doświadczeń.

s. 208

Istnieją pewne zasady sporządzania wykresów obrazujących zależności między wielkościami fizycznymi. Przestrzeganie tych zasad sprawia, że wykresy są poprawne i czytelne.

Przykładowe doświadczenie

W prostej rurce o długości 60 cm wypełnionej wodą i zamkniętej korkiem pozostał pęcherzyk powietrza. Gdy rurka jest ustawiona pod pewnym kątem do poziomu, pęcherzyk powietrza porusza się ruchem jednostajnym w górę (ryc. 1).



Ryc. 1. Wizualizacja układu pomiarowego

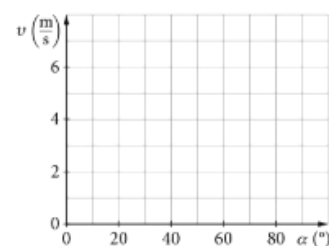
Chcemy zbadać zależność prędkości pęcherzyka od kąta nachylenia rurki do poziomu. Mierzmy czas, w którym pęcherzyk przebywa długość rurki. Wyznaczamy prędkość pęcherzyka poprzez podzielenie wskazanej długości przez czas. Pomiary wykonujemy dla różnych kątów z przedziału od 0° do 90°.

Wyniki pomiarów zapisano w tabeli.

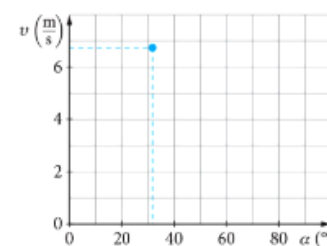
Nr pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kąt α (°)	0	8	20	16	32	40	35	51	68	78	90
Czas t (s)	–	18,8	11,2	11,8	9,0	8,3	8,4	8,6	10,2	10,8	12,2
Prędkość v (cm/s)	0	3,2	5,4	5,1	6,7	7,2	7,1	7,0	5,9	5,6	4,9

Przygotowanie układu współrzędnych

- Wielkość fizyczną, którą zmieniamy w doświadczeniu (u nas jest to kąt), traktujemy jako pierwszą współrzędną punktu i przedstawiamy na osi poziomej (ryc. 2).
- Wielkość fizyczną, którą mierzymy (u nas jest to wartość prędkości), traktujemy jako drugą współrzędną punktu i przedstawiamy na osi pionowej.
- Obie osie skalujemy w takim zakresie, aby nasze dane pomiarowe wypełniały prawie całą oś. Ponieważ są to różne wielkości fizyczne, skala na osiach nie musi być jednakowa.
- W naszym przykładzie pozioma oś powinna być wyskalowana od 0 do 100, wtedy wartości kątów wypełnią ją prawie w całości.
- Oś pionową skalujemy od 0 do 8, ponieważ największa prędkość to 7,2 cm/s.
- Obok każdej osi wypisujemy określone wielkości fizyczne wraz z ich jednostkami.



Ryc. 2. Przygotowanie układu współrzędnych



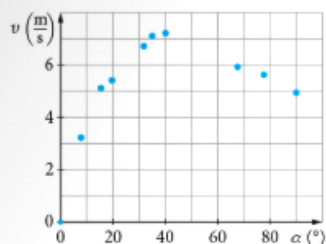
Ryc. 3. Naniesienie pierwszego pomiaru

Naniesienie pierwszego pomiaru

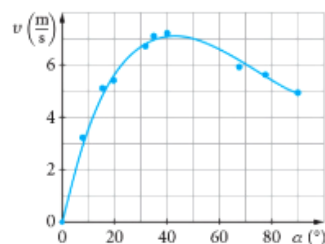
- Na przygotowanym układzie współrzędnych pomiary przedstawiamy w postaci punktów pomiarowych i zaznaczamy jako kropki albo krzyżyki (ryc. 3).
- Odczytujemy z tabeli pojedynczą miarę kąta i odpowiadającą jej prędkość. Na przykład dla pomiaru 5. miara kąta to 32°, a prędkość wynosi 6,7 cm/s.
- Od współrzędnej 32 na osi poziomej prowadzimy pomocniczą, pionową linię w górę.
- Od współrzędnej 6,7 na osi pionowej prowadzimy pomocniczą, poziomą linię w prawo.
- Przecięcie się tych linii wyznacza położenie pomiaru 5. w układzie współrzędnych.
- W praktyce nie rysuje się opisanych wyżej linii pomocniczych. Często wystarczy przyłożyć linijkę i od razu zaznaczyć położenie punktu.

Naniesienie pozostałych pomiarów i analiza wykresu

W analogiczny sposób zaznaczamy wszystkie pozostałe pomiary (ryc. 4).



Ryc. 4. Naniesienie pozostałych pomiarów



Ryc. 5. Szkic wykresu

Widzimy, że punkty w układzie współrzędnych układają się wzdłuż pewnej krzywej. Jednak nie należy łączyć ich ze sobą, ponieważ każdy pomiar obarczony jest pewną niepewnością. Musimy założyć, że badana zależność jest w miarę prosta, regularna. Dlatego rysujemy gładką linię, wzdłuż której grupują się punkty pomiarowe (ryc. 5).

Gdy następnie analizujemy badaną zależność, nie patrzymy już na punkty pomiarowe, tylko na narysowany wykres.

Widzimy, że początkowo prędkość pęcherzyka rośnie wraz z miarą kąta nachylenia rurki, ale nie jest to zależność proporcjonalna. Największą prędkość pęcherzyk uzyskuje dla kąta o mierze około 40° . Dla większych kątów prędkość pęcherzyka maleje, gdy rośnie nachylenie rurki.

NIEZBĘDNIK 3. Notacja wykładnicza.

s. 130

Wykorzystanie praw fizyki często wymaga wykonywania działań na liczbach bardzo dużych lub bardzo małych. Jeśli chcemy np. obliczyć siłę przyciągania między Słońcem a Ziemią, trzeba najpierw wyznaczyć iloczyn ich mas. Mają one wartości w przybliżeniu równe:

$$M_s = 2\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,\text{kg}$$

$$M_j = 6\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,\text{kg}$$

Zapis iloczynu tych mas nawet nie zmieściłby się w jednym wersie. Poza tym bardzo łatwo się pomylić podczas wypisywania tak dużej liczby zer.

Możemy napisać te liczby znacznie prościej dzięki wykorzystaniu potęg liczby 10. Wiemy, że wartość 100 można zapisać jako 10^2 , a 1000 jako 10^3 . Liczbę 0,01 da się przedstawić jako 10^{-2} , ponieważ $0,01 = \frac{1}{10^2} = 10^{-2}$. To ogólna zasada: $\frac{1}{10^a} = 10^{-a}$.

Aby ułatwić zapisywanie bardzo dużych albo bardzo małych liczb, wprowadzono zapis liczb nazywany notacją wykładniczą. Liczba zapisana w postaci wykładniczej ma postać:

liczba a w zakresie $1 \leq a < 10$ 10ⁿ liczba całkowita

Powyższe masy możemy więc zapisać w notacji wykładniczej:

$$M_s = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}, M_z = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}.$$

Przypomnijmy sobie zasady działań na potęgach:

$$10^a \cdot 10^b = 10^{a+b}$$

$$\frac{10^a}{10^b} = 10^{a-b}$$

$$(10^a)^b = 10^{a \cdot b}$$

a, b – dowolne liczby

Pozwolą nam one łatwo pomnożyć przez siebie masy Ziemi i Słońca, a potem zapisać wartość iloczynu w notacji wykładniczej:

$$2 \cdot 10^{30} \text{ kg} \cdot 6 \cdot 10^{24} \text{ kg} = (2 \cdot 6) \cdot 10^{(30+24)} \text{ kg} \cdot \text{kg} = 12 \cdot 10^{54} \text{ kg}^2 = 1,2 \cdot 10^{55} \text{ kg}^2$$

Tego wyniku nie warto nawet zapisać wprost (to aż 55 zer!). Zwróćmy za to uwagę, że na jednostkach również wykonuje się mnożenie (lub dzielenie).

Nie jest to jeszcze siła przyciągania między Słońcem a Ziemią. Siłę tę możesz obliczyć samodzielnie z wykorzystaniem prawa grawitacji opisanego w rozdziale 20.

- PRZYKŁAD 1.

Obliczmy przyspieszenie Księżyca w jego ruchu wokół Ziemi.

Wykorzystajmy II zasadę dynamiki oraz dane z przykładu 1 z rozdziału 20.

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2,0 \cdot 10^{20} \text{ N}}{7,3 \cdot 10^{22} \text{ kg}} = \frac{2,0}{7,3} \cdot \frac{10^{20}}{10^{22}} \frac{\text{N}}{\text{kg}} \approx 0,27 \cdot 10^{(20-22)} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} =$$

$$= 0,27 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Jak widać, przyspieszenie dośrodkowe Księżyca jest małe, ale to dzięki niemu Księżyc okrąża Ziemię.

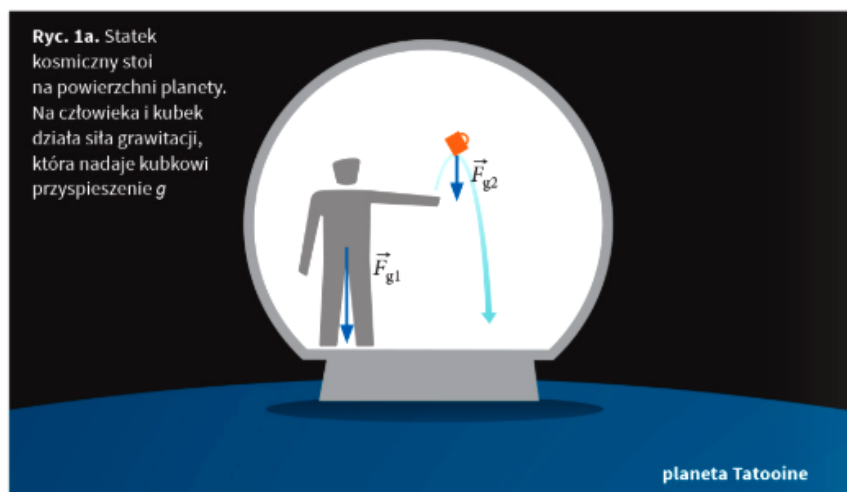
TEKST 1. Najszczęśliwsza myśl Einsteina

Było to w 1907 roku. Dwudziestoosmioletni urzędnik Albert Einstein jak zwykle rozmyślał w pracy. Dwa lata wcześniej wstrząsnął podstawami fizyki, gdy wykazał, że obserwatorzy mający różne prędkości inaczej postrzegają czas i przestrzeń, a energia i masa są związane wzorem: $E = mc^2$. Ta niezwykle teoria, nazwana **szczególną teorią względności**, połączyła czas i przestrzeń w czterowymiarową czasoprzestrzeń. Według niej odpowiednio szybkim statkiem kosmicznym można odbyć podróż trwającą np. 5 lat (według zegara na statku), a po powrocie stwierdzić, że na Ziemi upłynęło już np. 100 lat. Ta teoria była krokiem milowym w rozumieniu praw przyrody, jednakże ówczesny świat fizyków jeszcze tego nie zauważył. Einstein wciąż nie mógł znaleźć pracy zgodnej z jego naukowym powołaniem, czyli na dobrej uczelni.

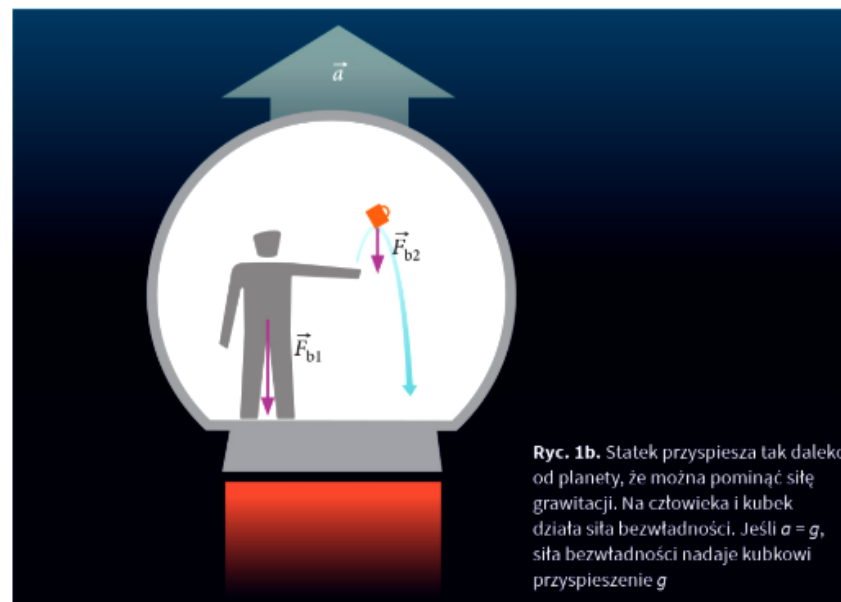
Wtedy właśnie przyszła mu do głowy – jak sam ją później określił – najszczęśliwsza myśl jego życia.

„Siedziałem właśnie w biurze patentowym w Bernie, gdy nieoczekiwanie przyszła mi do głowy pewna myśl: człowiek spadający swobodnie nie będzie odczuwał swojego ciężaru. Byłem doprawdy wstrząśnięty. Ta prosta myśl wywarła na mnie ogromne wrażenie i stała się impulsem do stworzenia teorii grawitacji”¹.

Rzeczywiście, człowiek spadający swobodnie jest w stanie nieważkości. Co w tym zadziwiającego? Geniusz Einsteina polegał głównie na tym, że potrafił on z takich prostych, znanych wszystkim faktów wyciągnąć głębokie wnioski. Przede wszystkim dzięki tej szczęśliwej myśli sformułował tak zwaną **zasadę równoważności**: siły bezwładności nie da się odróżnić (w małych obszarach) od siły grawitacji. Nieważkość w układzie spadającym powstaje dlatego, że siła bezwładności dokładnie równoważy siłę grawitacji.



Ryc. 1a. Statek kosmiczny stoi na powierzchni planety. Na człowieka i kubek działa siła grawitacji, która nadaje kubkowi przyspieszenie g



Ryc. 1b. Statek przyspiesza tak daleko od planety, że można pominąć siłę grawitacji. Na człowieka i kubek działa siła bezwładności. Jeśli $a = g$, siła bezwładności nadaje kubkowi przyspieszenie g

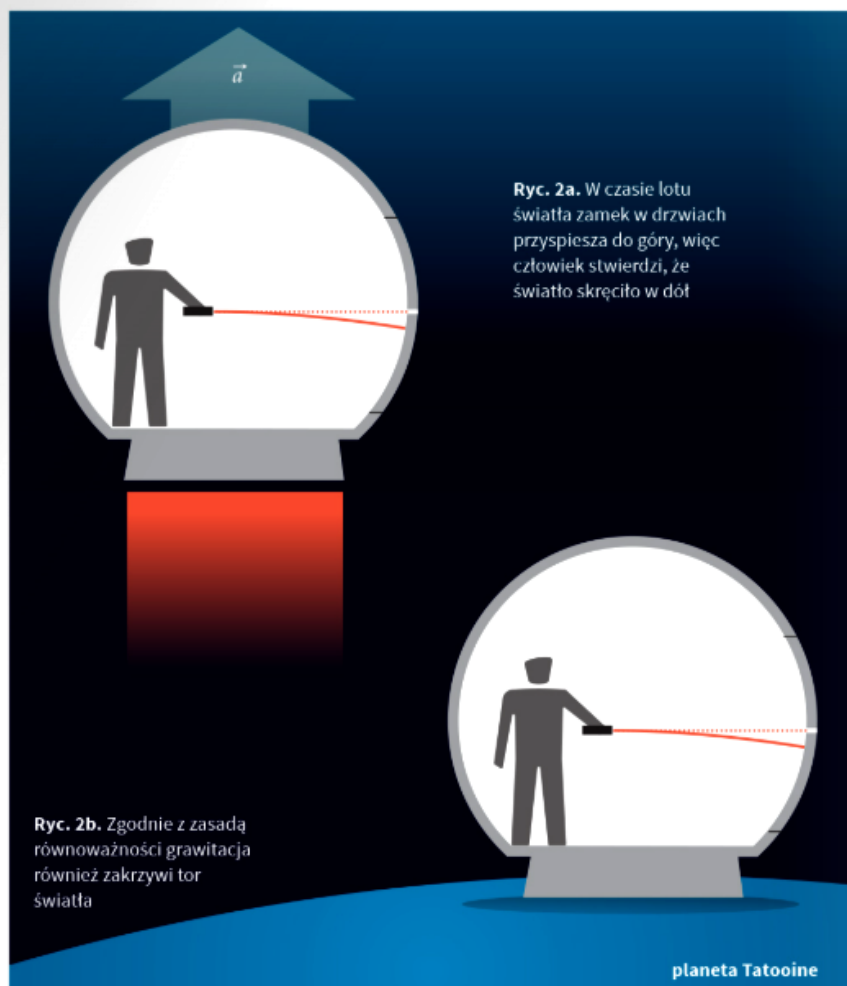
Zilustrujmy to przykładem. Zmęczony Han Solo² budzi się na swoim statku kosmicznym na planecie Tatooine po całonocnym maratonie gier komputerowych. Czuje ciężar swój i kubka, którym rzucił, ale nie wie, czy to dlatego, że ciągle jest na planecie (ryc. 1a), czy też Chewbacca odpalił już silniki statku, który porusza się z przyspieszeniem daleko w przestrzeni kosmicznej (ryc. 1b).

Jak Han Solo może stwierdzić bez wychodzenia z kabiny, czy na niego i wszystkie inne ciała w kabinie działa siła grawitacji, czy też siła bezwładności? Otóż nie może! Obie siły mają te same fundamentalne własności. Po pierwsze – działają na wszystkie ciała i nadają im jednakowe przyspieszenie. Po drugie – skutków działania obu sił można się pozbyć (w małym obszarze kabiny) przez zmianę układu odniesienia.

Podobieństwo między siłą grawitacji i siłą bezwładności było powszechnie znane, zobaczmy jednak, jakie wnioski wyciągnął z niego Albert Einstein. Przede wszystkim założył, że to podobieństwo dwóch sił ma charakter fundamentalny i w żadnym doświadczeniu (w małych obszarach i małych odstępach czasu) nie można ich odróżnić. Przeprowadźmy teraz tzw. doświadczenie myślowe. Zamknięty w kabinie Han chce się wydostać, więc kieruje wiązką laserową na zamek w drzwiach (ryc. 2a). Czy trafi do celu? Jeśli statek ma przyspieszenie, w trakcie lotu światła ściana z drzwiami zwiększy prędkość i ucieknie promieniowi światła trochę w górę. Han zobaczy, że wiązka światła uderzy w drzwi poniżej zamka, a zatem wywnioskuje, że skręciła w dół. A jeśli statek wciąż spoczywa na planecie Tatooine?

¹ A. Pais, *Pan Bóg jest wyrafinowany. Nauka i życie Alberta Einsteina*, Warszawa 2001, s. 187.

² Postać z *Gwiezdnych wojen*.



Teraz cofnijmy się do roku 1907. Niemal wszyscy fizycy uważali wtedy, że światło jest falą elektromagnetyczną, zatem nie podlega grawitacji. Tylko Einstein był przekonany, że światło jest strumieniem cząstek, dziś nazywanych fotonami. Jeśli siły bezwładności nie da się odróżnić od siły grawitacji i siła bezwładności odchyła światło, to siła grawitacji musi to robić w ten sam sposób (ryc. 2b). I to bez względu na to, czym jest światło! W ten sposób Einstein przewidział, że światło przechodzące w pobliżu masywnych ciał jest przez grawitację zakrzywane. Jeśli grawitacja działa tak samo na wszystkie obiekty, to jest cechą samej przestrzeni. W ten sposób Einstein odkrył, że to, co nazywamy siłą grawitacji, jest zakrzywieniem czasoprzestrzeni. Od tego zakrzywienia (grawitacji) zależą

rozmiary ciał i tempo upływu czasu. Ta niezwykle piękna i kompletna teoria, ukończona przez uczonego w 1915 roku po kilku latach wytężonej pracy, nosi nazwę **ogólnej teorii względności**. Potrafi ona opisać i przewidzieć dynamikę całego Wszechświata oraz istnienie czarnych dziur, na których „powierzchni” czas przestaje płynąć. To z niej wynika istnienie fal grawitacyjnych odkrytych w 2015 roku.

Zasada równoważności prosto wyjaśnia skomplikowane zjawiska również w życiu codziennym. Na ryc. 3 można zobaczyć, jak w przyspieszającym autobusie zachowa się kulka wisząca na sznurku, powierzchnia herbaty w szklance czy unoszący się balonik z helem. Wyjaśnienie jest zadziwiająco proste i piękne: żadne z ciał nie odróżnia siły bezwładności od siły grawitacji, zatem w tym autobusie kierunek pionu jest wyznaczony przez wypadkową tych dwóch sił. Siła wyporu działająca na balonik jest skierowana przeciwnie do tej wypadkowej, czyli do „nowego” kierunku pionu.



Ryc. 3. W przyspieszającym autobusie wszystkie ciała zachowują się tak, jakby kierunek pionu wyznaczała wypadkowa sił grawitacji oraz bezwładności

PYTANIA I ZADANIA

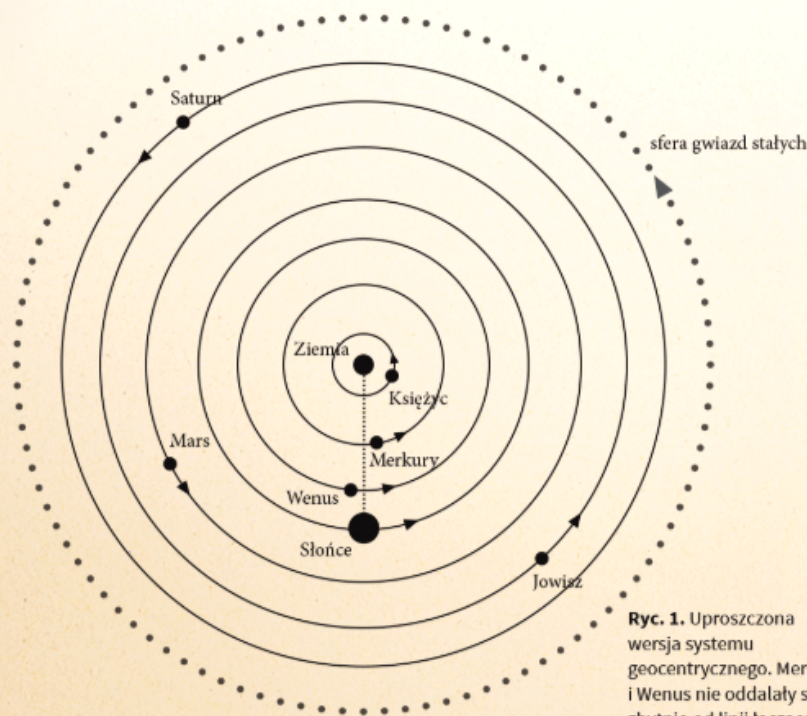
1. Czy w małych obszarach można odróżnić eksperymentalnie siłę bezwładności od siły grawitacji?
2. Wyjaśnij, dlaczego zasada równoważności obowiązuje tylko w niewielkich obszarach. Wskazówka: przerysuj sytuację z ryc. 1a (kabina powinna być względnie duża w porównaniu z planetą). Narysuj kierunki spadania dwóch ciał z przeciwnych krańców kabiny w dwóch sytuacjach: gdy działa siła grawitacji i gdy działa siła bezwładności.
3. Która teoria Alberta Einsteina opisuje czarne dziury?
4. Czy światło podlega grawitacji?
5. Dlaczego deskorolkarz zjeżdżający z pochyłości nie zachowuje postawy pionowej, lecz raczej prostopadłą do podłoża? Wyjaśnij to w układzie przyspieszającej deskorolki i na podstawie informacji podanych w tekście.

TEKST 2. Rewolucja na niebie i na Ziemi

„Wstrzymał Słońce, ruszył Ziemię, polskie go wydało plemię” – mowa tu oczywiście o Mikołaju Koperniku, jednym z największych uczonych w dziejach nauki. Spróbujmy przyjrzeć się wielkiemu astronomowi i jego odkryciu.

Mikołaj Kopernik, jak pisze wybitny historyk brytyjski Norman Davies, „pochodził z niemieckiej rodziny kupieckiej z Torunia i był lojalnym poddanym polskiego króla, którego bronił przed atakami Krzyżaków”³. W swoim długim, pracowitym życiu kanonika (1473–1543) piastował wiele funkcji, astronomią zajmował się tylko w czasie wolnym. Był więc astronomem amatorem w dzisiejszym rozumieniu tego terminu. Tuż przed śmiercią, po wieloletnich wahaniach, wydał dzieło *De revolutionibus orbium coelestium*, czyli *O obrotach sfer niebieskich*. Księga okazała się niezwykle rewolucyjna.

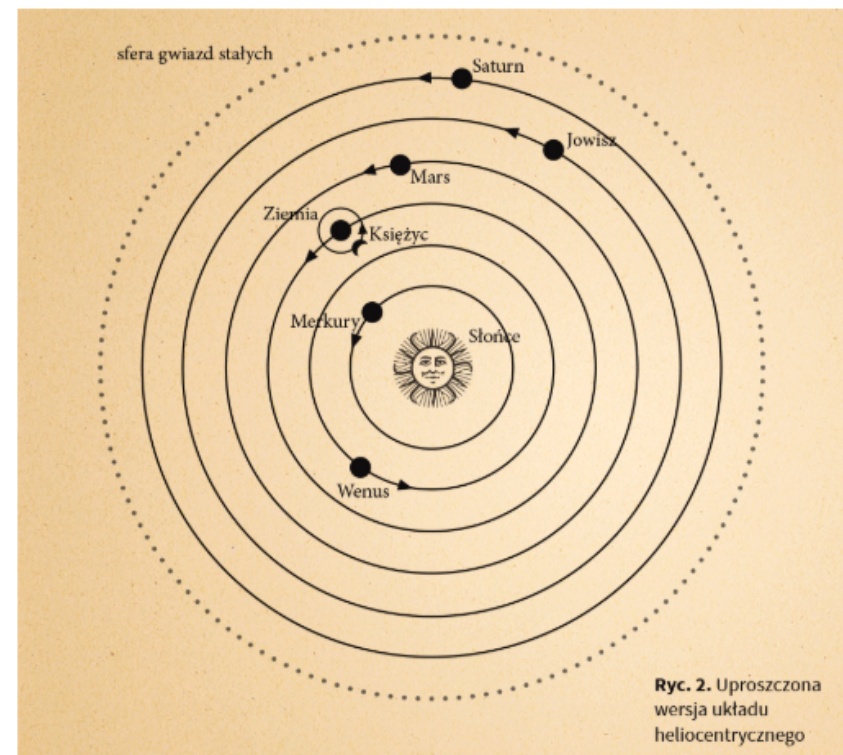
Ówczesna główna koncepcja filozofii przyrody sformułowana przez greckiego uczonego Ptolemeusza opisywała świat jako gigantyczną kulę. Na jej wewnętrznej powierzchni, zwanej sferą niebieską, były gwiazdy. Wszystkie ciała ciężkie dążyły do środka tego wszechświata, zatem składająca się z nich Ziemia była w jego centrum. Sfera niebieska okrężała Ziemię w czasie jednej doby, a planety (do których zaliczano także Księżyc i Słońce) krążyły wokół niej z różnymi okresami obiegu. Był to tzw. **model geocentryczny** (ryc. 1).



Ryc. 1. Uproszczona wersja systemu geocentrycznego. Merkury i Wenus nie oddalały się zbyt od linii łączącej Ziemię ze Słońcem

Ówcześni uczeni za pomocą tego modelu mogli w miarę dokładnie przewidywać przyszłe położenia planet, ale „nie zdołali odkryć (...) rzeczy najważniejszej, mianowicie układu Wszechświata i ustalonego porządku jego części”⁴. Nawet kolejność planet była w nim dość dowolna, nic też nie dało się w jego ramach powiedzieć o ich odległościach od Ziemi. Planety dolne – Merkury i Wenus – nie oddalały się w tym modelu zbyt od linii łączącej Ziemię ze Słońcem, a planety górne – Mars, Jowisz i Saturn – nie miały tego ograniczenia. Było to zupełnie niezrozumiałe.

W kulistość Ziemi uczeni nie wątpili już od czasów starożytnych. Przewidywały ją greckie teorie filozofii przyrody, a potwierdzały obserwacje astronomiczne i naziemne, np. statki znikające za horyzontem. Kopernik nie był pierwszym astronomem, który zauważył, że obserwowany ruch olbrzymiej sfery niebieskiej można wytłumaczyć ruchem obrotowym niewielkiej Ziemi, a sama sfera może pozostawać w spoczynku. Jednak ruchy wszystkich planet na sferze niebieskiej wyjaśnił genialnie prosto jednym tylko ruchem – Ziemi wokół Słońca, które w tej teorii znajdowało się w środku orbit planet (ryc. 2).



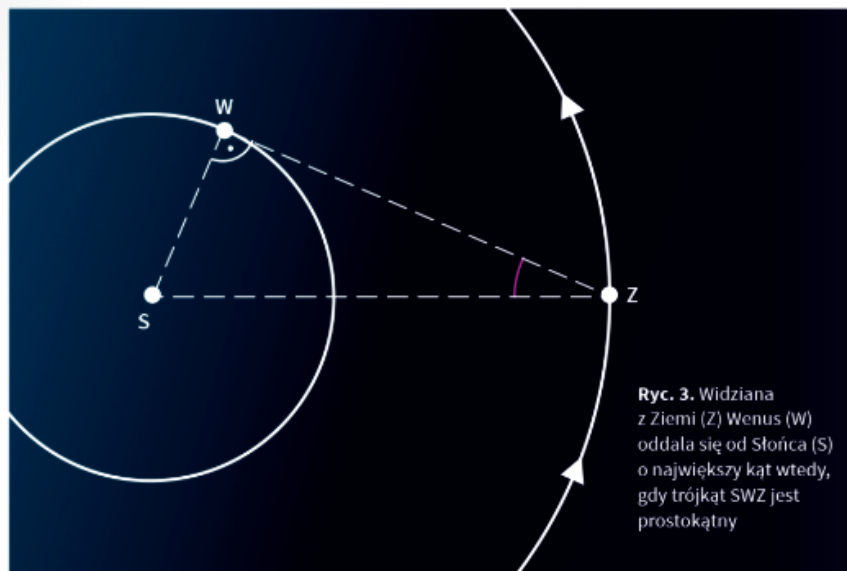
Ryc. 2. Uproszczona wersja układu heliocentrycznego

³ N. Davies, *Europa. Rozprawa historyka z historią*, Kraków 1998, s. 548.

⁴ M. Kopernik, *O obrotach*, Warszawa–Kraków 1976, s. 4.

W przeciwieństwie do poprzedników Kopernik potrafił wyjaśnić za pomocą swojej teorii wiele faktów dotąd niezrozumiałych, np. niejednostajne ruchy planet na tle gwiazd. W jego systemie heliocentrycznym stało się jasne, dlaczego tylko planety dolne nie oddalają się na niebie na dowolnie duży kąt od Słońca. Zrozumiałe stało się też, dlaczego planety górne świecą zdecydowanie najjaśniej, gdy są na niebie po przeciwnej stronie niż Słońce.

Mikołaj Kopernik jako pierwszy podał poprawne odległości planet od Słońca (co prawda tylko w jednostkach astronomicznych). Dopiero w systemie heliocentrycznym było to możliwe. Spróbujmy to pokazać na przykładzie Wenus (ryc. 3).



Jeśli zmierzmy maksymalny kąt, o jaki Wenus oddala się od Słońca na sferze niebieskiej, to po skorzystaniu z własności trójkąta prostokątnego przedstawionego na ryc. 3 łatwo obliczymy odległość Słońce–Wenus przy założeniu, że odległość Słońca od Ziemi wynosi 1. Teoria Mikołaja Kopernika miała wiele zalet. Niestety, miała również dwie zasadnicze „wady”. Po pierwsze: była zupełnie sprzeczna z potocznym doświadczeniem – każdy przecież widział, że powierzchnia Ziemi spoczywa, a Słońce i Księżyc, planety i gwiazdy poruszają się na niebie. Po drugie była całkowicie sprzeczna z obowiązującymi wówczas teoriami fizycznymi. Nic zatem dziwnego, że ogromna większość uczonych nie potrafiła jej poważnie. Dopiero gdy powstała sformułowana na jej podstawie nowa fizyka Newtona, szala zaczęła się przechylać na korzyść systemu heliocentrycznego. Decydujące było trafne obliczenie przez Halleya – na podstawie prawa grawitacji Newtona – czasu ponownego pojawienia się komety, dziś nazywanej komętą Halleya. Nastąpiło to

w połowie XVIII wieku, dwieście lat po śmierci Kopernika, a sto lat po umieszczeniu przez Kościół katolicki jego księgi *O obrotach sfer niebieskich* w *Indeksie ksiąg zakazanych*. Sam genialny Kopernik świetnie zdawał sobie sprawę z ogromnego oporu, jaki musiała wzbudzić jego koncepcja. Warto przeczytać przedmowę do jego dzieła, w której pięknie tłumaczy swoje motywacje i rozterki. Dla potępiających system heliocentryczny na podstawie świadectwa zmysłów ma nader lakoniczną odpowiedź: „Dzieła matematyczne pisane są dla matematyków”⁵. To zdanie aktualne także w dzisiejszych czasach, gdy wielu ludzi bardziej wierzy w obiegowe opinie niż w wyniki badań naukowych.

PYTANIA I ZADANIA

1. Czy to Kopernikowi zawdzięczamy odkrycie tego, że Ziemia jest kulą?
2. Jak została przyjęta przez większość ówczesnych uczonych teoria Kopernika? Dlaczego właśnie tak?
3. Wyjaśnij na podstawie systemu heliocentrycznego, dlaczego Mars jest zdecydowanie najjaśniejszy wtedy, gdy znajduje się na niebie 180° od Słońca. Czy można ten fakt wyjaśnić w ramach systemu geocentrycznego?
4. Planety krążą wokół Słońca w przybliżeniu ruchem jednostajnym. Jak wytłumaczyć fakt, że obserwowane z Ziemi zmieniają kierunek ruchu na tle sfery niebieskiej?
5. Współcześni Kopernikowi uczeni często wysuwali przeciwko jego teorii następujący argument: „Jeśli Ziemia szybko wiruje z zachodu na wschód, to ciała jej niedotykające (np. chmury i ptaki) powinny zostawać w tyle, czyli szybko poruszać się ze wschodu na zachód”. Wyjaśnij na podstawie fizyki newtonowskiej bezzasadność tego argumentu.

⁵ M. Kopernik, *O obrotach*, Warszawa–Kraków 1976, s. 6.

ROZDZIAŁ 1. (s. 11)

1. **a)** 21,2 cm $\pm$ 0,1 cm
b) 0,5 %
2. **a)** 8,48 V
b) 0,01 V
c) 0–20 V
3. **a)** 22 °C
b) 2 °C
c) od –4 °C do +204 °C
4. boisko: $\Delta l = \pm 2,2$ m, ławka: $\Delta l = \pm 0,02$ m
5. $d \approx 2700$ kg/m³

ROZDZIAŁ 2. (s. 22)

2. $v_1 \approx 0,82$ m/s, $v_2 \approx 0,48$ m/s
3. $t \approx 65$ min
4. Czas jazdy to 10,5 h + 4 przerwy po 20 min, czyli razem 11 h 50 min.
5. $s \approx 190$ km

ROZDZIAŁ 3. (s. 31)

1. Pojazd B
3. **a)** $a \approx 16$ m/s²
b) $a \approx 13$ m/s²
4. $t \approx 49$ s
5. $a \approx 14$ m/s²

ROZDZIAŁ 4. (s. 39)

1. O godzinie 10.49
2. **a)** Pojazd B
b) $s_B/s_A \approx 2,5$
3. $t = 10$ min
4. $a \approx 0,63$ m/s²
5. $s \approx 490$ m

POWTÓRZENIE DZIAŁU KINEMATYKA (s. 42)

1. A: 1, 2
B: 3, 4
2. B 1
3. $t = 12$ s
4. 1 P
2 P
5. **b)** $t = 12$ s
6. $l = 276,3$ m

7. $t = 6$ h 40 min
8. **a)** samochód: $a = 2,8$ m/s², tramwaj: $a = 0$ m/s²
b) tramwaj
9. **a)** $s \approx 32,06$ m
b) $t \approx 3,08$ s
10. **a)** $v = 12,5$ m/s
b) $a \approx 2,60$ m/s²

ROZDZIAŁ 5. (s. 54)

1. $F = 850$ N

ROZDZIAŁ 6. (s. 62)

1. $F_{op} = 1200$ N
2. $F_p \approx 44$ N
3. $F_w \approx 85$ N
4. **a)** $F_c = 5720$ N
b) $F_c = 5480$ N

ROZDZIAŁ 7. (s. 70)

1. $F_w \approx 8,1$ N, $a \approx 34$ m/s²
2. $F_w \approx 460$ kN
3. $t \approx 1$ min
4. $a = 4,5$ m/s², $F_n = 1300$ N

ROZDZIAŁ 8. (s. 78)

2. Największa – B, najmniejsza – D.
3. Równoległe do deski w górę.
4. **a)** $F_{t\max} = 1,44$ N
b) $t = 0,32$ s
c) $F_{t\text{kin}} \approx 1,2$ N
5. **b)** $F_t = F_g$, $F_{n1} = F_{n2}$
c) Wzrosnie siła nacisku na ściany, tarcie i ciężar pozostaną bez zmian.

ROZDZIAŁ 9. (s. 85)

2. $h \approx 16$ m.
3. Jeśli $h \approx 1,5$ m, to $t = 1,4$ s. Młotek i piórko spadały tak samo – na Księżycu nie ma oporu powietrza.
4. $F_{op} \approx 64$ mN
5. Większą prędkość graniczną osiągnie stalowa kula.

ROZDZIAŁ 10. (s. 92)

1. **a)** $v = 0$ m/s
b) $v \approx 1700$ km/h

2. $v_m = 24v_g$
3. $a_d \approx 6,3 \text{ m/s}^2$
 $F_d \approx 380 \text{ N}$
4. $v \approx 11 \text{ m/s}$
5. Wskazówka: skonstruuj siłę dośrodkową z siły nacisku oraz z ciężaru.

ROZDZIAŁ 11. (s. 100)

3. $a = 214 \text{ m/s}^2$, $F_b = 15 \text{ kN} = 22 F_g$
4. $a_{\max} \approx 4,7 \text{ m/s}^2$

ROZDZIAŁ 12. (s. 107)

3. $a = 3,65 \text{ m/s}^2$
4. $a = 0,8 \text{ m/s}^2$, $s = 160 \text{ m}$, $h \approx 13 \text{ m}$
5. $l = 7,5 \text{ m}$

POWTÓRZENIE DZIAŁU DYNAMIKA (s. 112)

3. B 2
4. $F_w \approx 106 \text{ N}$
6. a) $a = 3 \text{ m/s}^2$
b) $a \approx 2,3 \text{ m/s}^2$
7. C 2
8. 1 F, 2 P
9. B
10. $F_n \approx 1100 \text{ N}$

ROZDZIAŁ 13. (s. 120)

5. b) $E \approx 300\,000 \text{ J}$

ROZDZIAŁ 14. (s. 126)

2. a) i b) $W = \Delta E \approx 137\,000 \text{ J}$
c) $P \approx 470 \text{ W}$
5. $F_{\text{op}} \approx 290 \text{ N}$

ROZDZIAŁ 15. (s. 131)

1. $E_g/E_k \approx 25$
2. $E_g \approx 120\,000 \text{ J}$, $E_k = 540 \text{ J}$
3. $\Delta E = 150\,000 \text{ J}$

ROZDZIAŁ 16. (s. 139)

1. a) $t \approx 0,5 \text{ s}$
b) $E_k/E \approx 0,25$

3. $h \approx 46 \text{ m}$
4. $v \approx 6 \text{ m/s}$
5. $E_k/E_g \approx 0,58$, więc tracone jest 42 % energii początkowej.

ROZDZIAŁ 17. (s. 145)

1. $x \approx 0,3 \text{ m}$
3. $W \approx 2E_k = 50 \text{ J}$
4. a) $E_k \approx 18\,000 \text{ J}$
b) $E_s \approx 44\,000 \text{ J}$
5. 3000 N

ROZDZIAŁ 18. (s. 151)

1. $E_k \approx 710 \text{ J}$, $E_g \approx 156 \text{ J}$
2. Środek ciała zawodnika podniesie się o ok. 1,3 m, czyli będzie nad poprzeczką.
3. $v \approx 15,5 \text{ m/s}$

POWTÓRZENIE DZIAŁU ENERGIA I JEJ PRZEMIANY (s. 154)

1. C
2. C
3. D
4. b) $E_{k\max} = 270 \text{ J}$
c) $h = 30 \text{ m}$
5. a) $E_p = 5580 \text{ J}$
b) $E_k = 15 \text{ J}$
c) $P = 588 \text{ W}$
6. $v \approx 31 \text{ m/s}$
7. $h \approx 3,27 \text{ m}$
8. $E_k/E_g = 0,63$, więc tracone jest 37 % energii początkowej.
9. $W = 100 \text{ J}$
10. $W = 17,5 \text{ J}$

ROZDZIAŁ 19. (s. 163)

2. $d_{\text{słońca}} \approx 0,009 \text{ au}$
3. Wenus. 42 mln km

ROZDZIAŁ 20. (s. 169)

2. 3 razy.
3. Około 3400 razy.

ROZDZIAŁ 21. (s. 176)

1. $T \approx 1,5$ h
2. $v \approx 1$ km/s

ROZDZIAŁ 22. (s. 180)

1. Około 330 000 razy.
2. Dla Merkurego i Wenus.
4. $m \approx 1,9 \cdot 10^{27}$ kg
5. $M \approx 5 \cdot 10^{36}$ kg

ROZDZIAŁ 23. (s. 188)

2. $F_n \approx 5100$ N
4. Wskazówka: przeciążenie na obu szalkach wagi będzie takie samo.
5. $t \approx 0,027$ s, $a \approx 1800$ m/s²

ROZDZIAŁ 24. (s. 194)

1. $t \approx 8$ min
2. Odległość do najbliższej gwiazdy jest większa od odległości Słońce–Neptun około 9000 razy.
3. Wskazówka: Zmierz na rycinie 24.1 kąt, jaki zakresliła wybrana gwiazda wokół gwiazdy polarniej, i oblicz z proporcji czas ekspozycji przy znanym okresie obrotu nieba.
5. $m \approx 4 \cdot 10^{41}$ kg

ROZDZIAŁ 25. (s. 201)

4. Dinozaury około 1 %, Ziemia 32 %

POWTÓRZENIE DZIAŁU GRAWITACJA I ASTRONOMIA (s. 204)

1. 378 mln km i 78 mln km
2. $d \approx 0,001$ ly
3. $g \approx 0,19$ m/s²
4. 2 razy mniejsza.
6. 1 F, 2 P
7. I, III
8. B 1

Tabela 1. Stałe fizyczne i astronomiczne

prędkość światła w próżni	$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
przyspieszenie ziemskie	$g \approx 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
stała grawitacji	$G \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$
stała Hubble'a	$H \approx 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{ly}}$
jednostka astronomiczna	1 au $\approx 1,5 \cdot 10^{11}$ m
masa Ziemi	$M_z \approx 5,97 \cdot 10^{24}$ kg $\approx 6 \cdot 10^{24}$ kg
masa Słońca	$M_s \approx 1,99 \cdot 10^{30}$ kg $\approx 2 \cdot 10^{30}$ kg
promień Ziemi	$R_z \approx 6370$ km $= 6,37 \cdot 10^6$ m

Tabela 2. Przedrostki do wielokrotności i podwielokrotności jednostek

Przedrostek	Skrót	Mnożnik
peta	P	$10^{15} = 1\,000\,000\,000\,000\,000$
tera	T	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$
giga	G	$10^9 = 1\,000\,000\,000$
mega	M	$10^6 = 1\,000\,000$
kilo	k	$10^3 = 1000$
hekto	h	$10^2 = 100$
deka	da	$10^1 = 10$
–	–	$10^0 = 1$
decy	d	$10^{-1} = 0,1$
centy	c	$10^{-2} = 0,01$
mili	m	$10^{-3} = 0,001$
mikro	μ	$10^{-6} = 0,000\,001$
nano	n	$10^{-9} = 0,000\,000\,001$
piko	p	$10^{-12} = 0,000\,000\,000\,001$
femto	f	$10^{-15} = 0,000\,000\,000\,000\,001$

B

bezwładność [*inertia*] 60

C

cyfry znaczące [*significant digits*] 9

czarna dziura [*black hole*] 179

czasoprzestrzeń [*spacetime*] 191

częstotliwość [*frequency*] 86

D

droga [*distance*] 12, 34, 36

Droga Mleczna [*Milky Way*] 192

E

energia [*energy*] 116

energia całkowita [*total energy*] 116

energia elektryczna [*electric energy*] 119

energia grawitacji [*gravitational energy*] 116, 127

energia kinetyczna [*kinetic energy*] 116, 129

energia mechaniczna [*mechanical energy*] 135

energia sprężystości [*elastic energy*] 116, 141

energia wewnętrzna [*internal energy*] 116

ewolucja Wszechświata [*chronology of the Universe*] 195

G

galaktyka [*galaxy*] 192

Galaktyka Andromedy [*Andromeda Galaxy*] 193

gwiazda [*star*] 191

gwiazdozbiór [*constellation*] 190

J

jednostka astronomiczna [*astronomical unit*] 159

K

kometa [*comet*] 160

M

masa [*mass*] 65, 118, 165

meteoryt [*meteorite*] 162

moc [*power*] 124

N

niepewność pomiarowa [*measurement uncertainty*] 7

niepewność względna [*fractional uncertainty*] 9

nieważkość [*weightlessness*] 181

O

odkształcenie sprężyste [*elastic deformation*] 140

okres [*period*] 86

orbita [*orbit*] 160, 172

orbita eliptyczna [*elliptic orbit*] 175

P

perpetuum mobile [*perpetual motion machine*] 124

planeta [*planet*] 160

planeta karłowata [*dwarf planet*] 160

planetoida [*asteroid*] 160

położenie [*position*] 16, 18

praca [*work*] 121

prawo grawitacji [*Newton's law of gravitation*] 165

prawo Hubble'a [*Hubble's law*] 195

prędkość [*velocity*] 13

prędkość graniczna [*terminal velocity*] 83

prędkość orbitalna [*orbital speed*] 173

przeciążenie [*load factor*] 183

przemiany energii [*energy transformation*] 119

przemieszczenie [*displacement*] 18

przyspieszenie [*acceleration*] 24

przyspieszenie grawitacyjne [*gravitational acceleration*] 166

przyspieszenie ziemskie [*acceleration of free fall*] 80

R

rok świetlny [*light year*] 190

rozdzielczość [*resolution*] 6

równia pochyła [*inclined plane*] 103

ruch jednostajny [*uniform motion*] 19, 20, 32

ruch po okręgu [*circular motion*] 86

ruch zmienny [*non-uniform motion*] 23

S

satelita [*satellite*] 171

satelita geostacjonarny [*geostationary satellite*] 174

sfera niebieska [*celestial sphere*] 190

siła [*force*] 46

siła bezwładności [*inertial force*] 93

siła ciężkości, ciężar [*weight*] 51

siła dośrodkowa [*centripetal force*] 87

siła grawitacji [*gravitational force*] 165

siła nacisku [*normal force*] 48

siła oporu [*resistive force*] 49, 71

siła tarcia [*friction*] 49, 74

siła wewnętrzna [*internal force*] 51, 53

siła wypadkowa [*net force*] 55

siła wyporu [*buoyant force*] 50

siła zewnętrzna [*external force*] 52

siłomierz [*dynamometer*] 46

składanie sił [*addition of forces*] 55

swobodne spadanie ciał [*free fall*] 65, 80

T

tarcie kinetyczne [*kinetic friction*] 74

tarcie statyczne [*static friction*] 75

teoria Wielkiego Wybuchu [*Big Bang theory*] 199

tor ruchu [*trajectory*] 12

U

układ inercjalny [*inertial frame*] 95

układ nieinercjalny [*non-inertial frame*] 95

układ odniesienia [*frame of reference*] 12, 94

Układ Słoneczny [*Solar System*] 158

W

wektor [*vector*] 17

współczynnik sprężystości [*spring constant*] 140

współczynnik tarcia [*coefficient of friction*] 76

Wszechświat [*Universe*] 195

Z

zasada bezwładności [*law of inertia*] 60

zasada zachowania energii [*the law of conservation of energy*] 117

zasada zachowania energii mechanicznej [*the principle of the conservation of mechanical energy*] 135

Źródła ilustracji i fotografii

Okładka: (skoczek spadochronowy) Oliver Furrer/Stockbyte/Getty Images

Tekst główny: s. 14–15 (infografika); s. 46 (klocek); s. 54 (magnesy na wózku); (kulka na linie); s. 55, 56 (klocek); s. 70 (klocek); (wykres); s. 72 (cząsteczki ośrodką); s. 74 (stykające się powierzchnie); s. 78 (kształty); s. 88 (wykres); s. 89 (piłka w autobusie); s. 90 (zakręt); s. 91 (wykres); s. 96 (autobus); s. 97 (piłka w autobusie); s. 103 (równia); s. 104 (samochód i równia); s. 105 (dach); s. 106 (klocek na równi); s. 107 (skocznia); s. 108–109 (siła nośna); (silnik); (infografika); s. 117 (cząsteczki przy odkształceniu); s. 124 (perpetuum mobile); s. 129 (człowiek przy studni); s. 132–133 (obrys samolotu); (infografika); s. 134 (ciężarek na sznurku); s. 138 (rzut jabłkiem); s. 139 (tor saneczkowy); s. 141 (odkształcenie); s. 144 (skok na trampolinie); s. 154 (listewka z ciężarkiem); s. 161 (orbity planet); s. 172 (satelita); s. 174 (satelita na orbicie); s. 177 (Ziemia na orbicie); s. 182 (wykres); s. 183, 184 (waga); s. 185 (deskorolkarz na rampie); s. 186–187 (infografika); s. 192 (Droga Mleczna); s. 196 (prędkość galaktyk-wykresy); s. 198 (galaktyka Wir i Droga Mleczna); s. 209 (klocek na równi); s. 211 (klocki na stole); s. 222, 223, 224 (statek kosmiczny na planecie); s. 225 (autobus); s. 226 (układ geocentryczny); s. 227 (układ heliocentryczny); s. 228 (Ziemia i Wenus)

Autor: Stefan Drewiczewski

s. 51 (paczka); s. 54 (Iódka); s. 200 (skład Wszechświata); s. 216 (prognoza pogody); (odczytywanie temperatury); s. 217 (prawidłowości na wykresie); s. 218 (układ pomiarowy)

Autor: Sławomir Skryśkiewicz

s. 40–41 (skiecznotka kinematyka); s. 110–111 (skiecznotka dynamika); s. 152–153 (skiecznotka energia); s. 202–203 (skiecznotka grawitacja)

Autor: Katarzyna Wojewoda

s. 5 (spadający smartfon) Vera Petrunina/Shutterstock.com; s. 6 (dzieci) New Africa/Shutterstock.com, (termometr) Nataliass/Shutterstock.com, (smartfon) Alexey Boldin/Shutterstock.com; s. 8 (paralaksa) Grzegorz F. Wojewoda, (smartfon) MPFPphotography/Shutterstock.com; s. 9 (taśma miernicza) kKong/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 10 (smartfon) Alexey Boldin/Shutterstock.com; s. 11 (woltomierz) shanshinyury/Shutterstock.com, (termometr) Nataliass/Shutterstock.com; s. 12 (mapa z GPS) positivo/Shutterstock.com; s. 13 (koło rowerowe) Gritsana P/Shutterstock.com, (rowerzystka) OSTILL is Franck Camhi/Shutterstock.com; s. 14–15 (rzeka) blickwinkel/Alamy Stock Photo/BE&W, (łódki i statki) jokerom/Shutterstock.com, (dron) Ivan Baranov/Shutterstock.com, (drzewo) NikhomTreeVector/Shutterstock.com; s. 17 (Ziemia) Egyptian Studio/Shutterstock.com, (satelity) Golden Sikorka/Shutterstock.com; s. 19 (samochód) positivo/Shutterstock.com, (zrzut ekranu programu Tracker) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 23 (biegacz) Jacob Lund/Shutterstock.com, (zrzut ekranu programu Tracker) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 24 (spadająca piłka) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 25, 26 (samochód) Maksim Toome/Shutterstock.com; s. 28 (zrzut ekranu programu Tracker) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 29 (smartfon) Alexey Boldin/Shutterstock.com; s. 30 (autobus) LeManna/Shutterstock.com/Shutterstock.com; s. 32 (droga) Ekaterina Kondratova/Shutterstock.com, (samochód) positivo/Shutterstock.com; s. 35 (pociąg) Ortodox/Shutterstock.com; s. 37 (prom kosmiczny) Alones/Shutterstock.com; s. 38 (przejście dla pieszych) Photographee.eu/Shutterstock.com; s. 45 (linoskoczek) zhukovvvlad/Shutterstock.com; s. 46 (zawodnicy sumo) Dr. Gilad Fiskus/Shutterstock.com, (silomierz z butelką) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 47 (doświadczenie z gumkami) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 48 (dziewczyna na krześle) Kamenetskiy Konstantin/Shutterstock.com; s. 49 (ręka) Jr images/Shutterstock.com, (książka) Amoro/Shutterstock.com, (deskorolka) fotoslaz/Shutterstock.com, (piłkarz i piłka) Gino Santa Maria/Shutterstock.com; s. 50 (dziewczyna w wodzie) David Gee 4/Alamy Stock Photo/BE&W, (Ziemia) Egyptian Studio/Shutterstock.com; s. 51 (baron Münchhausen) History and Art Collection/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 52 (wiosłarz) filippo giuliani/Shutterstock.com, (samochód) irin-k/Shutterstock.com; s. 53 (mężczyzna) Viorel Sima/Shutterstock.com; s. 55 (żaglówka) IM_photo/Shutterstock.com; s. 56 (samochód) Rawpixel.com/Shutterstock.com; s. 57 (jabłko na wadze) gresci/Shutterstock.com; s. 58 (spadochroniarz) Ensuer/Shutterstock.com; s. 59 (żaglówka) Oleg Lopatkin/Shutterstock.com, (przeciąganie liny) Lopolo/Shutterstock.com; s. 60 (test zderzeniowy) 2014 Bloomberg Finance LP/Getty Images; s. 61 (szklanka z sokiem) Grzegorz Wojewoda/WSiP; s. 62 (skrzynia) New Africa/Shutterstock.com, (balon) topseller/Shutterstock.com; s. 63 (sprinter) dotshock/Shutterstock.com, (samochód) Rawpixel.com/Shutterstock.com; s. 64 (przeciąganie ciężarówki) balipadma/Shutterstock.com; s. 65 (samochód) PHOTOCREO Michal Bednarek/Shutterstock.com, (spadający telefon) cobalt88/Shutterstock.com; s. 66 (mężczyzna z wózkiem) Ljupco Smokovski/Shutterstock.com, (skrzynia) New Africa/Shutterstock.com; s. 67 (samochód) Dimitris Leonidas/Shutterstock.com, (smartfon) KavardakovA/Shutterstock.com, (poduszka) Africa Studio/Shutterstock.com; s. 68 (linijka i kulka plastelinowa) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 69 (Przechodzący przez rzekę) Dariusz Bednarek/BE&W, (linoskoczek) blickwinkel/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 71 (żywyl) Vit Kovalcik/Shutterstock.com, (kobieta z parasolem) Alistair Berg/Getty Images; s. 72 (rekin) Alexius Sutandio/Shutterstock.com,

(samochód w tunelu aerodynamicznym) Robert Clark, (pileczka) Africa Studio/Shutterstock.com; s. 73 (młyn wodny) Mike Vande Ven Jr/Shutterstock.com, (żaglowiec) ALVOV/Shutterstock.com, (mapa synoptyczna) Łukasz Król; s. 74 (Air Hockey) simon bruntnell/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 75 (szafa) Dima Moroz/Shutterstock.com, (dziewczynka) Kasefoto/Shutterstock.com, (mężczyzna) ESB Professional/Shutterstock.com; s. 76 (koło samochodu) AlexLMX/Shutterstock.com, (silomierz ze smartfonem) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP, (silomierz-wskazanie) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 77 (sprinter) Jacob Lund/Shutterstock.com; s. 79 (mężczyzna naciskający na ściany) alphaspirit.it/Shutterstock.com; s. 80 (piórka) 1933bkk/Shutterstock.com; s. 81 (młotek i piórko na Księżycu) NASA; s. 82 (kulka plasteliny) Ekaterina_Minaeva/Shutterstock.com, (pileczka) Africa Studio/Shutterstock.com, (wiewiórka) Prisma by Dukas Presseagentur GmbH/Alamy Stock Photo/BE&W, (spadochroniarz) Sky Antonio/Shutterstock.com; s. 83 (lot w tunelu aerodynamicznym) Liukov/Shutterstock.com; s. 84 (pileczka) Africa Studio/Shutterstock.com; s. 86 (zabawka-bączek) mashurov/Shutterstock.com; s. 87 (pralka) Zovteva/Shutterstock.com; s. 89 (postać) jenjira/Shutterstock.com, (piłka) Supertrooper/Shutterstock.com; s. 90 (samochód) Vladimiroquai/Shutterstock.com; s. 92 (kolarze) Shahjehan/Shutterstock.com; s. 93 (wypadek na rowerze) crazymedia/Shutterstock.com, (dziewczyna) studioloce/Shutterstock.com, (chłopak) Valua Vitaly/Shutterstock.com, (samochód) IGORdeyka/Shutterstock.com, (pociąg w ruchu) Radu Bercan/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 94 (chłopak) Valua Vitaly/Shutterstock.com, (samochód) IGORdeyka/Shutterstock.com, (pociąg w ruchu) Radu Bercan/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 96 (kobieta z wózkiem) ostill/Shutterstock.com; s. 97 (piłka) Supertrooper/Shutterstock.com, (postać) jenjira/Shutterstock.com; s. 98 (wirówka przeciążeniowa) Laurent Hindryckx/MONDADORI FRANCE/BE&W; s. 99 (kosmiczna wirówka i Ziemia) Stocktrek Images/Getty Images; s. 101 (narciarz) Lukas Gojda/Shutterstock.com, (skrzynki) Aygul Sarvarova/Shutterstock.com, (mężczyzna) studioloce/Shutterstock.com; s. 102 (samochód z przyczepą) Skalapendra/Shutterstock.com; s. 103 (ścięgno Achillesa) SEBASTIAN KAULITZKI/SCIENCE PHOTO LIBRARY/Getty Images, (samochód na podjeździe) WDG Photo/Shutterstock.com, (samochód na równi) Maksim Toome/Shutterstock.com; s. 104 (samochód na równi) Maksim Toome/Shutterstock.com; s. 105 (samochodzik na wadze) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP, (wskazania wagi) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 106 (Tatry) matkocvi/Shutterstock.com; s. 107 (skoczek) Robert Kuehne/Shutterstock.com; s. 108–109 (niebo i chmury) art4all/Shutterstock.com, (Boeing 747 w locie) Fasttailwind/Shutterstock.com, (samolot – skrzydło i silniki) Nieuwland Photography/Shutterstock.com, (startujący samolot) StudioPorto-Sabbia/Shutterstock.com, (spojler na skrzydle) Josh Cornish/Shutterstock.com, (skręcający samolot) Katarzyna Wojewoda; s. 112 (dziewczyna na karuzeli) Anna-Tamila/Shutterstock.com, (kulka) 123dartist/Shutterstock.com; s. 115 (skok o tyczce) Andrey Burmakin/Shutterstock.com; s. 116 (elektrownia jądrowa) mandritoiu/Shutterstock.com; s. 117 (fajerwerki przed wystrzałem) ajt/Shutterstock.com, (pokaz fajerwerków) Beautiful landscape/Shutterstock.com; s. 119 (turbiny wiatrowe) xieyuliang/Shutterstock.com, (elektrownia wodna) Gary Saxe/Shutterstock.com, (ser) vitals/Shutterstock.com, (etykieta sera) Jarosław Kurowski/WSiP; s. 120 (wyświetlacz w samochodzie) Zulashai/Shutterstock.com; s. 121 (skuter wodny) Crok Photography/Shutterstock.com; s. 122 (czerwony kontener) cherezoff/Shutterstock.com, (złoty kontener) deng/Shutterstock.com; s. 123 (brązowy kontener) Aleksandr Petrunovskiy/Shutterstock.com, (pudło) Aygun Aliyeva/Shutterstock.com, (stół) Kittichai/Shutterstock.com; s. 124 (pileczka) Africa Studio/Shutterstock.com; s. 127 (samochód) ShineCrazy/Shutterstock.com, (zniszczenia po zejściu lawiny) IPP/REPORTER/East News; s. 128 (pileczka) Africa Studio/Shutterstock.com; s. 129 (samolot startujący z lotniskowca) MCSA Rachel N.Clayton/U.S. Navy; s. 130 (Mikrosatelita Heweliusz) Centrum Badań Kosmicznych, PAN; s. 131 (halon meteorologiczny) Gwennidig/Getty Images; s. 132–133 (kontenerowiec) Lior Patel/Alamy Stock Photo/BE&W, (kontenerowiec – widok z góry) Lior Patel/Alamy Stock Photo/BE&W, (ikonki transportowe) A-spring/Shutterstock.com, (licznik energii elektrycznej) www.flhome.pl, (Matterhorn) Vaclav P3k/Shutterstock.com; s. 134 (narciarze) Oprea George/Shutterstock.com, (wahadło) Grażyna Bryk/WSiP, (beton) siro46/Shutterstock.com; s. 135 (drzewo) Jan Martin Will/Shutterstock.com, (jabłko) Tim UR/Shutterstock.com; s. 136 (jabłko) Tim UR/Shutterstock.com; s. 137 (rowerzystka na rampie) Ivanova Ksenia/Shutterstock.com; s. 138 (balcon w Weronie) Stefano Ember/Shutterstock.com, (jabłko) Tim UR/Shutterstock.com; s. 139 (saneczkarz) Artur Didyk/Shutterstock.com; s. 140 (lucznik) Pius Lee/Shutterstock.com; s. 141 (kawalek betonu) Ammak/Shutterstock.com, (sprężynka) LovArt/Shutterstock.com, (deska) SK-photographer/Shutterstock.com; s. 142 (dziewczyna z gitarą) Studio KIWI/Shutterstock.com, (chłopak z wiolonczelą) Yuriy Golub/Shutterstock.com; s. 142 (kusza) art nick/Shutterstock.com; s. 145 (skok z trampoliny) UzFoto/Shutterstock.com, (skok na linie) Dimitrina Lavchieva/Shutterstock.com; s. 146 (skok wzwyż) Andrey Yurlov/Shutterstock.com, (biegacz sprinter) Martin Rickett – PA Images/Getty Images, (biegacz maratończyk) The Asahi Shimbun/Getty Images; s. 147 (biegacz) Maridav/Shutterstock.com; s. 148 (rzut oszczepem) StockphotoVideo/Shutterstock.com; s. 149 (skok w dal) Fuse/Corbis RF Stills/Getty Images, (skok o tyczce) EvrenKalinbacak/Shutterstock.com; s. 150 (skok o tyczce) CP DC Press/Shutterstock.com; s. 155 (wyciągarka) Camac, (siatkarz) LiveMedia/Shutterstock.com, (narciarz) Damian Klamka/East News; s. 157 (teleskop Hubble'a) NASA Hubble Space Telescope; s. 158 (Słońce), s. 158–159 (Układ Słoneczny) Jurgen Ziewe/Shutterstock.com; s. 160 (kometa Halleya) Richard Waincoat/Alamy Stock Photo/BE&W, (jądro komety) NASA/JPL-Caltech/UMD/Wikipedia [Public domain]; s. 161 (Układ Słoneczny, wizja artystyczna) Pat Rawlings/NASA/Wikipedia [Public domain]; s. 162 (meteoryt żelazny) Ludwik

Lehman, (meteoryt kamienny) Ludwik Lehman; s. 164 (człowiek spadający z drabiny) Carlos E. Santa Maria/Shutterstock.com, (Isaac Newton) Public domain; s. 165 (piłka do koszykówki) Joe Belanger/Shutterstock.com/Shutterstock.com, (piłka do tenisa) photokup/Shutterstock.com; s. 166 (Ziemia) Evstigneev Alexander/Shutterstock.com, (kwiat w doniczce) Sura Nualpradid/Shutterstock.com; s. 168 (Ziemia) pegasus012/Shutterstock.com, (Księżyc) del Monaco/Shutterstock.com; s. 170 (satelita) Andrey Armyagov/Shutterstock.com, (Ziemia) Matthew R. Radcliff/Goddard Space Flight Center/NASA; s. 171 (ISS) Nerthuz/Shutterstock.com; s. 172 (przełot ISS) East News, (Ziemia) Sailorr/Shutterstock.com; s. 174 (Ziemia) pegasus012/Shutterstock.com; s. 175 (rysowanie elipsy) Dorling Kindersley Ltd/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 177 (Jowisz) Vadim Sadovskiy/Shutterstock.com; s. 179 (pomiar położenia gwiazdy S2 – zrzut ekranu) European Southern Observatory [Licencja CC 4.0]; s. 181 (astronauta) Vadim Sadovskiy/Shutterstock.com, (Stephen Hawking) NASA/Science Photo Library/East News; s. 182 (samolot) SÁ;giE-lemÅ@r/Shutterstock.com; s. 183 (okno) mtlapcevic/Shutterstock.com, (manekin) Graphic Compressor/Shutterstock.com; s. 184 (manekin) Graphic Compressor/Shutterstock.com/Shutterstock.com, (pilot) NASA/SCIENCE PHOTO LIBRARY/East News; s. 185 (David Purley) Keystone/Hulton Archive/Getty Images; s. 186–177 (kosmonauta) M.Aurelius/Shutterstock.com, (Ziemia) Sailorr/Shutterstock.com, (ISS) Nerthuz/Shutterstock.com, (astronauta) NASA, (astronauta z kroplą wody) NASA, (trenujący astronauta) ESA/NASA; s. 189 (Droga Mleczna) jimmysoning/Shutterstock.com, (gwiazdy) Tomasz Mrozek; s. 190 (gwiazdozbiór Oriona) Mrozek Tomasz; s. 192 (Wielka Mgławica w Orionie) Mrozek Tomasz, (Droga Mleczna) Mrozek Tomasz, (Droga Mleczna, widoczne ramiona spiralne) R. Hurt/JPL/NASA/Wikipedia [Public domain]; s. 193 (Galaktyka M31) NASA images/Shutterstock.com/Shutterstock.com; s. 194 (gromada galaktyk) NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA); J. Blakeslee (Washington State University)/Wikipedia [Public domain]; s. 195 (teleskop Hubble'a) MarcelClemens/Shutterstock.com, (Edwin Hubble) Science History Images/Alamy Stock Photo/ BE&W; s. 197 (galaktyka Wir) age fotostock/East News, (galaktyka Wir, zdjęcie wykonane przez uczestnika programu HOU) Grzegorz Sęk; s. 199 (balony) Natalia Marszałek/WSiP, (ewolucja Wszechświata) Andrea Danti/Shutterstock.com; s. 204 (rollercoaster) blambca/Shutterstock.com; s. 211 (pudełko na stole) Grzegorz Wojewoda/ WSiP

Pozostałe ilustracje: MathMaster Studio

Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne oświadczają, że podjęły starania, mające na celu dotarcie do właścicieli i dysponentów praw autorskich wszystkich zamieszczonych utworów. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, przytaczając w celach dydaktycznych utwory lub fragmenty, postępują zgodnie z art. 27¹ ustawy o prawie autorskim. Jednocześnie Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne oświadczają, że są jedynym podmiotem właściwym do kontaktu autorów tych utworów lub innych podmiotów uprawnionych w wypadkach, w których twórcy przysługuje prawo do wynagrodzenia.

FIZYKA

ZAKRES PODSTAWOWY

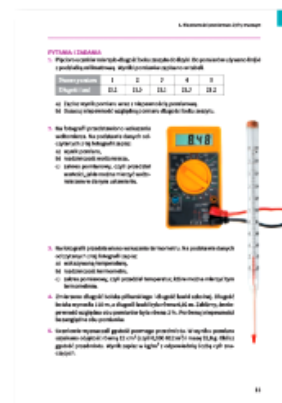
NOWA EDYCJA PODRĘCZNIK • LICEUM I TECHNIKUM



Proste **doświadczenia** i rozwiązane **przykłady** pomagają w samodzielnej nauce.



Powtórzenia działów w formie skeczników wspierają utrwalanie wiadomości.



Pytania i zadania pomagają wyćwiczyć umiejętności wymagane przez podstawę programową.

Zeskanuj kod



Aktywuj E-book
(cyfrowe odwziewierdlenie podręcznika) na
EDURANGA



wsip.pl
sklep.wsip.pl
infolinia: 801 220 555

