

Fizyka



1

Podręcznik dla
szkoły branżowej I stopnia

WOPERON
Wydawnictwo z pasją

Fizyka

Podręcznik dla
szkoły branżowej I stopnia

dla

absolwentów ośmioletniej szkoły podstawowej

1

Grzegorz Kornaś

 **OPERON**
Edukacja jest podróżą

2023

Projekt okładki: Paweł Kwacz
Redaktor prowadzący: Jarosław Dworowski
Redakcja językowa: Monika Turata
Redakcja graficzna i skład: Maciej Laska
Fotoedycja: Marta Jasińska, Agata Kańtoch
Korekta: Katarzyna Kupracz

Zdjęcia:

N509FZ/Wikipedia/CC BY-SA 4.0, Siemens Pressebild/Wikipedia/CC BY-SA 3.0,
Image credit: Illustration: Springel et al. (2005); Spectrum: NASA/CXC/CfA/Kovács
et al, NASA/Ames, NASA/Kim Shiflett, policja.pl

Operon Sp. z o.o. oświadcza, że z należytą starannością podjęło wszelkie działania zmierzające do powiadomienia podmiotów majątkowych praw autorskich do utworów słownych i fotograficznych wykorzystanych w podręczniku o zamiarze ich publikacji celem uzyskania od twórców lub ich następców prawnych wymaganej zgody za przysługującym wynagrodzeniem w stosownej wysokości. Osoby, których prawa w sposób niezawiniony przez wydawnictwo zostały naruszone, prosimy o bezpośredni kontakt z wydawcą.

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 III etapie edukacyjnym – szkoła branżowa I stopnia dla uczniów będących absolwentami ośmioletniej szkoły podstawowej, na podstawie opinii rzeczoznawców: dr. Stanisława Jakubowicza, mgr Teresy Kutajczyk, dr. Wojciecha Kaliszewskiego.

Etap edukacyjny: III

Typ szkoły: Szkoła branżowa I stopnia

Rok dopuszczenia: 2020

Numer dopuszczenia: 1086/1/2020

© Copyright by OPERON Sp. z o.o. & Grzegorz Kornaś

Gdynia 2019

Wszelkie prawa zastrzeżone. Kopiowanie w całości lub we fragmentach bez zgody wydawcy zabronione.

N6930

Wydawca:

OPERON Sp. z o.o.

81-212 Gdynia, ul. Hutnicza 3

tel. centrali 58 679 00 00

e-mail: info@operon.pl

www.operon.pl

ISBN 978-83-7879-874-3

Zgodnie z decyzją MEN od września 2024 r. obowiązuje zmieniona, uszczuplona o ok. 20% podstawa programowa. W związku z tym w podręczniku znalazły się stosowne oznaczenia.



Takim symbolem
oznaczono treści
usunięte z podstawy
programowej.



Takim symbolem oznaczono treści,
które zostały zmienione. Nauczyciel
przedstawi uczniowi zmiany
i wyjaśni, czego powinien się nauczyć.

Spis treści

Wstęp.....	4
------------	---

I. Podstawy fizyki

1.1. O fizyce	8
1.2. Wielkości fizyczne i ich jednostki.....	11
1.3. Prawa fizyczne i wykresy	16
1.4. Wektory	19
1.5. Niepewności pomiarowe.....	23

II. Kinematyka

2.1. Ruch i wielkości go opisujące	28
2.2. Ruch prostoliniowy jednostajny.....	33
2.3. Ruch prostoliniowy jednostajnie przyspieszony.....	37
2.4. Ruch prostoliniowy jednostajnie opóźniony	43
2.5. Ruch jednostajny po okręgu	50

III. Dynamika

3.1. Podstawowe pojęcia dynamiki. I zasada dynamiki.....	54
3.2. Druga i trzecia zasada dynamiki	58
3.3. Siły tarcia i siły oporu ośrodka	64
3.4. Siły bezwładności	68
3.5. Siły w ruchu po okręgu	75

IV. Praca, moc i energia

4.1. Praca i moc.....	80
4.2. Energia potencjalna.....	84
4.3. Energia kinetyczna. Zasada zachowania energii	87
4.4. Maszyny proste	92
4.5. Badanie warunków równowagi dźwigni.....	100

V. Grawitacja i elementy astronomii

5.1. Prawo powszechnego ciążenia.....	104
5.2. Stan nieważkości	108
5.3. Budowa Układu Słonecznego	114
5.4. Gwiazdy i galaktyki	122

Moduł fakultatywny A

A.1. Eksploracja Kosmosu	130
A.2. Narzędzia obserwacyjne w astronomii	135
A.3. Elementy kosmologii.....	139

Moduł fakultatywny B – część 1

B.1. Ruchy ciał z uwzględnieniem oporów ośrodka	152
B.2. Mechanika cieczy i gazów	156

Odpowiedzi do wybranych zadań	168
-------------------------------------	-----

Indeks.....	171
-------------	-----

1.1. O fizyce

Fizyka jest nauką zajmującą się badaniem podstawowych właściwości materii i zjawisk w niej zachodzących, a także odkrywaniem i poznawaniem praw przyrody, którym te zjawiska podlegają. Interesuje się też poszukiwaniem wzajemnych związków między wielkościami opisującymi dane zjawisko lub obiekt.

Przedmiotem zainteresowania fizyki są **zjawiska fizyczne**, czyli wszelkie zmiany w otoczeniu, które można w jakikolwiek sposób zaobserwować – czy to bezpośrednio za pomocą naszych zmysłów (np. ruch ciała, topnienie lodu, zaćmienie Księżyca), czy też za pomocą specjalnych przyrządów (np. przepływ prądu, rozchodzenie się fal elektromagnetycznych). Wszystkie otaczające nas przedmioty i istoty żywe to **ciała fizyczne**.

Fizyka nie zajmuje się zagadnieniami wychodzącymi poza ramy sprawdzalności doświadczalnej, np. astrologią czy radiestezją.

Fizyka jest najbardziej ścisłą spośród nauk przyrodniczych. Zawdzięcza to swej metodzie badawczej opartej na matematyce, która służy jej do opisu zjawisk. Zasadniczą rolę w badaniach przyrody odgrywają: opis ilościowy, doświadczenia oraz modele obiektów i zjawisk. U źródeł każdej wiedzy o przyrodzie leży **obserwacja** zjawisk polegająca na rejestracji faktów zachodzących spontanicznie, bez ingerencji człowieka.

Fizycy nie zadowolają się samą obserwacją, lecz szukają sposobu jej opisu za pomocą liczb i wzorów. Poszukują czynników, które dają się zmierzyć i mogą być użyte do ilościowego opisu wyników obserwacji. Dzięki temu staje się on obiektywny i obserwacje różnych badaczy mogą być porównywane. Wszystkie dające się zmierzyć cechy ciał i zjawisk nazywane są **wielkościami fizycznymi**.

Podstawową cechą opisywanych przez fizykę zjawisk jest ich weryfikowalność doświadczalna – zjawiska te muszą dać się potwierdzić w doświadczeniach. **Doświadczenie fizyczne (eksperyment)** to sztuczne wywołanie zjawiska, w ściśle określonych warunkach, dające możliwość wielokrotnego przeprowadzania obserwacji i pomiarów interesujących nas wielkości fizycznych.

Pomiarem nazywamy porównanie mierzonej wielkości fizycznej z pewnym wzorcem. Wzorce te nazywane są **jednostkami fizycznymi**. Do przeprowadzenia pomiarów potrzebne są **przyrządy pomiarowe**. Niektóre są całkiem proste, np. linijka do pomiaru długości, a inne bardzo skomplikowane, np. spektrometr masowy do wyznaczania masy niektórych cząstek.



Rys. 1.1. Zaćmienie Księżyca jest zjawiskiem fizycznym, a Księżyc – ciałem fizycznym.

Żaden pomiar nie pozwala na uzyskanie idealnie dokładnego wyniku. Każdy wynik jest obarczony pewną niedokładnością, która nosi nazwę **niepewności pomiarowej**.

Wykonując doświadczenia, fizycy zawsze starają się wykryć wszystkie czynniki, które mają wpływ na wyniki pomiarów. Następnie dokonują ich podziału na czynniki istotne, których wpływ na wyniki ma charakter powtarzalny, oraz czynniki uboczne, których wpływ jest nieznaczny lub ma charakter przypadkowy. Ustalenia, które czynniki są istotne, a które uboczne, pozwalają budować modele obiektów i zjawisk fizycznych. **Model fizyczny** jest to wyidealizowany, uproszczony obraz rzeczywistego obiektu lub zjawiska fizycznego, zachowujący jego istotne cechy, a pozbawiony innych, drugorzędnych. Każdy model fizyczny ma ograniczony zakres stosowalności.

Przez porównanie modeli z rzeczywistością znajduje się regularności, które zapisuje się jako związki pomiędzy wielkościami fizycznymi występującymi w danym zjawisku lub zespole zjawisk. Najbardziej uniwersalne regularności są nazywane **prawami fizycznymi** (np. prawo Ohma). Prawa fizyczne odnoszące się do wszystkich zjawisk w przyrodzie nazywa się **zasadami fizycznymi** (np. zasady dynamiki). Prawa i zasady fizyczne wykorzystywane są w codziennej aktywności człowieka, także tej zawodowej.

Znajomość podstawowych praw fizycznych, opisujących dokładnie proste, rzeczywiste zjawiska, pozwala naukowcom na formułowanie wniosków dotyczących przebiegu bardziej złożonych zjawisk. Dopóki wnioski takie nie zostaną wielokrotnie sprawdzone i potwierdzone doświadczalnie przez różnych badaczy, są nazywane **hipotezami**. Dopiero po wszechstronnym, doświadczalnym potwierdzeniu hipotezy stają się **teoriami fizycznymi**.

Głównym zadaniem fizyki nie jest opisanie całej złożoności materii, lecz wyjaśnienie jej budowy i podstawowych zasad rządzących jej zachowaniem. W związku z tym charakterystyczne dla tej nauki jest dążenie do upraszczania. Każdy złożony proces fizycy starają się podzielić na ciąg prostszych zdarzeń i ustalić związki przyczynowo-skutkowe pomiędzy nimi. Wyznają bowiem zasadę, że niecelowe są próby zrozumienia złożonych zjawisk, gdy nie rozumie się najprostszych. Dlatego naukowcy skupiają uwagę na zasadniczych pojęciach, takich jak ruch, energia, fale, atomy i cząstki elementarne, oraz zajmują się najbardziej podstawowymi prawami przyrody. Starają się przy tym, aby liczba praw podstawowych, wyjaśniających wszystkie znane fakty doświadczalne, była jak najmniejsza.

Fizyka jest podstawą nauk technicznych, dlatego zajmuje ważne miejsce w programach nauczania dla szkół zawodowych. Inne wiadomości są potrzebne inżynierowi lub technikowi o specjalności mechanicznej, inne komuś ze specjalnością elektryczną, a jeszcze inne specja-



Rys. 1.2. Pomiar temperatury pieczonego mięsa za pomocą przyrządu pomiarowego – termometru.

liście w zakresie budownictwa. Zagadnienia z fizyki omawiane są więc również na zajęciach z przedmiotów zawodowych: mechaniki, elektrotechniki, materiałoznawstwa i innych. Jednak każdemu, niezależnie od wybranego zawodu, potrzebna jest nauka fizyki jako osobnego przedmiotu. Warto bowiem poznać sposób myślenia fizyków, gdyż może on być z powodzeniem wykorzystany w pracy w różnych gałęziach przemysłu i techniki.

Ważnym elementem programu nauczania fizyki w szkole ponadpodstawowej jest rozwiązywanie zadań. Warto poświęcić trochę czasu po każdej lekcji, aby przeanalizować zadania omawiane w szkole lub przykłady z podręcznika. Potem przystępujemy do samodzielnego rozwiązywania kolejnych zadań. Dzięki temu kształtujemy logiczne myślenie. Umiejętność ta będzie przydatna w dorosłym życiu – nie tylko w pracy zawodowej, lecz także w życiu prywatnym.

Jeśli rozwiązywanie zadań z fizyki sprawia ci trudności, postaraj się postępować zgodnie z podanymi wskazówkami:

- a) przeczytaj uważnie treść zadania i zwróć uwagę na to, o jakich zjawiskach fizycznych jest mowa;
- b) wypisz wszystkie wielkości dane i szukane;
- c) zrób prosty, schematyczny rysunek i zaznacz na nim wspomniane wielkości – pozwala to znaleźć związki między nimi i łatwiej zrozumieć zadanie;
- d) wypisz wzory, w których występują wielkości dane i szukane;
- e) łącząc i przekształcając wzory, wyprowadź wzór końcowy, w którym po lewej stronie będzie tylko niewiadoma, a po prawej – jedynie znane wielkości;
- f) zanim podstawisz dane do wzoru końcowego, zwróć uwagę na jednostki – często trzeba je przeliczyć na jednostki główne układu SI (rozdział 1.2.);
- g) po ewentualnym przeliczeniu jednostek podstaw dane do wzoru końcowego łącznie z jednostkami;
- h) na koniec wykonaj obliczenia; w przypadku bardzo dużych lub bardzo małych liczb wykorzystaj zapis potęgowy. Zwróć uwagę, czy otrzymany wynik ma sens, i podaj odpowiedź do zadania.



PYTANIA I ZADANIA

1. Czym jest spadanie ciał – wielkością fizyczną, zjawiskiem czy prawem fizycznym?
2. Czym jest czas – wielkością fizyczną, zjawiskiem czy prawem fizycznym?
3. Jak sądzisz, które działy fizyki są najpotrzebniejsze z punktu widzenia twojego przyszłego zawodu? Uzasadnij swoją odpowiedź.

1.2. Wielkości fizyczne i ich jednostki

Wielkości fizyczne są to cechy ciał (np. masa, objętość) lub zjawisk (np. przyspieszenie, natężenie prądu), które można w jakikolwiek sposób zmierzyć. Są one potrzebne do opisu zjawisk fizycznych. Nie wszystkie cechy ciał można zmierzyć, np. zapach i smak nie są wielkościami fizycznymi.

Każda wielkość fizyczna ma swój symbol literowy oraz jednostkę. Wielkości fizycznych jest dużo więcej niż liter alfabetu, dlatego – aby każda wielkość miała swój własny symbol – do ich oznaczenia oprócz liter alfabetu łacińskiego stosuje się niektóre litery alfabetu greckiego.

Tabela 1.1. Wybrane litery alfabetu greckiego

α	– alfa	η	– eta	ρ	– ro
β	– beta	λ	– lambda	Σ	– sigma
γ	– gamma	μ	– mi	ϕ, Φ	– fi
δ, Δ	– delta	π, Π	– pi	ω, Ω	– omega

Mimo stosowania dwóch alfabetów, zdarza się, że niektóre wielkości są oznaczone tą samą literą. Na przykład Q może oznaczać ciężar ciała, ciepło lub ładunek elektryczny, a T – okres ruchu lub temperaturę ciała.

Pomiar wielkości fizycznych pociąga za sobą konieczność ustalenia jednostek miar. Utworzenie odmiennych układów jednostek i stosowanie różnych jednostek dla tej samej wielkości (np. dla ciśnienia: paskal, atmosfera, milimetr słupa rtęci) stwarzało wiele trudności z ich porównywaniem i wymagało żmudnych przeliczeń. Dlatego na całym świecie dąży się do wprowadzenia jednego układu – jest nim **międzynarodowy układ jednostek SI** (fr. *Système international d'unités*). Każda wielkość fizyczna ma swoją jednostkę pochodzącą z układu SI.

Wielkości fizyczne i ich jednostki można podzielić na dwie grupy: podstawowe i pochodne.

Wielkości i jednostki podstawowe

Wielkości podstawowe to wielkości, które nie wymagają określenia za pomocą innych wielkości fizycznych (np. długość l , masa m , czas t).

Jednostki podstawowe to jednostki wielkości niezależnych od siebie, wybranych jako podstawa danego układu jednostek. Precyzyjnie określa się ich wzorce.

W układzie SI przyjęto siedem jednostek podstawowych. W tabeli 1.2 przedstawiono tylko te, które poznasz w trakcie nauki fizyki.

Tabela 1.2. Podstawowe jednostki miar w układzie SI.

Wielkość fizyczna		Jednostka miary	
nazwa	oznaczenie	nazwa	symbol
długość	l	metr	m
masa	m	kilogram	kg
czas	t	sekunda	s
natężenie prądu elektrycznego	I	amper	A
temperatura	T	kelwin	K

Wielkości i jednostki pochodne

Wielkości pochodne to wielkości, które wprowadza się przez podanie ich definicji. Mogą być zdefiniowane za pomocą wielkości podstawowych (np. prędkość v) albo wielkości wcześniej zdefiniowanych (np. przyspieszenie a). **Definicja wielkości fizycznej** to umowny związek między znanymi wielkościami fizycznymi wprowadzający nową wielkość fizyczną. Definicja może być wyrażona zarówno wzorem, jak i formułą słowną. Wzory definicyjne można wyróżnić, pisząc skrót „def” nad znakiem równania. Znajomość wzorów definicyjnych (i oznaczeń występujących w nich symboli), niezbędna do rozwiązywania zadań, ułatwia też układanie definicji słownych. Nie trzeba uczyć się ich na pamięć, wystarczy zapamiętać kilka ogólnych wskazówek.

Aby ułożyć słowną definicję na podstawie wzoru definicyjnego, w miejsce liter podstaw nazwy wielkości fizycznych. Zwróć uwagę na działanie występujące po prawej stronie wzoru i wykorzystaj słowo oznaczające wynik tego działania (iloraz lub stosunek, iloczyn, suma, różnica).

Tabela 1.3. Tworzenie słownych definicji wielkości pochodnych za pomocą wzoru definicyjnego

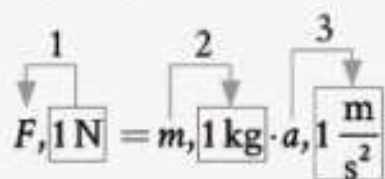
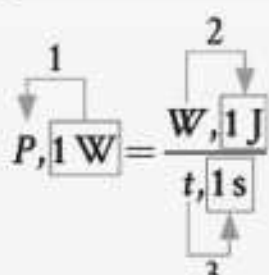
Wzór definicyjny	Oznaczenia	Definicja słowna
$a \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Delta v}{\Delta t}$	a – przyspieszenie Δv – przyrost prędkości Δt – czas	Przyspieszenie jest to stosunek przyrostu prędkości do czasu, w którym ten przyrost nastąpił.
$p \stackrel{\text{def}}{=} mv$	p – pęd ciała m – masa v – prędkość	Pędem ciała nazywamy iloczyn masy i prędkości ciała.
$\Delta v \stackrel{\text{def}}{=} v - v_0$	Δv – przyrost prędkości v – prędkość końcowa v_0 – prędkość początkowa	Przyrost prędkości jest to różnica prędkości końcowej i prędkości początkowej.
$E \stackrel{\text{def}}{=} E_k + E_p$	E – całkowita energia mechaniczna E_k – energia kinetyczna E_p – energia potencjalna	Całkowita energia mechaniczna jest to suma energii kinetycznej i energii potencjalnej.

Symbol Δ (grecka litera delta) oznacza przyrost (różnicę) wielkości fizycznych.

Jednostki pochodne są to jednostki, które definiuje się za pomocą jednostek podstawowych (np. niuton: $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$) lub jednostek wcześniej zdefiniowanych (np. dżul: $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$).

Definicję jednostki pochodnej dla określonej wielkości fizycznej można łatwo ułożyć, wykorzystując wzór definicyjny tej wielkości. W tym celu każdej wielkości występującej we wzorze trzeba przypisać jej jednostkę, a następnie wymienić wszystkie wielkości łącznie z ich jednostkami.

Tabela 1.4. Tworzenie słownych definicji jednostek pochodnych za pomocą wzoru – strzałki i cyfry (1, 2, 3) pokazują kolejne etapy tworzenia definicji

Wzór	Symbole wielkości fizycznych i ich jednostek	Połączenie wielkości fizycznych i jednostek
Sila, której jednostką jest niuton (N) $F = m \cdot a$ $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	F, N – siła m, kg – masa $a, \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ – przyspieszenie	 Jeden niuton jest to siła, która działając na ciało o masie jednego kilograma, nadaje mu przyspieszenie jeden metr na sekundę do kwadratu.
Praca, której jednostką jest dżul (J) $W = F \cdot s$ $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$	W, J – praca F, N – siła s, m – droga	 Jeden dżul jest to praca wykonana przez siłę jednego niutona na drodze jednego metra.
Moc, której jednostką jest wat (W) $P = \frac{W}{t}$ $1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}}$	P, W – moc W, J – praca t, s – czas	 Jeden wat jest to moc urządzenia, które wykonuje pracę jednego dżula w czasie jednej sekundy.

Każdą jednostkę pochodną można wyrazić za pomocą jednostek podstawowych układu SI, korzystając kolejno z definicji pojawiających się jednostek.

Przykład 1

Korzystając z definicji przedstawionych w tabeli 1.4., jednostkę mocy – wat – rozpisz na jednostki podstawowe układu SI.

Rozwiązanie:

$$\text{W} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$$

Jednostki główne, wielokrotne i podwielokrotne

Jednostki podstawowe i pochodne stanowią **jednostki główne**. Układ SI dopuszcza stosowanie jednostek 10, 100, 1000, ... itd. razy większych od jednostek głównych – są to **jednostki wielokrotne**, oraz jednostek 10, 100, 1000, ... itd. razy mniejszych – są to **jednostki podwielokrotne**. Jednostki wielokrotne i podwielokrotne tworzymy, dodając do nazwy jednostki głównej właściwy przedrostek określający odpowiednią potęgę dziesięciu, która jest mnożnikiem dla jednostki. Wyjątkiem są jednostki masy – dla nich przedrostki dodaje się do jednostki „gram”.

Tabela 1.5. Przedrostki do wielokrotności i podwielokrotności jednostek

Przedrostek	Oznaczenie przedrostka	Mnożnik
tera-	T	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$
giga-	G	$10^9 = 1\,000\,000\,000$ (miliard)
mega-	M	$10^6 = 1\,000\,000$ (milion)
kilo-	k	$10^3 = 1000$ (tysiąc)
hekto-	h	$10^2 = 100$
deka-	da	$10^1 = 10$
jednostka	–	$10^0 = 1$
decy-	d	$10^{-1} = 1/10$
centy-	c	$10^{-2} = 1/100$
mili-	m	$10^{-3} = 1/1000$ (jedna tysięczna)
mikro-	μ	$10^{-6} = 1/1\,000\,000$ (jedna milionowa)
nano-	n	$10^{-9} = 1/1\,000\,000\,000$ (jedna miliardowa)
piko-	p	$10^{-12} = 1/1\,000\,000\,000\,000$

Jednostki wielokrotne i podwielokrotne zamieniamy na jednostki główne układu SI, wykorzystując mnożnik z powyższej tabeli. Na przykład:

1 kilometr (1 km = 10^3 m)

1 nanometr (1 nm = 10^{-9} m)

1 pikofarad (pF = 10^{-12} F)

1 gigawat (1 GW = 10^9 W)

1 dekagram (1 dag = 10 g)

Przykład 2

W jednym z zadań podano, że pole powierzchni tłoka wynosi $S = 20\text{ cm}^2$. Wyrażmy tę powierzchnię w metrach kwadratowych.

Rozwiązanie:

Aby przeliczyć centymetry kwadratowe na metry kwadratowe, wypisujemy najpierw związek między jednostkami długości (zgodnie z tabelą przedrostków): $1\text{ cm} = 10^{-2}\text{ m}$,

następnie obie strony otrzymanego równania, łącznie z jednostkami, podnosimy do kwadratu: $(1 \text{ cm})^2 = (10^{-2} \text{ m})^2$.

Otrzymujemy szukany związek: $1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$.

Podane pole powierzchni wynosi więc: $S = 20 \text{ cm}^2 = 20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

Przykład 3

Objętość wody w naczyniu wynosi 25 litrów. Wyrażmy tę objętość w metrach sześciennych.

Rozwiązanie:

Jeden litr to inaczej jeden decymetr sześcienny.

Decymetr sześcienny zamieniamy na metr sześcienny. W tym celu wypisujemy związek między jednostkami długości (zgodnie z tabelą przedrostków): $1 \text{ dm} = 10^{-1} \text{ m}$. Obie strony otrzymanego równania, łącznie z jednostkami, podnosimy teraz do potęgi trzeciej: $(1 \text{ dm})^3 = (10^{-1} \text{ m})^3$ i otrzymujemy szukany związek: $1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$.

Objętość wody wynosi więc: $V = 25 \text{ l} = 25 \text{ dm}^3 = 25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$.

Przykład 4

Gęstość substancji wynoszącą $\rho = 0,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ przeliczymy tak, aby była wyrażona w jednostkach podstawowych układu SI.

Rozwiązanie:

Podstawową jednostką masy nie jest gram, tylko kilogram, korzystamy więc ze związku:

$$1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg}.$$

Jednostkę objętości cm^3 (tak jak w przykładzie 3) zamieniamy na metry sześciennie:

$$1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$$

$$(1 \text{ cm})^3 = (10^{-2} \text{ m})^3$$

$$1 \text{ cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

Gęstość substancji wynosi więc:

$$\rho = 0,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0,5 \frac{10^{-3} \text{ kg}}{10^{-6} \text{ m}^3} = 0,5 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

PYTANIA I ZADANIA

1. Spośród przedstawionych poniżej zestawów jednostek wybierz ten, który zawiera tylko podstawowe jednostki układu SI.
A. niuton, kilogram, godzina
B. litr, gram, godzina
C. metr, kilogram, sekunda
D. centymetr, gram, sekunda
2. Za pomocą wzoru: $\rho = \frac{m}{V}$, gdzie ρ oznacza gęstość, m – masę, a V – objętość, podaj słowną definicję gęstości.
3. Na podstawie wzoru: $p = \frac{F}{S}$, gdzie p oznacza ciśnienie (którego jednostką jest paskal, Pa), F – siłę (której jednostką jest niuton, N), a S – pole powierzchni (mierzone w metrach kwadratowych, m^2) podaj słowną definicję jednostki paskal oraz rozpisz ją na jednostki podstawowe układu SI.

4. Pole powierzchni poprzecznego przekroju przewodnika wynosi $S = 0,5 \text{ mm}^2$. Przelicz tę powierzchnię tak, aby była wyrażona w metrach kwadratowych.
5. Objętość gazu w naczyniu wynosi $V = 3,75 \text{ cm}^3$. Przelicz tę objętość tak, aby była wyrażona w metrach sześciennych.
6. Prędkość samochodu wynoszącą $v = 72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ wyraż w jednostkach podstawowych układu SI.
7. Gęstość substancji wyrażoną w miligramach na decymetr sześcienny: $\rho = 25 \frac{\text{mg}}{\text{dm}^3}$ przelicz tak, aby była wyrażona w jednostkach podstawowych układu SI.

1.3. Prawa fizyczne i wykresy

Badanie zjawiska fizycznego polega na umiejętności opisu jego przebiegu oraz na stwierdzeniu, która z wielkości fizycznych jest wielkością zmienną, od jakich wielkości zależy i jaka to zależność. Najważniejsze zależności między wielkościami fizycznymi są nazywane **prawami fizycznymi**. Można je wyrazić zarówno wzorem, jak i regułą słowną. Treść reguły można przeczytać również na podstawie wzoru, lecz stosuje się przy tym inne sformułowania niż przy definicjach. Aby na podstawie wzoru w postaci ułamka odczytać zależności występujące między różnymi wielkościami, stosuje się zwroty „wprost proporcjonalne” w stosunku do wielkości występujących w liczniku i „odwrotnie proporcjonalne” w stosunku do wielkości występujących w mianowniku.

Okienko matematyczne

Dwie wielkości są do siebie wprost proporcjonalne, gdy wzrost jednej z nich powoduje taki sam wzrost drugiej (ile razy wzrośnie jedna wielkość, tyle razy wzrośnie druga). Dwie wielkości są do siebie odwrotnie proporcjonalne gdy wzrost jednej z nich powoduje odpowiednie zmniejszenie drugiej (ile razy wzrośnie jedna wielkość, tyle razy zmaleje druga). Fakt, że jakaś wielkość się nie zmienia, zapisujemy słowem *constans*, stosując skrót: *const*.

Tabela 1.6. Podawanie związków między wielkościami fizycznymi

Wzór	Oznaczenia	Związek
II zasada dynamiki $a = \frac{F_w}{m}$	a – przyspieszenie ciała F_w – siła wypadkowa m – masa ciała	Przyspieszenie, z jakim porusza się ciało pod działaniem siły wypadkowej, jest wprost proporcjonalne do wartości tej siły. Zależność tę można również zapisać, posługując się symbolem proporcjonalności: $a \sim F_w$.
Prawo powszechnego ciążenia $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$	F – siła grawitacji G – stała grawitacji ($G = \text{const}$) m_1, m_2 – masy ciał r – odległość między środkami ciał	Siła grawitacji jest wprost proporcjonalna do iloczynu mas przyciągających się ciał ($F \sim m_1 \cdot m_2$) i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między ich środkami (co można zapisać: $F \sim \frac{1}{r^2}$).

Rysowanie wykresów

Na podstawie wzoru podającego zależność między wielkościami fizycznymi można narysować ilustrujący ją wykres. Patrząc na wzór, trzeba ustalić, jaką funkcją matematyczną określony jest związek między wielkościami zmiennymi (czy jest to funkcja stała, rosnąca czy malejąca, liniowa czy kwadratowa itp.). Wielkość po lewej stronie wzoru odpowiada zmiennej y , po prawej stronie jest druga zmienna x (jest nią najczęściej czas) – trzeba ją odszukać. Wszystkie pozostałe wielkości traktujemy jako stałe współczynniki. Znając kształt wykresów typowych funkcji matematycznych, na podstawie wzoru można narysować większość wykresów.

Przykład 1

Narysujmy wykres zależności prędkości od czasu $v(t)$ w ruchu jednostajnie przyspieszonym. Na osi pionowej musi być zaznaczona prędkość v , a na osi poziomej czas t – **nie może być odwrotnie**. W tym przypadku chodzi nam jedynie o kształt wykresu, dlatego na osiach nie zaznaczamy wartości liczbowych. Korzystamy ze wzoru podającego związek pomiędzy prędkością i czasem w ruchu jednostajnie przyspieszonym:

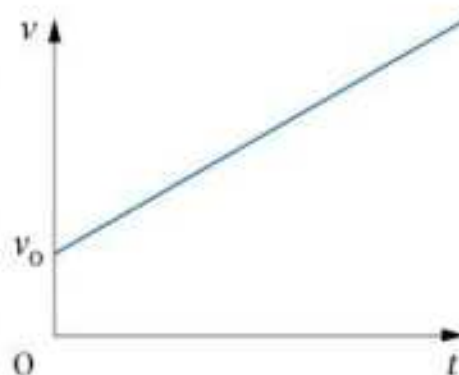
$$v = v_0 + a \cdot t$$

Prędkość v po lewej stronie wzoru pełni funkcję zmiennej y (zaznaczonej na osi pionowej), a czas t po drugiej stronie wzoru traktujemy jako zmienną x (czas t jest zawsze zmienną). Pozostałe wielkości: prędkość początkowa v_0 i przyspieszenie a , odpowiadają stałym współczynnikom b i c . Zależność $v(t)$ jest więc funkcją liniową typu:

$$y = b + c \cdot x$$

Z matematyki wiemy, że wykresem funkcji liniowej jest prosta nachylona pod kątem α do osi poziomej i przechodząca przez punkt o współrzędnej b na osi pionowej. Zatem na wykresie zależności $v(t)$ w ruchu jednostajnie przyspieszonym będzie taka sama prosta.

Rys. 1.3. Wykres zależności prędkości od czasu w ruchu jednostajnie przyspieszonym.



Chcesz wiedzieć więcej?

Przykład 2

Narysujmy wykres zależności drogi od czasu $s(t)$ w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej. Na osi pionowej zaznaczamy drogę s , a na osi poziomej czas t . Korzystamy ze wzoru podającego związek pomiędzy drogą i czasem w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej:

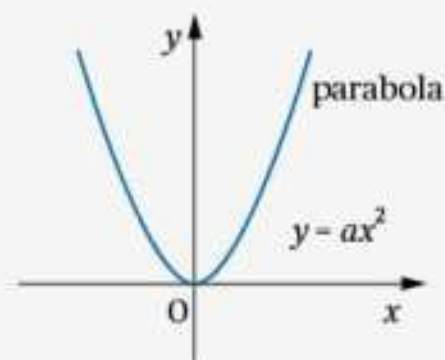
$$s = \frac{at^2}{2}$$

Droga s po lewej stronie wzoru pełni funkcję zmiennej y , a czas t po drugiej stronie wzoru traktujemy jako zmienną x . Przyspieszenie a odgrywa rolę stałego współczynnika, ponieważ w ruchu jednostajnie przyspieszonym jest stałe. Zależność drogi od czasu jest funkcją kwadratową typu:

$$y = b \cdot x^2 \quad (\text{gdzie: } y = s, x = t, \frac{a}{2} = b)$$

Okienko matematyczne

Wykresem funkcji kwadratowej $y = b \cdot x^2$ jest parabola ustawiona ramionami do góry i przechodząca przez początek układu współrzędnych.

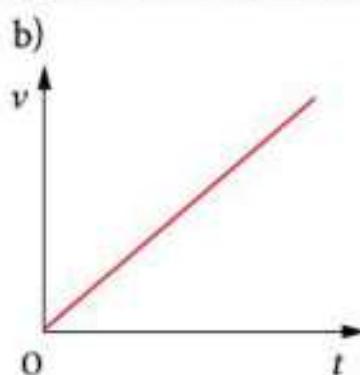
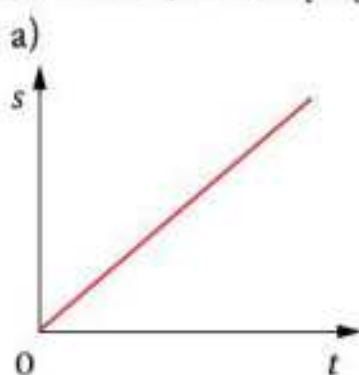


Rys. 1.4. Wykres funkcji kwadratowej typu: $y = b \cdot x^2$.

Na wykresie $s(t)$ ruch jednostajnie przyspieszony jest przedstawiany za pomocą paraboli, ale sens fizyczny ma tylko jej dodatnia część, gdyż nie ma ujemnego czasu.

Zapamiętaj

Należy zwracać uwagę na oznaczenia na osiach wykresów: niektóre wykresy mają taki sam kształt, a różnią się tylko oznaczeniami na osiach.



Rys. 1.5. a) Wykres zależności drogi od czasu w ruchu jednostajnym. b) Wykres zależności prędkości od czasu w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej.

PYTANIA I ZADANIA

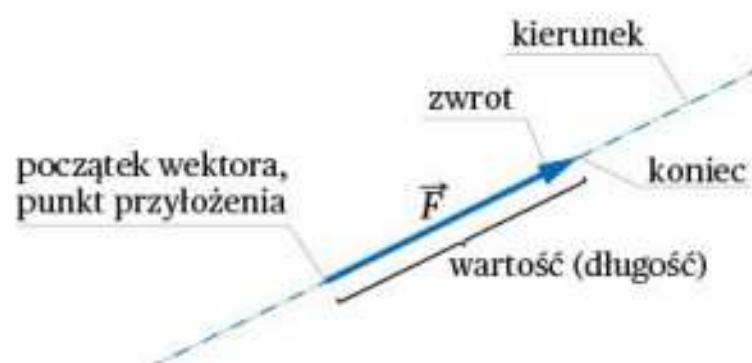
1. Jaki jest związek między wielkościami fizycznymi występującymi we wzorze: $R = \rho \frac{l}{S}$, gdzie R oznacza opór elektryczny przewodnika, l – jego długość, a S – pole powierzchni poprzecznego przekroju? Litera ρ oznacza stały współczynnik zależny od rodzaju metalu.
- 2*. O czterech wielkościach x , y , u , z przyjmujących wartości dodatnie wiadomo, że:
 - x jest proporcjonalne do z , a współczynnikiem proporcjonalności jest y ,
 - u równa się różnicy między iloczynem x i z a połową iloczynu y i kwadratu z .Jeśli x i y są dane, to u równa się:
A. $\frac{x^2}{2y}$ B. $\frac{x}{2y^2}$ C. $\frac{x^2 y^2}{2}$ D. $x - \frac{y^2}{2}$
3. Na podstawie wzoru $v = v_0 - a \cdot t$ narysuj w zeszycie wykres zależności $v(t)$ w ruchu jednostajnie opóźnionym.

1.4. Wektory

Jak już wiemy, wielkości fizyczne można podzielić na podstawowe i pochodne. Według innego, zupełnie niezależnego podziału rozróżniamy wielkości skalarne i wielkości wektorowe.

Wielkości skalarne to wielkości, które mają tylko jedną cechę – wartość (dużą lub małą). Wielkościami skalarnymi są np. droga s , masa m , czas t , temperatura T . **Wielkości wektorowe** to wielkości, które mają cztery cechy wektora: wartość, kierunek (np. poziomy), zwrot (np. w prawo) i punkt przyłożenia. Wielkości wektorowe wyróżniamy literą zaopatrzoną w strzałkę (np. prędkość $\vec{v}$, przyspieszenie $\vec{a}$, siła $\vec{F}$).

Wielkości wektorowe można przedstawić na rysunkach za pomocą wektora.



Rys. 1.6. Wektor.

1. **Wartość wektora** (może być duża lub mała) jest uwzględniona na rysunkach jako długość wektora. Wartość wektora nie może być ujemna.

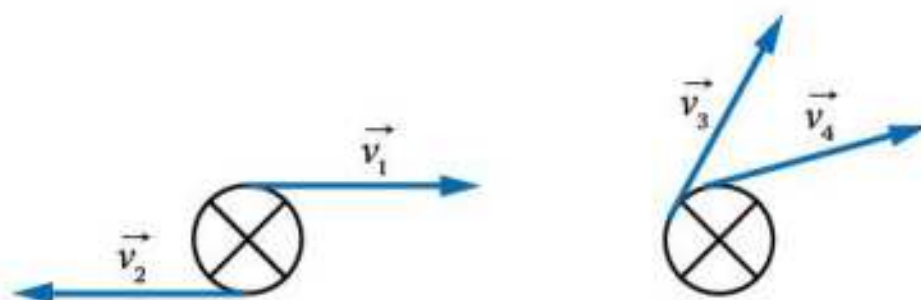


Rys. 1.7. Wektor siły $\vec{F}_1$ ma większą wartość niż wektor siły $\vec{F}_2$, bo jest dłuższy, co zapisujemy: $F_1 > F_2$ lub $|\vec{F}_1| > |\vec{F}_2|$.

Zapamiętaj

Jeżeli przy symbolu wielkości wektorowej opuścimy znak wektora, wówczas bierzemy pod uwagę tylko jego wartość (np. v – wartość prędkości, F – wartość siły).

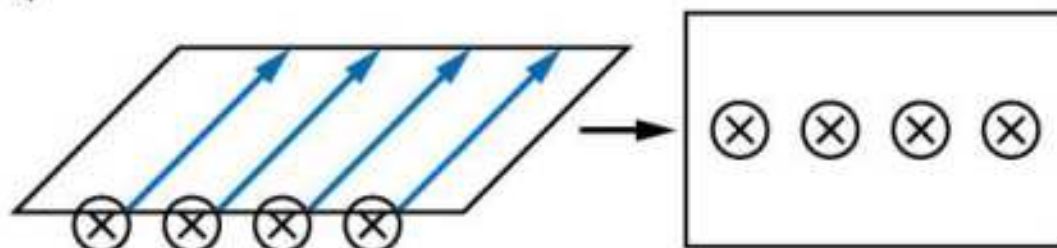
2. **Kierunek wektora** jest to prosta, na której leży wektor, lub dowolna prosta do niej równoległa (kierunek wektora może być poziomy, pionowy, ukośny).



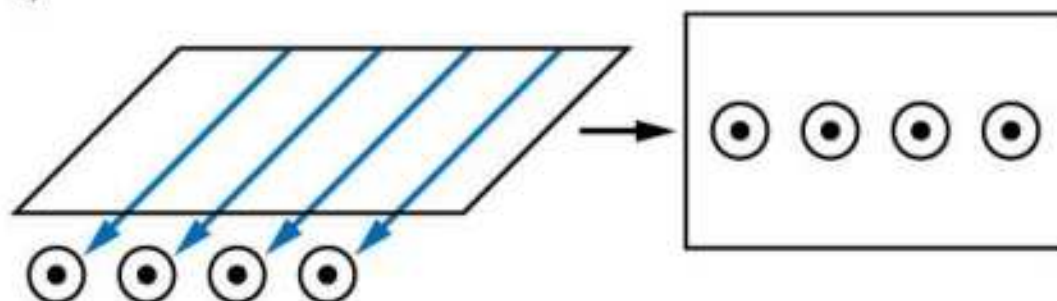
Ryc. 1.8. Wektory prędkości $\vec{v}_1$ i $\vec{v}_2$ mają ten sam kierunek (poziomy), bo leżą na prostych równoległych. Wektory prędkości $\vec{v}_3$ i $\vec{v}_4$ mają różne kierunki (ukośne), gdyż nie są do siebie równoległe.

3. **Zwrot wektora** jest oznaczony grotem (końcem) strzałki. Zwrot może być w lewo lub w prawo, do góry lub na dół, przed płaszczyznę rysunku lub za płaszczyznę. Wektory o danym kierunku mogą mieć zwroty zgodne lub przeciwne.

a)



b)



Rys. 1.9. a) Wektor zwrócony prostopadłe za płaszczyznę rysunku oznaczamy symbolem $\otimes$. b) Wektor zwrócony prostopadłe przed płaszczyznę rysunku oznaczamy symbolem $\odot$.

Wektory, które mają taką samą wartość, ten sam kierunek i przeciwne zwroty, to **wektory przeciwne**, co zapisujemy wzorem: $\vec{v}_1 = -\vec{v}_2$.

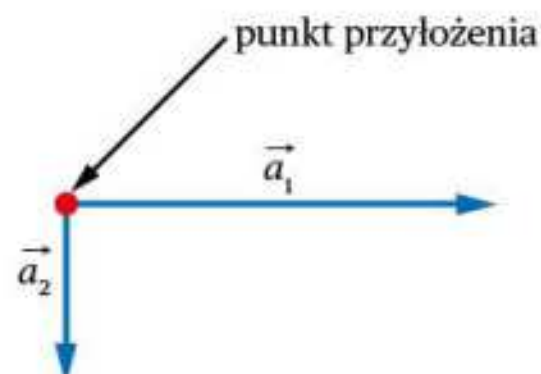


Rys. 1.10. Wektor prędkości $\vec{v}_1$ jest zwrócony w prawo, a wektor prędkości $\vec{v}_2$ w lewo. Wektory te mają przeciwne zwroty.

Zapamiętaj

Nie należy mylić kierunku wektora (poziomy, pionowy, ukośny) z jego zwrotem (w lewo, w prawo, do góry, na dół).

4. **Punkt przyłożenia** – to początek wektora. Dwa wektory mogą mieć wspólny punkt przyłożenia lub różne punkty przyłożenia.



Rys. 1.11. Wektory przyspieszenia $\vec{a}_1$ i $\vec{a}_2$ mają wspólny punkt przyłożenia, gdyż mają wspólny początek.

Przykład 1

Wzór na trzecią zasadę dynamiki ma postać: $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$. Jakie są cechy sił występujących w tym wzorze?

Rozwiązanie:

Znak minus we wzorze oznacza, że wektory sił są przeciwne. Siły te mają taką samą wartość, ten sam kierunek i przeciwne zwroty.

Przykład 2

W wieżowcu są dwie windy: osobowa, która jedzie do góry z prędkością $v_1 = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, i towarowa, która zjeżdża na parter z prędkością $v_2 = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Porównaj cechy wektorów prędkości tych wind.

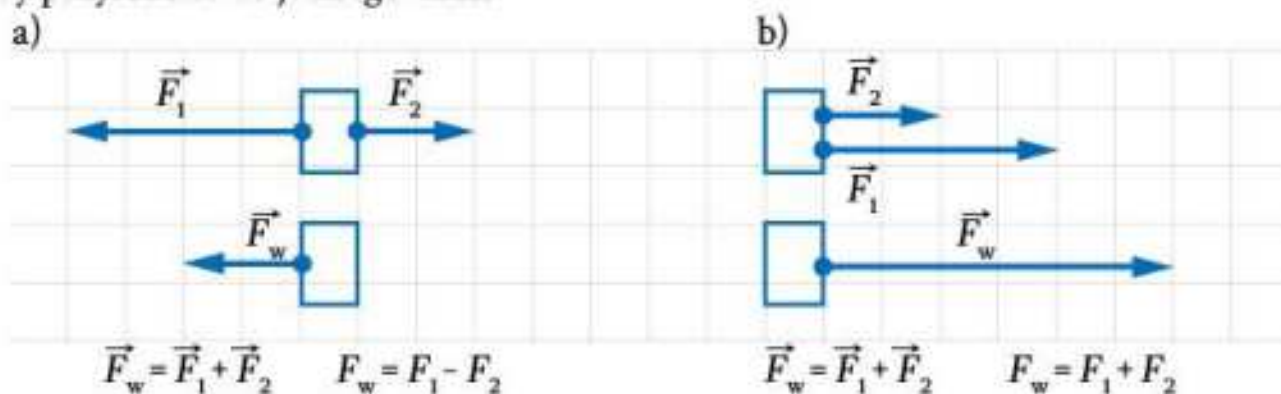
Rozwiązanie:

Wektor prędkości windy osobowej ma większą wartość ($v_1 > v_2$), obydwa wektory mają ten sam kierunek (pionowy), przeciwne zwroty (do góry i na dół) oraz różne punkty przyłożenia.

Wektory możemy dodawać (czyli znajdować ich wypadkową), odejmować i rozkładać na składowe. Można je również mnożyć. Nie można dzielić wektorów.

Poniżej omówimy tylko dodawanie wektorów, gdyż działanie to będziemy wykonywać na lekcjach fizyki.

Dodawanie wektorów wykonujemy na przykład przy obliczaniu siły wypadkowej $\vec{F}_w$. Poniżej przedstawiono podstawy dodawania wektorów. Należy pamiętać, że w fizyce możemy dodawać wektory przyłożone do jednego ciała.



Rys. 1.12. a) Dodawanie wektorów o tym samym kierunku i przeciwnych zwrotach. Długość wektora wypadkowego jest równa różnicy długości dodawanych wektorów. Wektor wypadkowy ma zwrot wektora dłuższego. b) Dodawanie wektorów o tym samym kierunku i zgodnych zwrotach. Długość wektora wypadkowego jest równa sumie długości dodawanych wektorów.

Przykład 3

Łódź motorowa płynie w dół rzeki, w której woda płynie z prędkością o wartości $v_u = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (jest to tzw. prędkość unoszenia). Prędkość własna, jaką ma łódź dzięki pracującemu silnikowi, ma wartość $v_{wl} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (z taką prędkością łódź płynęłaby na stojącej wodzie). Oblicz, jaka jest prędkość wypadkowa łodzi względem brzegu. Jaka będzie jej prędkość wypadkowa, gdy będzie płynąć pod prąd, w górę rzeki?

Wskazówka: prędkość wypadkowa jest wektorową sumą prędkości własnej łodzi i prędkości unoszenia przez wodę: $\vec{v}_{wyp} = \vec{v}_{wl} + \vec{v}_u$.

Rozwiązanie:

$$v_u = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{wl} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{wyp1} = ?$$

$$v_{wyp2} = ?$$

Gdy łódź płynie w dół rzeki, wektory prędkości $\vec{v}_{wl}$ i $\vec{v}_u$ mają ten sam kierunek i zgodne zwroty, więc wartość wektora $\vec{v}_{wyp}$ obliczamy, dodając wartości wektorów $\vec{v}_{wl}$ i $\vec{v}_u$.

$$v_{wyp1} = v_{wl} + v_u = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

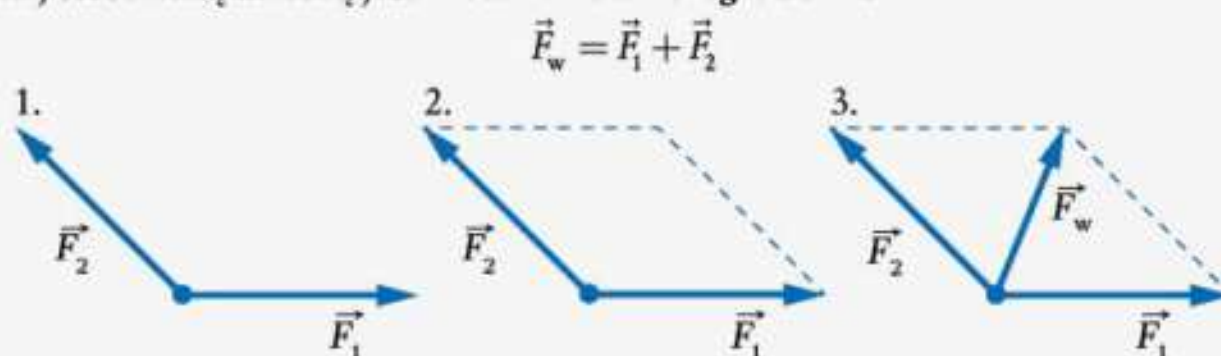
Gdy łódź płynie w górę rzeki, wektory prędkości $\vec{v}_{wl}$ i $\vec{v}_u$ mają ten sam kierunek i przeciwne zwroty, więc wartość wektora $\vec{v}_{wyp}$ obliczamy, odejmując wartości wektorów $\vec{v}_{wl}$ i $\vec{v}_u$.

$$v_{wyp1} = v_{wl} - v_u = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Chcesz wiedzieć więcej?

Wektory o różnych kierunkach dodajemy, stosując metodę równoległoboku lub metodę trójkąta. Częściej stosowaną metodą jest **metoda równoległoboku**.



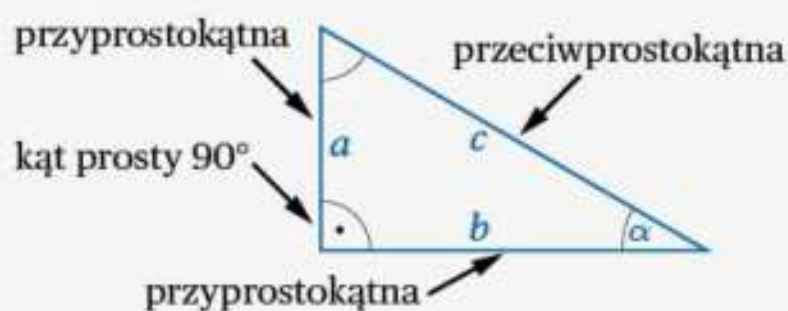
Rys. 1.13. Dodawanie wektorów o różnych kierunkach metodą równoległoboku. 1. Przesuwamy wektory równolegle tak, aby miały wspólny początek. 2. Budujemy równoległobok, rysując pozostałe boki. 3. Rysujemy przekątną równoległoboku – stanowi ona sumę dodawanych wektorów.

Rysujemy tę przekątną równoległoboku, przy której wszystkie trzy wektory mają wspólny początek (w innych przypadkach może to być dłuższa przekątna). W najczęściej spotykanych sytuacjach dodawane wektory są do siebie prostopadłe – wówczas równoległobok zamienia się na prostokąt lub kwadrat. Długość wektora wypadkowego można wtedy obliczyć z twierdzenia Pitagorasa.

Okienko matematyczne

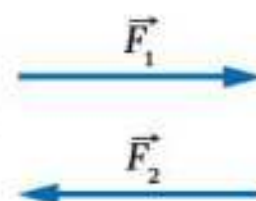
Suma kwadratów przyprostokątnych jest równa kwadratowi przeciwprostokątnej.

$$a^2 + b^2 = c^2$$



PYTANIA I ZADANIA

1. Wybierz właściwe zdanie spośród 1, 2 i 3 oraz właściwe uzasadnienie spośród A, B i C. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.



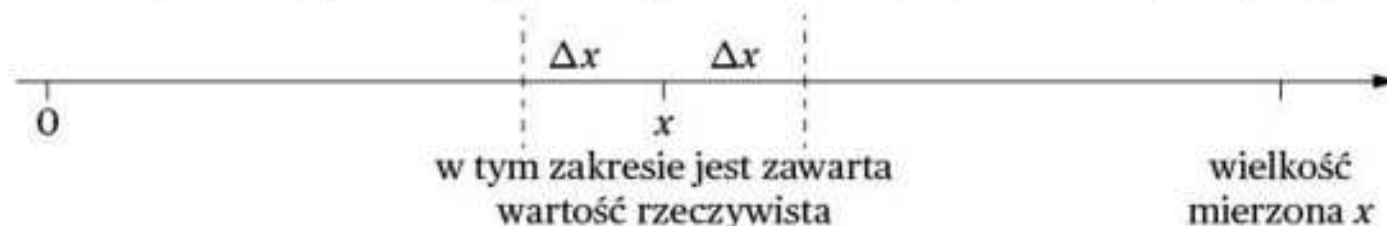
1.	Wektor $\vec{F}_1$ ma kierunek w prawo, a wektor $\vec{F}_2$ w lewo,	ponieważ	A.	świadczy o tym kierunek wektora oznaczony grotem strzałki.
2.	Wektory $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ mają różne kierunki i różne zwroty,		B.	są do siebie równoległe.
3.	Wektory $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ mają ten sam kierunek i różne zwroty,		C.	nie leżą na tej samej prostej.

- 2*. Gdy nie wieje wiatr, spadochroniarz opada na ziemię ze stałą prędkością $4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Z jaką prędkością będzie opadał spadochroniarz przy poziomym wietrze o prędkości $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$?

1.5. Niepewności pomiarowe

Pomiar każdej wielkości fizycznej odbywa się zawsze z ograniczoną dokładnością, wynikającą zarówno z czynności pomiarowych (zbyt późne włączenie czy wyłączenie stopera), jak i z wykonania samego przyrządu pomiarowego (nieprecyzyjna podziałka). Na wynik pomiaru ma również wpływ naturalna zmienność mierzonych obiektów (np. zmiana długości ciała przy zmianie temperatury). Wynik pomiaru x jakiejkolwiek wielkości różni się od jej wartości rzeczywistej x_0 . Wprowadzono zatem wielkość, która określa, jak duża jest ta różnica – nazwano ją **niepewnością pomiarową** Δx . Jest ona związana z każdym pomiarem – niezależnie od tego, czy jest to pomiar wykonywany przez nas w klasie, czy też przez naukowców w laboratoriach. Występowanie niepewności pomiarowych nie wynika z błędnego postępowania osób wykonujących pomiary, dlatego nie jesteśmy w stanie ich całkowicie wyeliminować.

Wartość niepewności pomiarowej podaje się w takich samych jednostkach jak wynik pomiaru.



Rys. 1.14. Przyjmujemy, że wartość rzeczywista x_0 mieści się w przedziale między: $(x - \Delta x)$ a $(x + \Delta x)$, bo nie wiemy, czy wynik pomiaru x jest większy, czy mniejszy od wartości rzeczywistej.

Niepewność pomiarowa umożliwia określenie przedziału, w którym zawiera się prawdziwa wartość mierzonej wielkości, ale nie daje informacji o dokładności pomiaru. Na przykład stwierdzenie, że średnicę jakiegoś koła zmierzylśmy z dokładnością do jednego milimetra (tzn. że niepewność pomiaru wynosi: $\Delta x = 1 \text{ mm}$) nie oznacza, że pomiar był dokładny. Jeżeli z taką dokładnością mierzyliśmy koło rowerowe, to pomiar był dokładny, ale jeżeli z tą dokładnością



mierzyliśmy małe kółko ze starego zegarka, to pomiar był bardzo niedokładny. Pełną informację o jakości wykonanego pomiaru dają łącznie: wynik pomiaru i niepewność pomiarowa. Dlatego wyniki pomiarów przedstawia się w postaci:

$$x \pm \Delta x.$$

Na przykład wynik pomiaru prędkości światła w próżni: $c = (299\,792,2 \pm 4,5) \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Jest kilka sposobów zmniejszania niepewności pomiarowych:

- Stosowanie dokładniejszych przyrządów, na przykład pomiar grubości dokonany suwmiarką jest dokładniejszy niż pomiar wykonany linijką szkolną.
- Wielokrotne mierzenie tej samej wielkości i obliczanie średniej arytmetycznej $\bar{x}$. Uzyskany wynik pomiaru jest równie często zawyżony, jak i zaniżony, dlatego obliczając średnią arytmetyczną z wielu pomiarów, otrzymujemy wartość najbardziej zbliżoną do wartości rzeczywistej:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \text{ gdzie: } \bar{x} \text{ to wartość średnia, } x_1, x_2, \dots - \text{wyniki kolejnych pomiarów, } n - \text{liczba pomiarów.}$$

Im więcej pomiarów wykonamy, tym lepiej wartość średniej arytmetycznej przybliży nam wartość rzeczywistą mierzonej wielkości.

Czasami zdarza się, że jeden wynik pomiaru różni się znacznie od pozostałych. Wtedy odrzucamy go i nie bierzemy pod uwagę, gdyż jest on najpewniej wynikiem błędu pomiaru (np. błędnego odczytania wskazania miernika). Mówimy, że ten wynik pomiaru jest obarczony **błędem grubym**.

- Stosowanie różnych metod pomiaru tej samej wielkości, na przykład wartość przyspieszenia ziemskiego można zmierzyć podczas swobodnego spadania ciała lub za pomocą wahadła matematycznego. Średnia wyników pomiarów obydwojema metodami jest dokładniejsza niż wynik uzyskany przy zastosowaniu tylko jednej metody.



Rys. 1.15. Działka elementarna na skali taśmy mierniczej wynosi 1 cm.

Za miarę niepewności bezwzględnej pomiarów prostych (np. bezpośredni pomiar długości, czasu, temperatury) przyjmujemy wartość działki elementarnej na skali przyrządu pomiarowego. **Działka elementarna** jest to wartość najmniejszej działki na skali przyrządu pomiarowego określająca dokładność przyrządu.

Na przykład za niepewność pomiaru:

- szerokości boiska szkolnego dokonanego taśmą mierniczą przyjmuje się $\Delta x = 1 \text{ cm}$,
- szerokości zeszytu dokonanego linijką szkolną przyjmuje się $\Delta x = 1 \text{ mm}$,



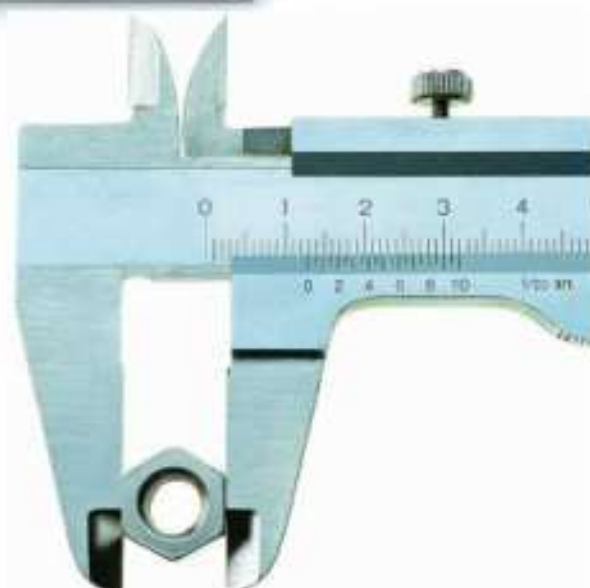
Rys. 1.16. Działka elementarna na skali linijki wynosi 1 mm.

- średnicy wiertła dokonanego suwmiarką $\Delta x = 0,1 \text{ mm}$,

a)



b)



Rys. 1.17. a) Suwmiarka. b) Wynik pomiaru odczytany na skalach wynosi 12,9 mm.

- grubości kartki w zeszycie dokonanej śrubą mikrometryczną (mikromierzem) $\Delta x = 0,01 \text{ mm}$.

Rys. 1.18. Śruba mikrometryczna (mikromierz). Na poziomej skali odczytuje się wymiar z dokładnością do 0,5 mm. Miejsce odczytu wskazuje krawędź obrotowego bębna. Punkt podziałki noniusza (od 0 do 49), który pokrywa się z poziomą linią na podziałce podstawowej, wskazuje setne części milimetra.



Za niepewność wartości średniej $\Delta \bar{x}$, obliczonej z wielu pomiarów tej samej wielkości, przyjmujemy niepewność pojedynczego pomiaru Δx , jeśli uzyskane wyniki pomiarów nie różnią się od wartości średniej więcej niż o wartość niepewności pojedynczego pomiaru. W przypadku większych różnic za miarę niepewności przyjmujemy **niepewność maksymalną** określoną następująco:

$$\Delta \bar{x} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2},$$

gdzie $x_{\max}$ – oznacza największą wartość z całej serii pomiarów tej samej wielkości, a $x_{\min}$ – najmniejszą wartość z wszystkich pomiarów.

Wyniki pomiaru powinny być podane z uwzględnieniem liczby **cyfr znaczących** w takiej postaci, która odzwierciedla, z jaką dokładnością te pomiary zostały wykonane. Podając zbyt dużo lub zbyt mało cyfr znaczących, spowodujemy zafałszowanie tej dokładności.

Cyframi znaczącymi nazywamy cyfry, które są pewne, tzn. są dokładne lub różnią się od cyfry właściwej o 1.

Chcąc policzyć, ile jest cyfr znaczących w danej liczbie, możemy się posłużyć następującymi wskazówkami:

- każda niezerowa cyfra jest cyfrą znaczącą,
- zera, które są pomiędzy cyframi niezerowymi, są cyframi znaczącymi,



- zera na końcu, po ostatniej cyfrze niezerowej w liczbie z przecinkiem dziesiętnym liczymy jako cyfry znaczące,
- zera na początku przed pierwszą cyfrą niezerową **nie liczą się** jako cyfry znaczące.

Przykłady (cyfry znaczące wyróżniono pogrubioną czcionką):

$$0,00600 \text{ km} = 6,00 \text{ m}$$

liczba ma trzy cyfry znaczące,

$$0,025 \text{ km} = 25 \text{ m}$$

liczba ma dwie cyfry znaczące,

$$10,0$$

liczba ma trzy cyfry znaczące,

$$507,001$$

liczba ma sześć cyfr znaczących.

- w notacji naukowej cyframi znaczącymi są wszystkie cyfry przed 10^n . Na przykład:

$$6,50 \cdot 10^3$$

liczba ma trzy cyfry znaczące.

Przykład 1

Wyniki pomiaru średnicy wiertła podano na trzy sposoby:

a) 0,6 cm. W tej liczbie cyfrą znaczącą jest 6. Pomiaru dokonano z dokładnością do dziesiętnej części centymetra, czyli do milimetra, np. za pomocą linijki. Dokładna wartość mogła być np. 0,02 cm mniejsza lub większa, po zaokrągleniu otrzymamy 0,6 cm.

b) 0,60 cm. W tej liczbie są dwie cyfry znaczące: 6 i ostatnie zero. Pomiaru dokonano z dokładnością do setnej części centymetra, czyli do dziesiętnej części milimetra, np. za pomocą suwmiarki. Dokładna wartość mogła być np. 0,003 cm mniejsza lub większa.

c) 0,600 cm. W tej liczbie są trzy cyfry znaczące: 6 i dwa ostatnie zera. Pomiaru dokonano z dokładnością do tysięcznej części centymetra, czyli do setnej części milimetra, np. za pomocą śruby mikrometrycznej. Dokładna wartość mogła być np. mniejsza lub większa.

PYTANIA I ZADANIA

- Jaka jest niepewność pomiaru:
 - temperatury pokojowej zmierzonej termometrem cieczowym,
 - temperatury naszego ciała zmierzonej termometrem lekarskim?
- Ile cyfr znaczących ma liczba 0152,0190?
- Grubość płytki d zmierzono sześć razy, otrzymując wyniki: 1,12 mm; 1,13 mm; 1,11 mm; 1,12 mm; 1,10 mm i 1,14 mm. Jak poprawnie zapisać grubość płytki z uwzględnieniem niepewności pomiarowej?

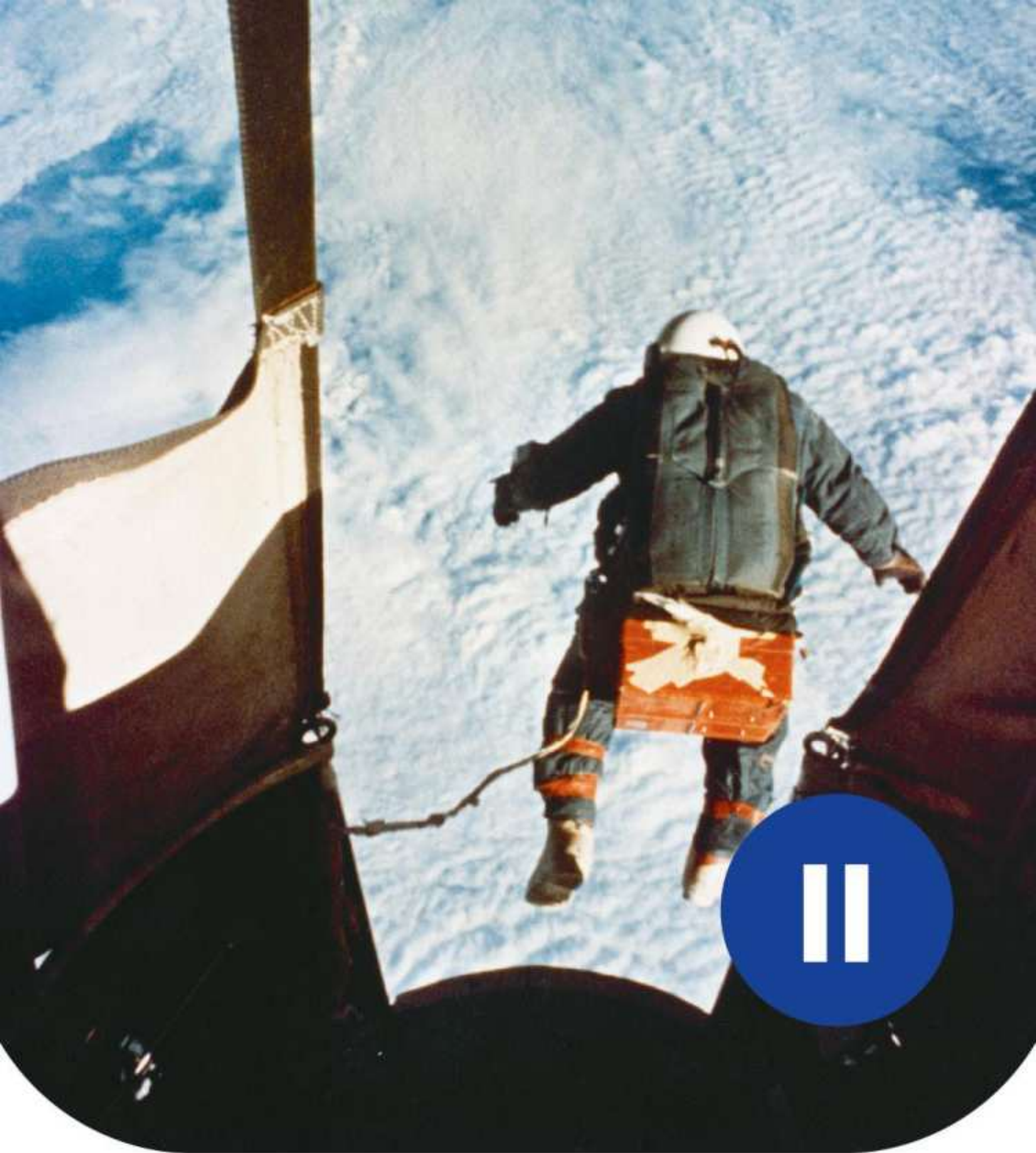
a)



b)



Rys. 1.19. a) Termometr cieczowy. b) Termometr lekarski.



KINEMATYKA

2.1. Ruch i wielkości go opisujące

Zjawisko ruchu. Względność ruchu

Ruch jest najczęściej obserwowanym zjawiskiem fizycznym. Jednak odpowiedź na pytanie: „Co nazywamy ruchem?”, może sprawić nieco kłopotu. Określanie pojęć zupełnie oczywistych jest czasami dosyć trudne. Zwróćmy uwagę na dwie kwestie:

- obserwując dowolny ruch, zauważymy, że obserwowane ciało zmienia swoje położenie,
- aby zauważyć zmianę położenia, musimy obserwować interesujące nas ciało na tle innych ciał; będziemy je nazywać **układem odniesienia**.



Układ odniesienia jest to dowolnie wybrany zespół ciał, traktowanych jako nieruchome, względem których obserwujemy zachowanie interesującego nas ciała.

Układem odniesienia może być na przykład budynek, względem którego obserwujemy ruch windy lub wagon jadącego pociągu, względem którego obserwujemy książkę leżącą na stoliku. Najczęściej wybieranym układem odniesienia jest ten związany z Ziemią (Ziemia i wszystkie ciała sztywno z nią związane, np. budynki i drzewa, stanowią ten sam układ odniesienia). Może się jednak okazać, że po wybraniu innego układu odniesienia opis ruchu będzie prostszy.

Za pomocą pojęcia „układ odniesienia” można zdefiniować **zjawisko ruchu** (w fizyce oprócz definicji wielkości fizycznych występują też definicje zjawisk fizycznych).



Rys. 2.1. Układem odniesienia może być na przykład budynek lub wagon jadącego pociągu.



Ruchem ciała nazywamy zmianę jego położenia względem dowolnie wybranego układu odniesienia.

Chcesz wiedzieć więcej?

Bez ustalenia układu odniesienia nie można jednoznacznie odpowiedzieć na pytanie, czy ciało jest w ruchu, czy w spoczynku. Na przykład czy walizka leżąca w przedziale jadącego pociągu jest w ruchu, czy w spoczynku? Jest ona zarówno w spoczynku (względem ścian wagonu), jak i w ruchu (względem peronu). Na tym polega względność ruchu.

Względność ruchu polega na tym, że to samo ciało może być równocześnie w ruchu i w spoczynku w zależności od wybranego układu odniesienia oraz że względem jednego układu odniesienia ciało porusza się inaczej niż względem drugiego układu odniesienia.

Przykład 1

Znajdujemy się w samochodzie stojącym przed skrzyżowaniem i obserwujemy ciężarówkę stojącą obok na sąsiednim pasie. W pewnym momencie widzimy, że jedziemy do tyłu. Rzut oka na jezdnię pozwala stwierdzić, że to ciężarówka ruszyła do przodu, a nasz samochód nadal pozostaje w spoczynku.

Spośród wszystkich ruchów wyróżniamy ruchy postępowe, w których wszystkie punkty ciała poruszają się po identycznych liniach (nazywanych **torami ruchu**) przebywają takie same drogi, mają taką samą prędkość i przyspieszenie.

Rys. 2.2. Biała smuga, jaką widać czasami na niebie za lecącym samolotem, wyznacza tor ruchu.



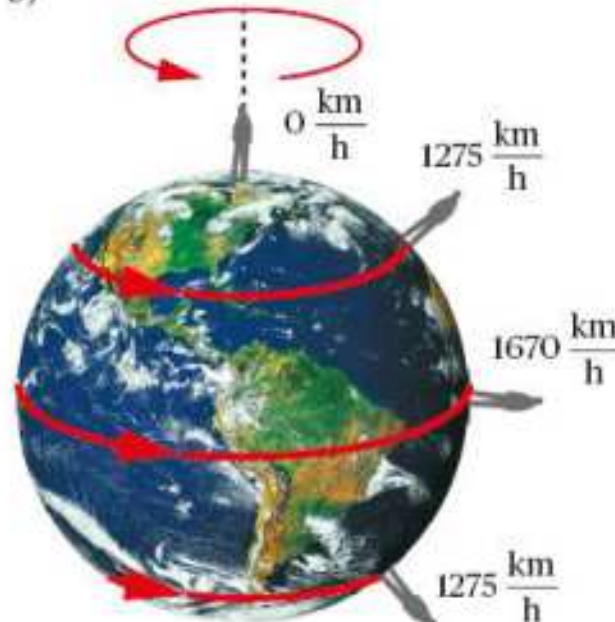
Innym rodzajem ruchu jest **ruch obrotowy**, w którym poszczególne punkty ciała poruszają się po współśrodkowych okręgach leżących na równoległych płaszczyznach. Można też znaleźć punkty, które nie biorą udziału w tym ruchu – leżą one na prostej nazywanej osią obrotu.

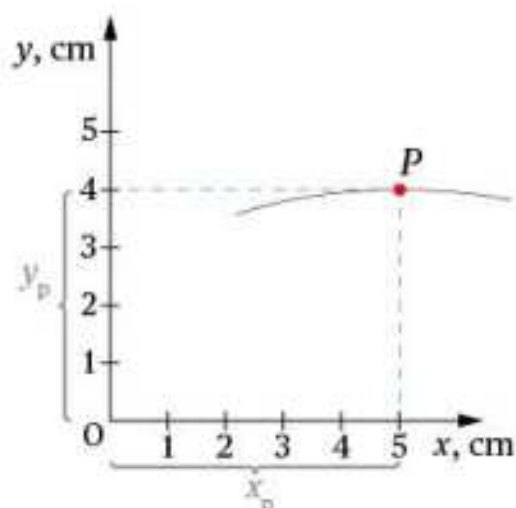
a)



Rys. 2.3. a) Samochody poruszają się ruchem postępowym. b) Kula ziemską porusza się ruchem obrotowym wokół własnej osi.

b)

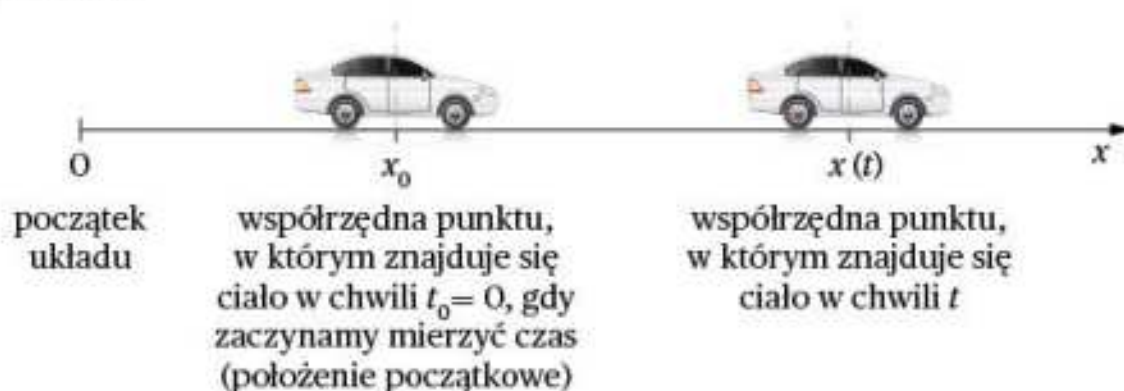




Rys. 2.4. Położenie punktu P na płaszczyźnie można określić przez podanie jego współrzędnych: $x_P = 5 \text{ cm}$, $y_P = 4 \text{ cm}$.

Dla pełnego, ilościowego opisu ruchu z układem odniesienia wiążemy układ współrzędnych. Aby przedstawić ruch punktu materialnego na płaszczyźnie, jako układ odniesienia przyjmujemy dwuwymiarowy układ współrzędnych. Składają się na niego dwie osie liczbowe oznaczane jako Ox i Oy . Położenie punktu materialnego w układzie współrzędnych można opisać przez podanie jego współrzędnych x_P, y_P .

Do opisu ruchu prostoliniowego z układem odniesienia wiążemy tylko oś x położoną na prostej, wzdłuż której porusza się ciało. Położenie ciała można wówczas opisać przez współrzędną punktu (dodatnią lub ujemną), w którym znajduje się ciało.



Rys. 2.5. Opis położenia ciała za pomocą współrzędnych.

Wielkości opisujące ruch

Do opisu każdego zjawiska fizycznego posługujemy się różnymi wielkościami fizycznymi. Przypomnijmy podstawowe wielkości służące do opisu zjawiska ruchu:

- **Czas ruchu Δt** – czas mierzony od położenia początkowego do końcowego:

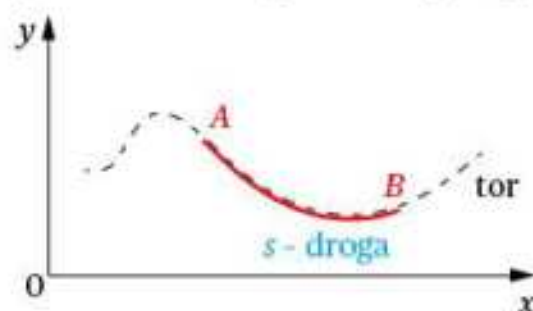
$$\Delta t = t - t_0.$$

Gdy opis ruchu rozpoczynamy w chwili $t_0 = 0$, zamiast Δt piszemy t . Podstawową jednostką czasu jest sekunda (s).

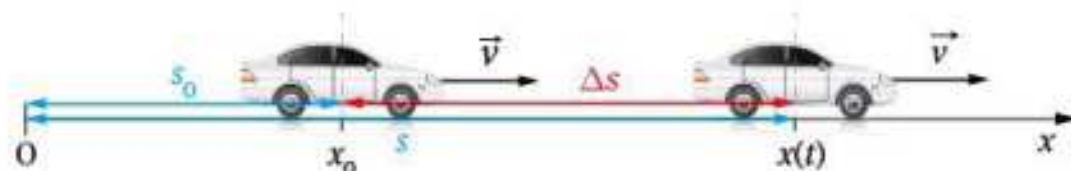
- **Droga Δs** – długość części toru przebytej przez ciało w danym czasie:

$$\Delta s = s - s_0.$$

Gdy przyjmiemy, że droga przebyta do momentu rozpoczęcia obserwacji jest równa zero ($s_0 = 0$), zamiast Δs piszemy s . Podstawową jednostką drogi jest metr (m).



Rys. 2.6. Tor ruchu i droga w ruchu krzywoliniowym i w ruchu prostoliniowym.



Droga nie może maleć wraz z upływem czasu. Zarówno wtedy, gdy ciało porusza się w prawo, oddalając się od początku układu, jak i wtedy, gdy porusza się w lewo, zbliżając się do początku układu, droga cały czas rośnie. Gdy ciało się zatrzyma, przebyta droga pozostaje stała.

- **Prędkość v** jest to stosunek drogi Δs do czasu Δt , w którym ta droga została przebyta:

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

Główną jednostką prędkości jest metr na sekundę $\left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$.

a)



b)



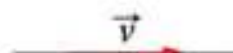
Rys. 2.7. a) Wartość prędkości wskazuje prędkościomierz samochodu. b) Wartość prędkości można też zmierzyć policyjnym radarem.

Prędkość jest wielkością fizyczną wektorową, która oprócz wartości ma też kierunek (poziomy, pionowy, ukośny) i zwrot (np. w lewo, w prawo).

a)



b)



Rys. 2.8. a) W ruchu krzywoliniowym wektor prędkości jest styczny do toru (prostopadły do promienia krzywizny). b) W ruchu prostoliniowym wektor prędkości pokrywa się z torem ruchu.

- **Przyrost prędkości Δv** to wielkość opisująca, jak bardzo zwiększyła się prędkość poruszającego się ciała.

W ruchu prostoliniowym wartość przyrostu prędkości Δv obliczamy, od wartości prędkości końcowej v odejmując wartość prędkości początkowej v_0 :

$$\Delta v = v - v_0.$$

Główną jednostką przyrostu prędkości jest metr na sekundę $\left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$.

- **Przyspieszenie a** to stosunek przyrostu prędkości do czasu, w jakim ten przyrost nastąpił:

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

gdzie: a to przyspieszenie, Δv – przyrost prędkości, Δt – czas.

Główną jednostką przyspieszenia jest metr na sekundę do kwadratu $\left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$.

Przyspieszenie, podobnie jak prędkość, jest wielkością wektorową.

Podział ruchów postępowych

Ze względu na kształt toru **ruchy postępowe** dzielimy na:

- **ruchy prostoliniowe**, których torem jest linia prosta,
- **ruchy krzywoliniowe**, których torem jest dowolna krzywa. Szczególnym przypadkiem ruchu krzywoliniowego jest ruch, którego torem jest okrąg.

Ze względu na prędkość ruchy dzielimy na:

- **ruchy jednostajne**, w których wartość prędkości jest stała,
- **ruchy jednostajnie zmienne**, w których wartość prędkości się zmienia. Można je z kolei podzielić na:
 - **ruch jednostajnie przyspieszony**, w którym wartość przyspieszenia jest stała, a wartość prędkości liniowo rośnie,
 - **ruch jednostajnie opóźniony**, w którym wartość przyspieszenia jest stała, a wartość prędkości liniowo maleje.



Rys. 2.9. Podział ruchów prostoliniowych ze względu na wartość prędkości.

Występują jeszcze **ruchy niejednostajnie zmienne**, w których wartość prędkości zmienia się w taki sposób, że przyspieszenie nie jest stałe.



PYTANIA I ZADANIA

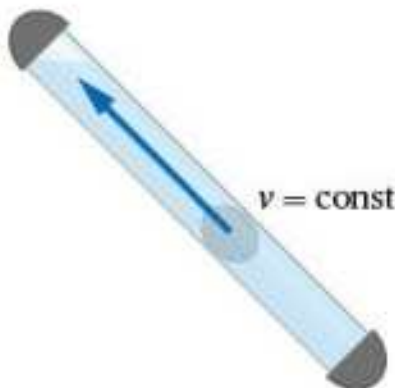
1. Ślad pozostawiony przez łyżwiarza na tafli lodu przedstawia tor czy drogę?
- 2*. Chłopiec znajdujący się w jadącym pociągu wysunął rękę przez otwarte okno i upuścił jabłko. Po jakim torze będzie spadać owoc w układzie odniesienia związanym z pociągami, a po jakim – w układzie odniesienia związanym z Ziemią?
3. Samochód wyścigowy podczas startu rozpędził się do prędkości $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ w czasie 2 s. Po jakim czasie osiągnie prędkość $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, jeśli cały czas porusza się z takim samym przyspieszeniem?
- 4*. Kulka toczy się ze środka okrągłej wirującej tarczy do jej brzegu wzdłuż promienia. Tor ruchu kulki jest linią prostą w układzie odniesienia, który jest związany z:

- A. Ziemią,
- B. obracającą się tarczą,
- C. pomieszczeniem, w którym znajduje się tarcza,
- D. kulką.

- 5*. Z wymienionych ciał: Ziemia, Słońce, Gwiazda Polarna:
- A. w spoczynku jest Ziemia,
 - B. w spoczynku jest Gwiazda Polarna,
 - C. w spoczynku jest Słońce,
 - D. względnie w ruchu może być każde z nich, w zależności od wyboru układu odniesienia.
6. Prędkości ciał wynoszą: $v_1 = 1 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, $v_2 = 750 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $v_3 = 54 \frac{\text{km}}{\text{min}}$, $v_4 = 144 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Największa jest prędkość:
- A. v_1 B. v_2 C. v_3 D. v_4
7. Jeśli prędkość ciała w ciągu każdej sekundy wzrasta o $60 \frac{\text{m}}{\text{min}}$, to jego przyspieszenie wynosi:
- A. $360 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ B. $60 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ C. $60 \frac{\text{m}}{\text{min}^2}$ D. $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

2.2. Ruch prostoliniowy jednostajny

Omawianie poszczególnych rodzajów ruchu zaczniemy od najprostszego, odbywającego się po linii prostej ze stałą prędkością.



Ruch prostoliniowy jednostajny jest to ruch, którego torem jest linia prosta, a prędkość jest stała: $v = \text{const}$.

Przykładem ruchu prostoliniowego jednostajnego jest ruch windy jadącej między piętrami lub ruch pęcherzyka powietrza w szklanej rurce wypełnionej wodą.

Rys. 2.10. Pęcherzyk powietrza w rurce wypełnionej wodą porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Prędkość v w ruchu jednostajnym prostoliniowym jest wyrażona wzorem:

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

gdzie Δs to droga przebyta przez ciało w czasie Δt .

Umieszczając początek układu współrzędnych w miejscu rozpoczęcia ruchu ($s_0 = 0$), można zapisać przebytą drogę jako s zamiast Δs . Rozpoczynając pomiar czasu w momencie startu ciała ($t_0 = 0$), można zapisać czas ruchu jako t zamiast Δt . Otrzymujemy wówczas prostszą postać wzoru:

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



Przykład 1

Jaka była różnica prędkości dwóch zawodników, jeżeli pierwszy z nich przebiegł cały dystans w czasie $t = 10,2 \text{ s}$ i mijając linię mety, wyprzedził drugiego zawodnika o $l = 4 \text{ m}$?

Rozwiązanie:

$$t = 10,2 \text{ s}$$

$$l = 4 \text{ m}$$

$$\Delta v = ?$$

$$\Delta v = v_1 - v_2$$

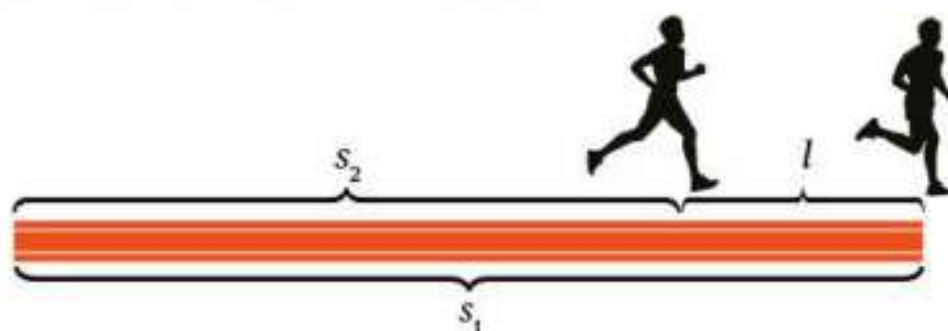
$$v = \frac{s}{t}$$

$$v_1 = \frac{s_1}{t}, \quad v_2 = \frac{s_2}{t}$$

$$\Delta v = v_1 - v_2 = \frac{s_1}{t} - \frac{s_2}{t} = \frac{s_1 - s_2}{t}, \quad s_1 - s_2 = l$$

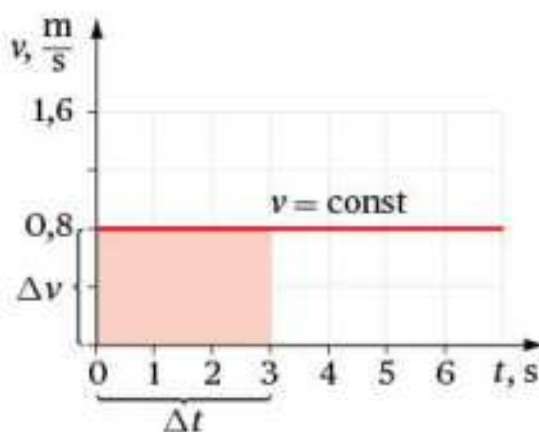
$$\Delta v = \frac{l}{t}$$

$$\Delta v = \frac{4 \text{ m}}{10,2 \text{ s}} = 0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Rys. 2.11. Zawodnicy podczas biegu.

W ruchu jednostajnym prędkość jest stała, więc na wykresie $v(t)$ wyznacza ją linia pozioma. Odczytując z wykresu wartości prędkości ciała (np. $v = 0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), można obliczyć, że w ciągu na przykład 3 s przebyło ono drogę $s = 0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 3 \text{ s} = 2,4 \text{ m}$.



Rys. 2.12. Przykładowy wykres zależności prędkości od czasu $v(t)$ w ruchu jednostajnym.



Zapamiętaj

Z wykresu zależności prędkości od czasu $v(t)$ można odczytać drogę przebytą przez ciało jako pole powierzchni figury zawartej między linią wykresu a osią czasu. Ten sposób odczytywania drogi można stosować dla dowolnego ruchu, nie tylko dla ruchu jednostajnego.

Przekształcając wzór na prędkość, można z niego wyprowadzić wzór na drogę.

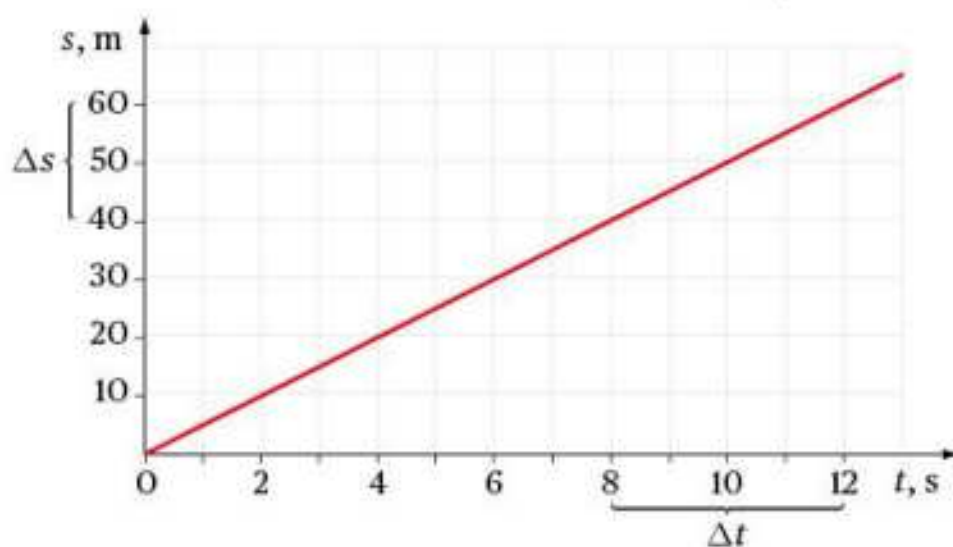
$$s = v \cdot t,$$

gdzie: s to droga w ruchu jednostajnym prostoliniowym, v – prędkość, a t – czas.

Wzór ten jest nazywany **równaniem drogi w ruchu jednostajnym**.

Ze wzoru wynika, że w ruchu jednostajnym prostoliniowym drogi przebyte w jednakowych odstępach czasu są jednakowe. Wykresem zależności drogi od czasu $s(t)$ jest prosta nachylona pod kątem do osi poziomej.

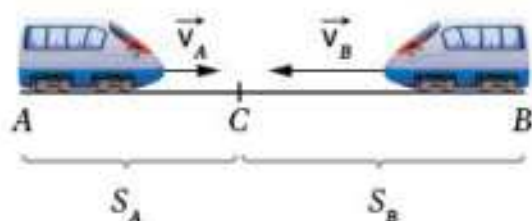
Odczytując z wykresu wartości przebytej drogi (np. $\Delta s = 20 \text{ m}$) i czasu (np. $\Delta t = 4 \text{ s}$), w jakim ta droga została przebyta, można obliczyć wartość prędkości ciała $\left(v = \frac{\Delta s}{\Delta t}, \quad v = \frac{20 \text{ m}}{4 \text{ s}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$.



Rys. 2.13. Przykładowy wykres zależności drogi od czasu w ruchu jednostajnym.

Przykład 2

Na równoległych torach z dwóch miast A i B wyjeżdżają równocześnie naprzeciw siebie dwa pociągi. Pociąg wyruszający z A porusza się z prędkością $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, a pociąg wyjeżdżający z B z prędkością $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Odległość między miastami wynosi 100 km . Po jakim czasie od chwili wyjazdu pociągu z miasta A i w jakiej odległości od miasta A spotkają się te pociągi?



Rys. 2.14. Pociągi jadące naprzeciw siebie.

Rozwiązanie:

$$v_A = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad v_B = 90 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad l = 100 \text{ km} = 100\,000 \text{ m}, \quad t = ?, \quad s_A = ?$$

$$s_A = v_A \cdot t, \quad s_B = v_B \cdot t$$

$$l = s_A + s_B$$

$$l = v_A \cdot t + v_B \cdot t = t(v_A + v_B)$$

$$t = \frac{l}{v_A + v_B}$$

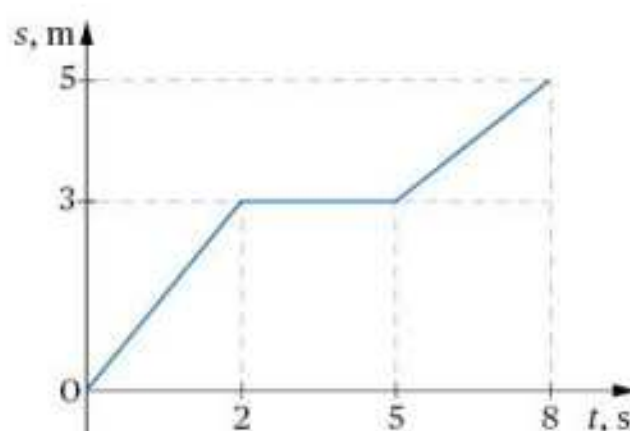
$$t = \frac{100\,000 \text{ m}}{15 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{100\,000 \text{ m}}{40 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2500 \text{ s}$$

$$s_A = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2500 \text{ s} = 37\,500 \text{ m}$$



PYTANIA I ZADANIA

1. Dwaj zawodnicy biegli razem, każdy z prędkością $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. W odległości 200 m przed metą jeden z nich zwiększył prędkość do $8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. O ile metrów wyprzedzi on na mecie wolniejszego zawodnika?
2. Na rysunku przedstawiono wykres zależności drogi od czasu dla pewnego ruchu. Narysuj w zeszycie wykres prędkości $v(t)$ dla tego ruchu.



Rys. 2.15. Wykres do zadania 2.

3. Ciało porusza się ruchem prostoliniowym ze stałą prędkością $v = 32 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

1.	Drogę $s = 320 \text{ m}$ ciało przebędzie w czasie $t = 10 \text{ s}$.	P	F
2.	Jego prędkość jest równa $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.	P	F
3.	48 km ciało to przebędzie w ciągu 1,5 h.	P	F

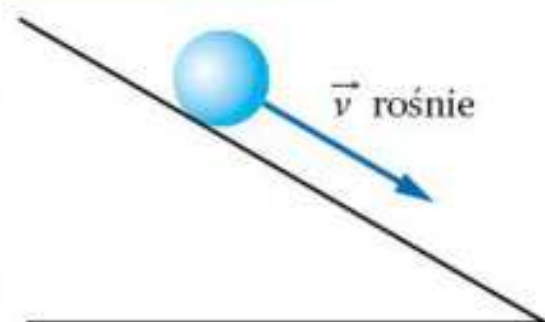
4. Które z poniższych zdań nie dotyczy ruchu prostoliniowego jednostajnego?
A. Prędkość jest stała $v = \text{const}$.
B. Droga przebyta przez ciało jest wprost proporcjonalna do czasu trwania ruchu.
C. Wykres prędkości $v(t)$ jest linią prostą tworzącą z osią czasu kąt ostry.
D. Przyspieszenie ma wartość równą zero.

2.3. Ruch prostoliniowy jednostajnie przyspieszony

Kolejnym ruchem prostoliniowym jest ruch jednostajnie przyspieszony.

Ruch prostoliniowy jednostajnie przyspieszony jest to ruch, którego torem jest linia prosta i w którym prędkość rośnie w jednakowych przedziałach czasu o tę samą wartość, a przyspieszenie jest stałe: $a = \text{const}$.

Przykładem ruchu prostoliniowego jednostajnie przyspieszonego jest ruch, jaki wykonuje ciało spadające swobodnie z pewnej wysokości lub ruch kulki toczącej się po równi pochyłej.



Rys. 2.16. Galileusz zaobserwował, że mosiężna kulka tocząca się po równi pochyłej porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym.

W ruchu jednostajnie przyspieszonym prostoliniowym wartość wektora prędkości v równomiernie rośnie, to znaczy, że przyrosty prędkości w jednakowych odstępach czasu są jednakowe.

Aby uzyskać wzór podający zależność prędkości od czasu, do definicji przyspieszenia $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ wstawiamy wzór na przyrost prędkości: $\Delta v = v - v_0$:

$$a = \frac{v - v_0}{\Delta t}.$$

Po przekształceniu otrzymujemy:

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

gdzie: v to prędkość końcowa (po upływie czasu Δt) w ruchu jednostajnie przyspieszonym, v_0 – prędkość początkowa, a – przyspieszenie.

Gdy opis ruchu rozpoczynamy w chwili $t_0 = 0$, wówczas $\Delta t = t$ i otrzymujemy:

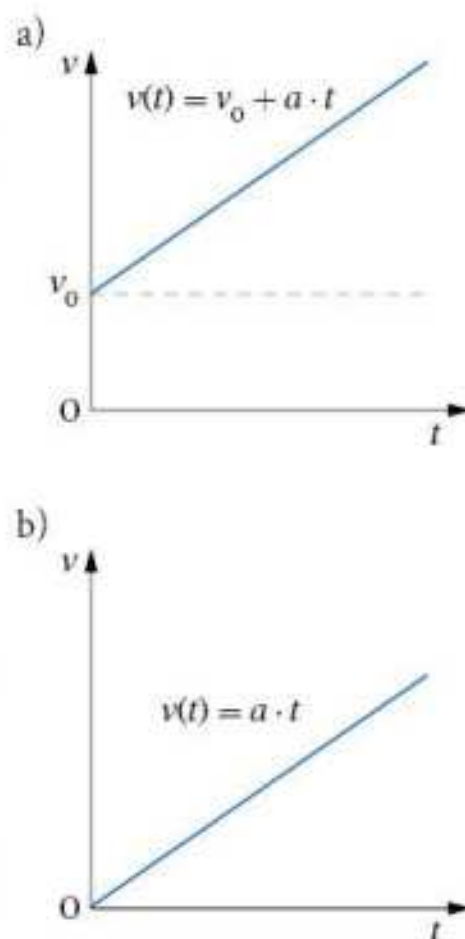
$$v = v_0 + a \cdot t.$$

Wartość prędkości początkowej v_0 może być równa zero lub różna od zera, jeżeli ciało miało prędkość $\vec{v}_0$ w chwili rozpoczęcia pomiaru czasu.

Dla ruchu bez prędkości początkowej ($v_0 = 0$) poprzedni wzór przyjmuje postać:

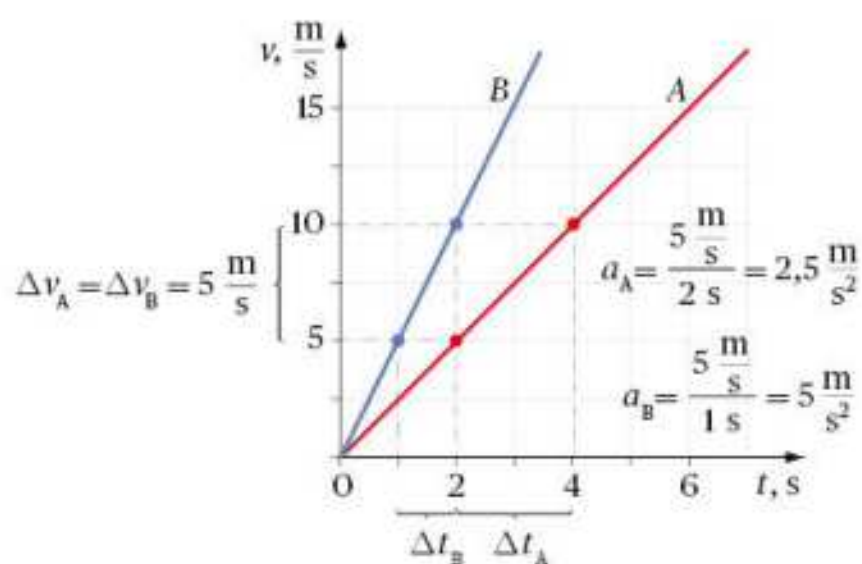
$$v = a \cdot t.$$

Rys. 2.17. Wykresy przedstawiające zależność prędkości od czasu w ruchu jednostajnie przyspieszonym: a) z prędkością początkową różną od zera $v_0 \neq 0$, b) bez prędkości początkowej $v_0 = 0$.



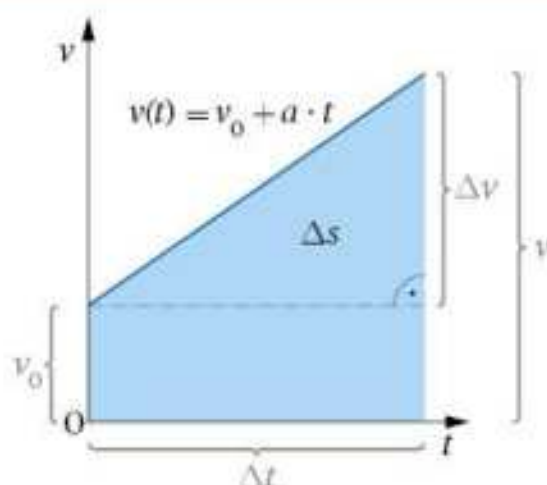
Porównajmy, jak będą wyglądać wykresy $v(t)$ dla dwóch ciał poruszających się z różnymi przyspieszeniami bez prędkości początkowej.

Rys. 2.18. Wykresy zależności prędkości od czasu $v(t)$ dla dwóch ciał A i B poruszających się ruchem jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej ($v_0=0$) z różnymi przyspieszeniami.



Zapamiętaj

Podobnie jak w ruchu jednostajnym, z wykresu zależności prędkości od czasu $v(t)$ można odczytać drogę Δs przebytą przez ciało w czasie Δt jako pole powierzchni figury zawartej pod linią wykresu.



Rys. 2.19. Droga przebyta przez ciało jest liczbowo równa sumie pola powierzchni prostokąta i trójkąta zawartego między linią wykresu a osią czasu.

$$\Delta s = v_0 \cdot \Delta t + \frac{a \cdot (\Delta t)^2}{2}$$

Prostsza postać wzoru uzyskamy przy założeniu, że $s_0 = 0$, kiedy $t_0 = 0$:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2},$$

gdzie: s to droga przebyta w czasie t ruchem jednostajnie przyspieszonym, v_0 – prędkość początkowa, a – przyspieszenie.

Wzór ten jest nazywany **równaniem drogi w ruchu jednostajnie przyspieszonym**.

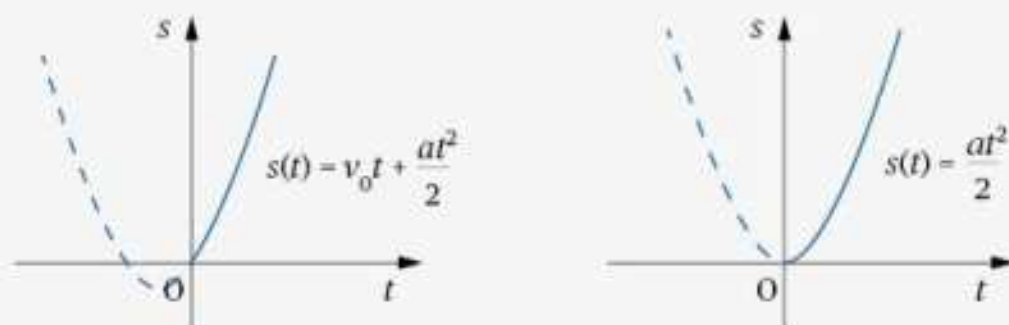
Dla ruchu bez prędkości początkowej ($v_0 = 0$) równanie drogi w ruchu jednostajnie przyspieszonym przyjmuje postać:

$$s = \frac{at^2}{2}.$$

W ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej droga jest wprost proporcjonalna do kwadratu czasu. Za pomocą powyższego wzoru łatwo można wyznaczyć **przyspieszenie ciała**, mierząc przebytą drogę i czas ruchu: $a = \frac{2 \cdot s}{t^2}$.

Chcesz wiedzieć więcej?

Wykresem zależności drogi od czasu $s(t)$ jest gałąź paraboli. Sens fizyczny ma tylko dodatnia część paraboli, gdyż nie ma ujemnego czasu.



Rys. 2.20. Wykres zależności drogi od czasu w ruchu jednostajnie przyspieszonym: a) dla $v_0 \neq 0$, b) $v_0 = 0$.

Przykład 1

Samochód, którego prędkość początkowa wynosiła $8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym na drodze 130 m w czasie 10 s. Oblicz przyspieszenie i prędkość końcową tego samochodu.

Rozwiązanie:

$$v_0 = 8 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad s = 130 \text{ m}, \quad t = 10 \text{ s}$$

$$a = ?, \quad v = ?$$

$$\begin{cases} s = v_0 t + \frac{a t^2}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} v = v_0 + a t \Rightarrow a = \frac{v - v_0}{t} \end{cases}$$

$$s = v_0 t + \frac{v - v_0}{2} \cdot t = v_0 t + \frac{(v - v_0) \cdot t}{2} = v_0 t + \frac{v t}{2} - \frac{v_0 t}{2}$$

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

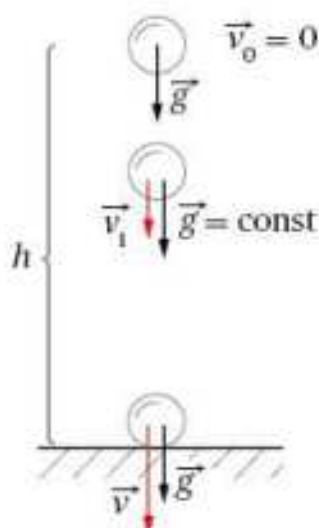
$$\frac{v t}{2} = s - \frac{v_0 t}{2} \quad | \cdot 2$$

$$v t = 2s - v_0 t$$

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

$$v = \frac{2 \cdot 130 \text{ m}}{10 \text{ s}} - 8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 26 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 18 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{18 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10 \text{ s}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



Rys. 2.21. Wektory prędkości i przyspieszenia spadającej swobodnie kulki.

Najczęściej spotykanym przykładem ruchu jednostajnie przyspieszonego jest spadanie ciał na powierzchnię Ziemi. Gdy ciało ma niewielkie rozmiary i dużą masę, można zaniedbać opór powietrza. Wówczas ciało porusza się ze stałym przyspieszeniem, a jego ruch nazywamy spadaniem swobodnym. **Swobodne spadanie** to ruch, jaki wykonuje ciało, które zaczyna spadać ($v_0 = 0$) z niezbyt dużej wysokości, bez uwzględnienia oporu powietrza. Swobodne spadanie odbywa się ze stałym przyspieszeniem, które nazywamy **przyspieszeniem ziemskim**. Ponieważ jest to najczęściej spotykane przez nas przyspieszenie, wyróżniamy je spośród innych przyspieszeń oddzielnym symbolem: $\vec{g}$.

Zapamiętaj

Przy powierzchni Ziemi ciała spadają ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem ziemskim o wartości $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Do swobodnego spadania możemy zastosować wzór na drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej: $s = \frac{at^2}{2}$. Po podstawieniu $s = h$ oraz $a = g$ otrzymujemy:

$$h = \frac{gt^2}{2}.$$

Po przekształceniu otrzymujemy wzór na **czas swobodnego spadania**:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

Zastosujmy teraz wzór na prędkość końcową w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej: $v = a \cdot t$, podstawiając za czas powyższe wyrażenie oraz $a = g$. Otrzymujemy:

$$v = g \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{g^2 \frac{2h}{g}}.$$

Otrzymaliśmy wzór na **prędkość końcową w swobodnym spadaniu**:

$$v = \sqrt{2gh}.$$

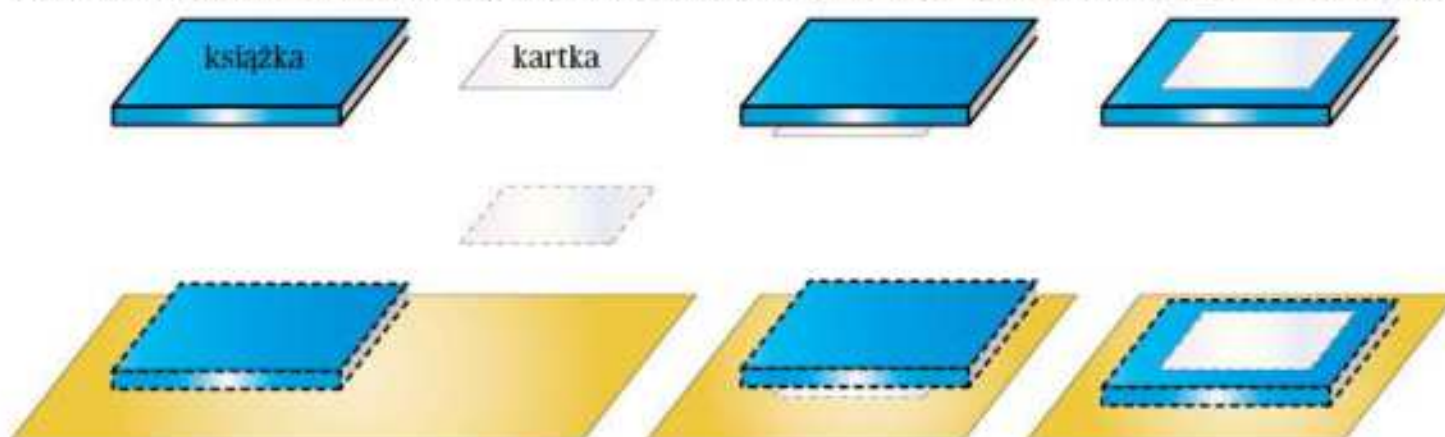
Zapamiętaj

Prędkość końcowa spadającego swobodnie ciała i czas spadania zależą tylko od wysokości, a nie zależą od masy ciała.

Powyższy wniosek można potwierdzić w prostym doświadczeniu.

Doświadczenie 1

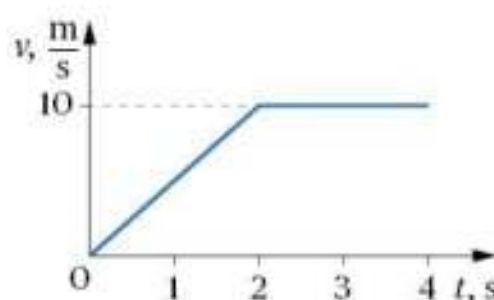
Na tej samej wysokości ustaw obok siebie ciężką książkę i lekką kartkę papieru. Gdy puścisz je równocześnie, na podłogę wcześniej spadnie książka. Siła oporu powietrza spowodowała, że kartka spadła później. Powtórz doświadczenie, umieszczając kartkę pod książką. Tym razem książka i kartka spadną na podłogę jednocześnie. Można to było przewidzieć – przecież ciężka książka dociskała lekką kartkę. Następnie umieść kartkę na książce i powtórz doświadczenie. Tym razem wynik cię chyba zaskoczy. Książka i kartka spadną na podłogę ponownie w tym samym czasie. Opór powietrza pokonywany był przez książkę. Kartka leżąca na książce nie musiała tego oporu pokonywać, dlatego spadła równocześnie z książką.



Rys. 2.22. Badanie prędkości spadania książki i kartki papieru.

PYTANIA I ZADANIA

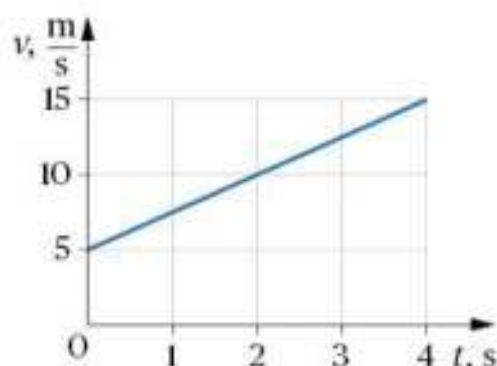
- 1*. Z lufy karabinu o długości $l = 64$ cm wylatuje pocisk z prędkością $v = 700 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Oblicz czas ruchu pocisku w lufie oraz jego przyspieszenie. Zakładamy, że ruch pocisku w lufie jest jednostajnie przyspieszony.
- 2*. Samolot w czasie startu porusza się z przyspieszeniem $1,25 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Oblicz czas i drogę przebytą podczas startu, jeżeli prędkość, z jaką samolot unosi się w powietrze, wynosi $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Oblicz drogę, jaką przebędzie samolot od końca piątej sekundy do końca dziesiątej sekundy ruchu.
3. Wykres przedstawia zależność prędkości od czasu dla pewnego ruchu. Opisz w zeszycie ten ruch i oblicz drogę przebytą przez ciało w czasie 4 sekund.



Rys. 2.23. Wykres zależności prędkości od czasu do zadania 3.

4. Ciało spada swobodnie z wysokości $h = 30$ m nad ziemią. Oblicz jego prędkość w chwili, gdy znajduje się na wysokości $\frac{1}{3}h$.

5. Z jakiej wysokości musiałoby spaść w próżni ciało, aby rozpędzić się do prędkości $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$?
6. Wykres przedstawia zależność prędkości od czasu ciała poruszającego się ruchem prostoliniowym. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.



Rys. 2.24. Wykres zależności prędkości od czasu do zadania 6.

1.	Przyspieszenie tego ciała wynosi $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.	P	F
2.	Ciało to w ciągu drugiej i trzeciej sekundy (łącznie) przebywa drogę 25 m.	P	F
3.	W jednakowych odstępach czasu prędkość tego ciała wzrasta o tę samą wartość.	P	F
4.	Ciało porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej.	P	F

7. Ciało spada swobodnie z wysokości $h = 20 \text{ m}$. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

1.	Ciało to porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym.	P	F
2.	Osiąga prędkość końcową $v = 19,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.	P	F
3.	Uderzy w ziemię po czasie $t = 1 \text{ s}$.	P	F

8. Jeżeli ciało, poruszając się ruchem jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej, przebyło w czasie pierwszych 10 s drogę 25 cm, to jego przyspieszenie wynosiło:

- A. $0,005 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ B. $0,005 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ C. $2,5 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ D. $2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

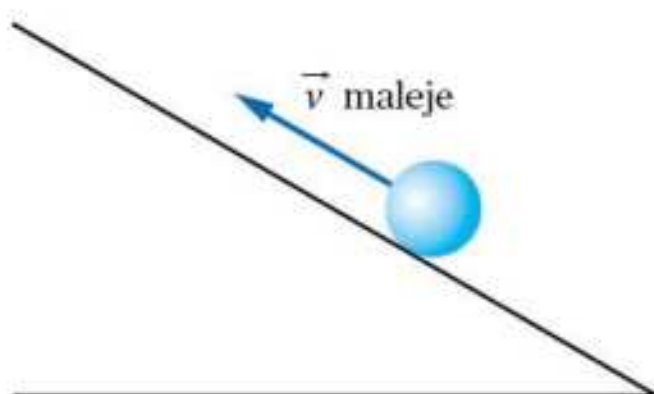
2.4. Ruch prostoliniowy jednostajnie opóźniony

W ruchu prostoliniowym jednostajnie opóźnionym (tak jak w ruchu jednostajnie przyspieszonym) przyspieszenie jest stałe: $a = \text{const}$. Przyspieszenie w ruchu opóźnionym jest nazywane **opóźnieniem**.

Ruch prostoliniowy jednostajnie opóźniony jest to ruch, którego torem jest linia prosta, w którym prędkość maleje o tę samą wartość w jednakowych przedziałach czasu, a przyspieszenie jest stałe.



Przykładem ruchu prostoliniowego jednostajnie opóźnionego jest ruch, jaki wykonuje ciało wyrzucone pionowo do góry w fazie wznoszenia lub ruch kulki toczącej się pod górę równi pochyłej.



Rys. 2.25. Kula tocząca się pod górę równi pochyłej zmniejsza swoją prędkość.

W ruchu jednostajnie opóźnionym prostoliniowym wartość prędkości v równomiernie maleje, to znaczy, że zmiany prędkości w jednakowych odstępach czasu są jednakowe. Aby uzyskać zależność prędkości od czasu, do wzoru na przyspieszenie: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ wstawiamy zmianę prędkości: $\Delta v = v_0 - v$. Tym razem od prędkości początkowej v_0 odejmujemy prędkość końcową v (o mniejszej wartości), aby wartość przyspieszenia była dodatnia:

$$a = \frac{v_0 - v}{\Delta t}.$$

Po przekształceniu otrzymujemy:

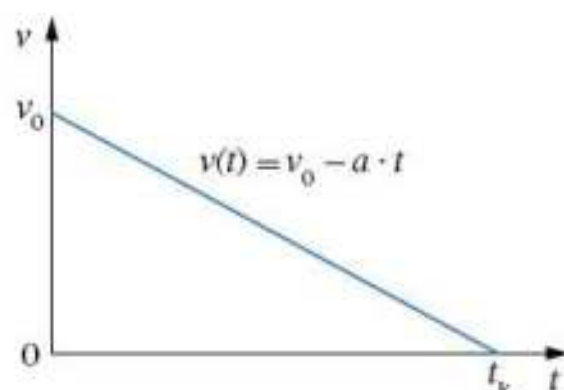
$$v = v_0 - a \cdot \Delta t,$$

gdzie: v to prędkość końcowa (po upływie czasu Δt) w ruchu jednostajnie opóźnionym, v_0 – prędkość początkowa, a – przyspieszenie.

Gdy opis ruchu rozpoczynamy w chwili $t_0 = 0$, wówczas $\Delta t = t$ i otrzymujemy:

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

Wykresem zależności $v(t)$ jest linia prosta przedstawiona na rysunku.

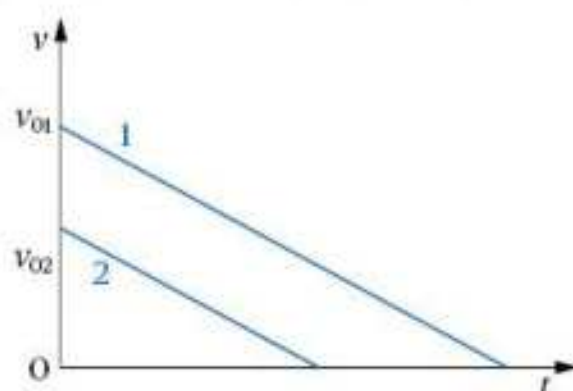


Rys. 2.26. Wykres przedstawiający zależność prędkości od czasu w ruchu jednostajnie opóźnionym.

Gdy ciało się zatrzymuje, czyli prędkość końcowa maleje do zera: ($v = 0$), to czas, jaki upłynie do chwili zatrzymania t_k , można obliczyć ze wzoru:

$$t_k = \frac{v_0}{a}.$$

Porównajmy, jak będą wyglądać wykresy $v(t)$ dla dwóch ciał poruszających się z takimi samymi przyspieszeniami, ale z różnymi prędkościami początkowymi.



Rys. 2.27. Wykresy zależności prędkości od czasu dla dwóch ciał poruszających się ruchem jednostajnie opóźnionym z takimi samymi przyspieszeniami.

Drogę Δs przebytą przez ciało w czasie Δt w ruchu jednostajnie opóźnionym, można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta s = v_0 \cdot \Delta t - \frac{a \cdot (\Delta t)^2}{2}$$

Przy założeniu, że $s_0 = 0$, kiedy $t_0 = 0$, mamy prostszą postać wzoru:

$$s = v_0 t - \frac{at^2}{2},$$

gdzie: s to droga przebyta w czasie t ruchem jednostajnie opóźnionym, v_0 – prędkość początkowa, a – przyspieszenie.

Wzór ten jest nazywany **równaniem drogi w ruchu jednostajnie opóźnionym**.

Chcesz wiedzieć więcej?

Wykresem zależności drogi od czasu $s(t)$ jest rosnąca część paraboli zwróconej ramionami w dół (droga nie może się zmniejszać wraz z upływem czasu). Linia wykresu przechodzi przez początek układu współrzędnych, gdyż dla $t = 0, s = 0$.



Rys. 2.28. Wykres zależności drogi od czasu w ruchu jednostajnie opóźnionym.

Przykład 1

Oblicz, z jakim opóźnieniem poruszał się krążek hokejowy, który mając prędkość początkową $12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, zatrzymał się po przebyciu drogi 20 m. Jaki był czas jego ruchu?

Rozwiązanie:

$$v_0 = 12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$s = 20 \text{ m}$$

$v = 0$ (prędkość końcowa jest równa zero, gdyż krążek się zatrzymał)

$$a = ?$$

$$t_k = ?$$

$$v = v_0 - at$$

Ponieważ prędkość końcowa jest równa zero, możemy zapisać:

$$0 = v_0 - at_k$$

Po przekształceniu mamy:

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

Otrzymane wyrażenie wstawiamy do wzoru na drogę:

$$s = v_0 t_k - \frac{at_k^2}{2} = \frac{v_0^2}{a} - \frac{a \cdot \frac{v_0^2}{a^2}}{2},$$

$$s = \frac{v_0^2}{a} - \frac{v_0^2}{2a} = \frac{v_0^2}{2a},$$

Po przekształceniu uzyskamy opóźnienie:

$$a = \frac{v_0^2}{2s}$$

$$a = \frac{144 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{40 \text{ m}} = 3,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2},$$

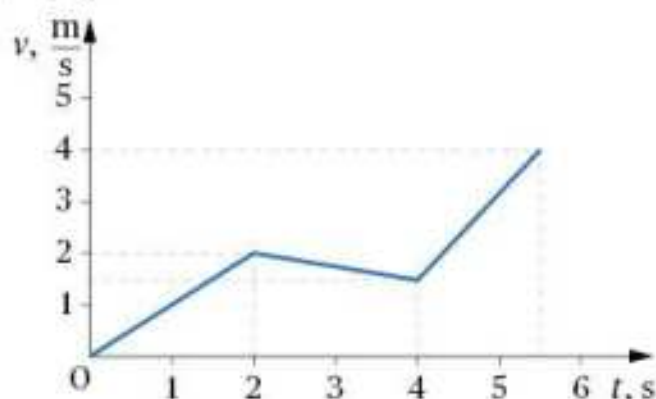
i czas:

$$t = \frac{v_0}{a}, \quad t = \frac{12 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 3,3 \text{ s}.$$



Przykład 2

Wykres przedstawia zależność prędkości ciała do czasu. Oblicz przyspieszenie ciała w chwilach $t_1 = 1 \text{ s}$, $t_2 = 3 \text{ s}$, $t_3 = 5 \text{ s}$.



Rys. 2.29. Wykres do przykładu 2.

Rozwiązanie:

W czasie dwóch pierwszych sekund ciało poruszało się ruchem jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej, w czasie dwóch następnych – ruchem jednostajnie opóźnionym, a przez następne 1,5 sekundy – jednostajnie przyspieszonym.

Przyspieszenie w pierwszej fazie ruchu wynosiło:

$$a_1 = \frac{\Delta v_1}{\Delta t_1}, \quad a_1 = \frac{2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \text{ s}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

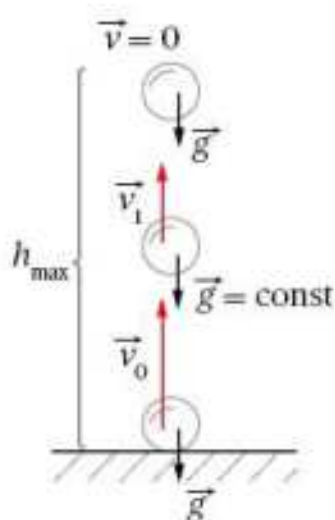
A w drugiej fazie:

$$a_2 = \frac{\Delta v_2}{\Delta t_2}, \quad a_2 = \frac{0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \text{ s}} = 0,25 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Przyspieszenie w ostatniej fazie:

$$a_3 = \frac{\Delta v_3}{\Delta t_3}, \quad a_3 = \frac{2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,5 \text{ s}} = 1,67 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Prostym przykładem ruchu prostoliniowego jednostajnie opóźnionego jest ruch, jaki wykonuje ciało wyrzucone z prędkością początkową $\vec{v}_0$ pionowo do góry. Gdy ciało ma niewielkie rozmiary i dużą masę, można zaniedbać opór powietrza – wówczas ciało porusza się ze stałym przyspieszeniem ziemskim $\vec{g}$. Wektor prędkości jest zwrócony pionowo w górę, a wektor przyspieszenia ziemskiego w dół. Prędkość maleje liniowo do zera w chwili osiągnięcia maksymalnej wysokości.



Rys. 2.30. Wektory prędkości i wektory przyspieszenia ciała wyrzuconego pionowo w górę.

Aby obliczyć czas t_w wznoszenia na maksymalną wysokość, do wzoru na prędkość w ruchu jednostajnie opóźnionym zamiast dowolnego przyspieszenia a wstawiamy przyspieszenie ziemskie g , a za prędkość końcową zero:

$$0 = v_0 - g \cdot t_w.$$

Po przekształceniu otrzymamy:

$$t_w = \frac{v_0}{g}.$$

Chcąc obliczyć maksymalną wysokość, na którą wzniesie się ciało, do wzoru na drogę w ruchu jednostajnie opóźnionym zamiast drogi wstawiamy maksymalną wysokość $s = h_{\max}$, za a przyspieszenie ziemskie g i za t – czas wznoszenia na maksymalną wysokość t_w .

$$h_{\max} = v_0 t_w - \frac{g \cdot t_w^2}{2}$$

$$h_{\max} = v_0 \frac{v_0}{g} - \frac{g}{2} \cdot \left(\frac{v_0}{g} \right)^2 = \frac{v_0^2}{g} - \frac{v_0^2}{2g}$$

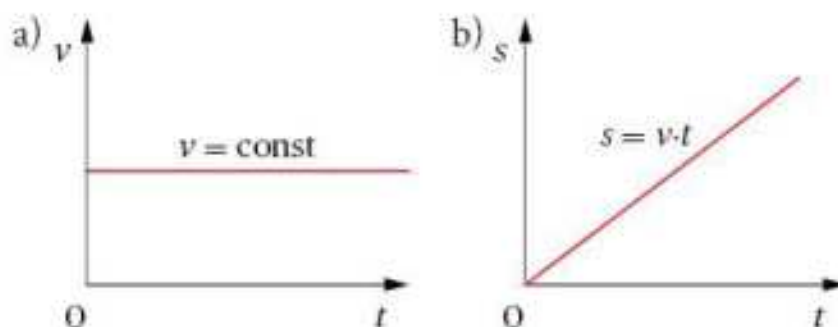
$$h_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}$$

Zapamiętaj

W **rzucie pionowym w górę** zarówno wysokość maksymalna, jak i czas wznoszenia na maksymalną wysokość zależą tylko od prędkości początkowej v_0 , a nie zależą od masy ciała.

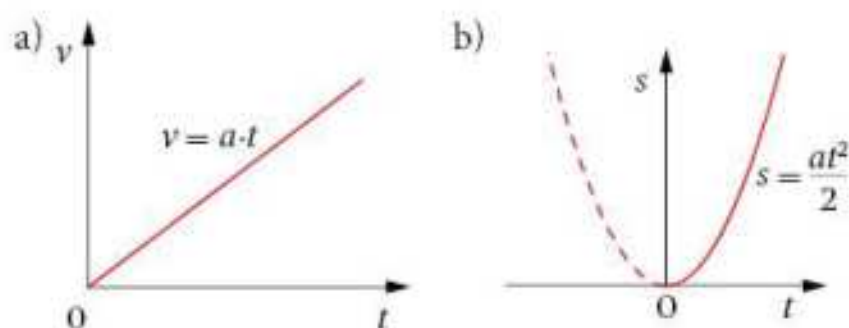
Zestawienie wykresów ilustrujących ruchy prosto- liniowe

- Ruch jednostajny



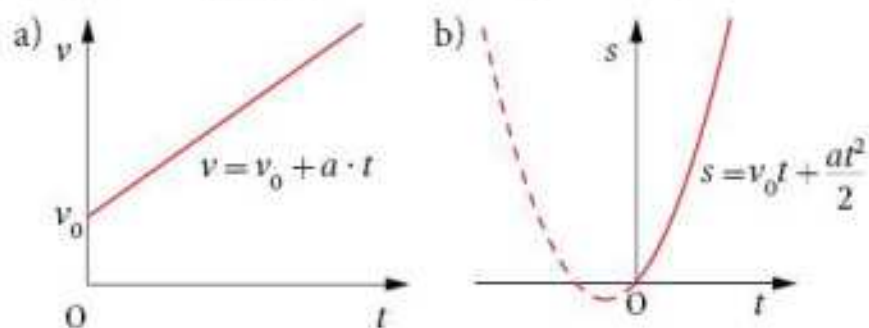
Rys. 2.31. Wykresy zależności: a) prędkości od czasu $v(t)$, b) drogi od czasu $s(t)$ w ruchu jednostajnym.

- Ruch jednostajnie przyspieszony bez prędkości początkowej ($v_0 = 0$)



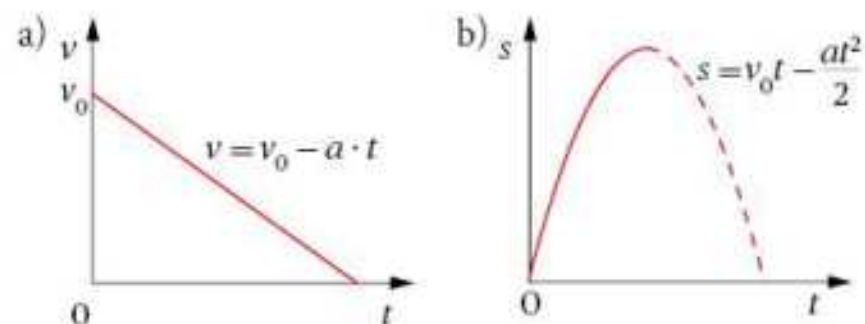
Rys. 2.32. Wykresy zależności: a) prędkości od czasu $v(t)$, b) drogi od czasu $s(t)$ w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej.

- Ruch jednostajnie przyspieszony z prędkością początkową ($v_0 \neq 0$)



Rys. 2.33. Wykresy zależności: a) prędkości od czasu $v(t)$, b) drogi od czasu $s(t)$ w ruchu jednostajnie przyspieszonym z prędkością początkową.

- Ruch jednostajnie opóźniony



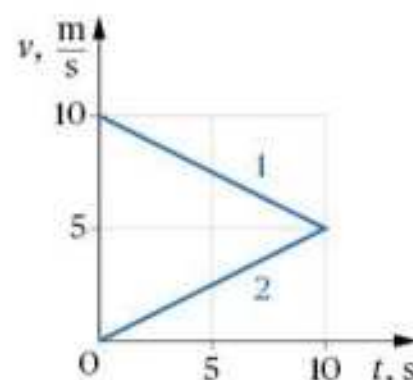
Rys. 2.34. Wykresy zależności: a) prędkości od czasu $v(t)$, b) drogi od czasu $s(t)$ w ruchu jednostajnie opóźnionym.

PYTANIA I ZADANIA



- 1*. Wagon popchnięty przez lokomotywę przejechał do chwili zatrzymania drogę 37,5 m w czasie 15 s. Oblicz prędkość początkową wagonu i jego opóźnienie.
- 2*. Samochód poruszający się z prędkością $v_1 = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ zwalnia na drodze $s = 40$ m do prędkości $v_2 = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Oblicz jego przyspieszenie i czas hamowania.
- 3*. Pociąg poruszający się ruchem jednostajnie opóźnionym zmniejszył swą prędkość do wartości będącej połową prędkości początkowej na drodze 1,5 km w czasie 100 sekund. Oblicz prędkość początkową tego pociągu.
4. Piłkę rzucono pionowo do góry z prędkością początkową $8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Na jaką maksymalną wysokość wzniesie się piłka? Jaka będzie prędkość piłki na wysokości 2 m nad ziemią?
5. Oblicz najmniejszą prędkość, z jaką trzeba rzucić piłkę pionowo w górę, aby dotarła do poziomu balkonu na trzecim piętrze. Odległość między sąsiednimi poziomami budynku wynosi 3 m.
- 6*. Mała rakietka modelarska została wystrzelona do góry z prędkością początkową $v_0 = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. W najwyższym punkcie toru rozwija się spadochronik i rakietka opada w dół ruchem jednostajnym. Oblicz prędkość spadania rakietki, jeśli czas od chwili wystrzelenia do chwili upadku na ziemię wynosi $t = 1,5$ min.
7. Wykres przedstawia zależność prędkości od czasu dla dwóch ciał poruszających się ruchem prostoliniowym. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

1.	Ciało 1 przebyło dwa razy większą drogę niż ciało 2.	P	F
2.	Stosunek przyspieszeń ciał wynosi -1 .	P	F
3.	W ciągu 10 s ciało 2 przebyło drogę 50 m.	P	F



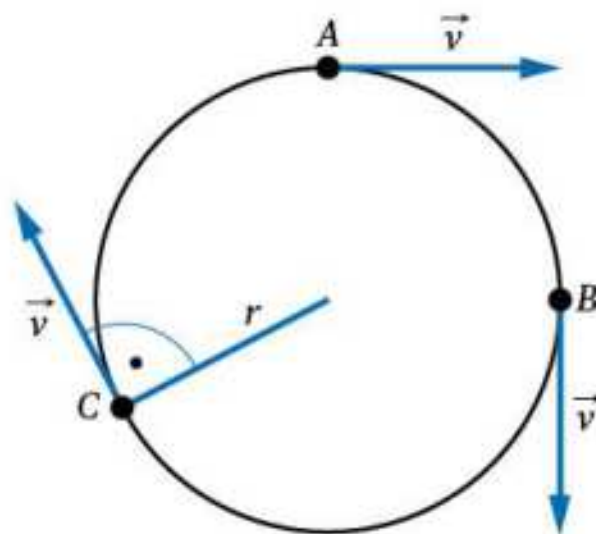
Rys. 2.35. Wykres zależności prędkości od czasu do zadania 7.

8. Ciało rzucono z ziemi pionowo w górę z prędkością o wartości $v_0 = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Po 10 sekundach od chwili wyrzucenia ciało to:
 - A. osiągnie największą wysokość,
 - B. akurat zetknie się z ziemią,
 - C. będzie spoczywać na ziemi,
 - D. spadając, znajdzie się na wysokości 1 m nad ziemią.
9. Aby ciało wzniosło się na maksymalną wysokość 45 m, trzeba je wyrzucić pionowo z prędkością początkową o wartości:

A. $45 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
B. $30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
C. $900 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
D. $90 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

2.5. Ruch jednostajny po okręgu

Ruch jednostajny po okręgu jest szczególnym przypadkiem ruchu krzywoliniowego. W tym ruchu wartość wektora prędkości v jest stała – ciało nie przyspiesza ani nie zwalnia. Kierunek wektora prędkości $\vec{v}$, nazywanej **prędkością liniową**, ciągle się zmienia i jest w każdym punkcie styczny do okręgu (prostopadły do promienia okręgu), dlatego wektor prędkości nie jest stały: $\vec{v} \neq \text{const}$.



Rys. 2.36. Wektory prędkości liniowej $\vec{v}$ w ruchu jednostajnym po okręgu mają tę samą wartość (długość), ale różne kierunki.



Ruch jednostajny po okręgu jest to ruch, którego torem jest okrąg, a wartość wektora prędkości v jest stała.

Przykładami ruchu jednostajnego po okręgu są: ruch, jaki wykonuje koniec wskazówki zegara, lub ruch szklanki położonej na brzegu obrotowego talerza w kuchence mikrofalowej.



Rys. 2.37. Przykłady ruchu jednostajnego po okręgu: a) szklanka w kuchence mikrofalowej podgrzewającej napój, b) wskazówki zegara z mechanizmem pływącym.

Ruch po okręgu jest ruchem okresowym, powtarzającym się (ciało wykonuje pierwszy obieg po okręgu, drugi i następne), dlatego do jego opisu wprowadza się dwie wielkości fizyczne: okres ruchu i częstotliwość. Wielkości te stosuje się także do opisu wielu innych zjawisk zachodzących w powtarzający się (cykliczny) sposób, np. do opisu ruchu drgającego czy do opisu prądu przemiennego.

Okres ruchu T jest to czas jednego pełnego obiegu ciała po okręgu.

Jednostką okresu w układzie SI jest sekunda. Na przykład okres obiegu końca godzinowej wskazówki zegara wynosi 43200 s.

Częstotliwość f jest to liczba obiegów po okręgu wykonanych w czasie jednej sekundy.

Częstotliwość f jest powiązana z okresem T w sposób:

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

Zgodnie z powyższym wzorem częstotliwość można też zdefiniować jako odwrotność okresu.

Jednostką częstotliwości jest herc.

Jeden herc (1 Hz) jest to częstotliwość takiego ruchu, w którym jeden obieg po okręgu jest wykonany w ciągu jednej sekundy $\left(1 \text{ Hz} = \frac{1}{\text{s}}\right)$.

W ruchu jednostajnym po okręgu okres i częstotliwość są stałe.

Wartość prędkości liniowej można obliczyć, dzieląc drogę, jaką przebędzie ciało przy jednokrotnym obiegu okręgu (równą długości okręgu $2\pi r$), przez czas tego ruchu (czyli okres T):

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

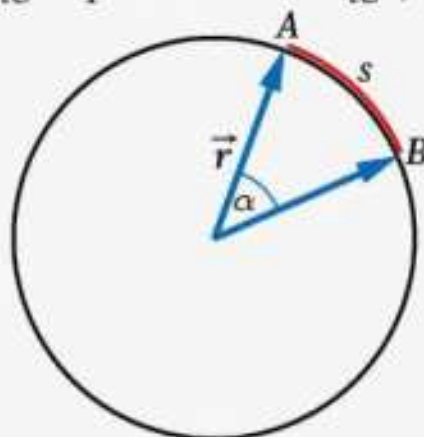
lub po podstawieniu $f = \frac{1}{T}$:

$$v = 2\pi r f.$$

Chcesz wiedzieć więcej?

Położenie ciała na okręgu określamy za pomocą wektora $\vec{r}$ nazywanego **promieniem wodzącym**.

Jest to wektor łączący środek okręgu z punktem na okręgu, w którym znajduje się ciało.



Rys. 2.38. W ruchu po okręgu odpowiednikiem drogi s jest kąt α zakreślony przez promień wodzący w czasie ruchu.



Przykład 1

Kamień szlifierski o średnicy $d = 20 \text{ cm}$ wykonuje $n = 1200 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$. Z jaką prędkością wylatują iskry podczas szlifowania przedmiotów?

$$d = 20 \text{ cm} \Rightarrow r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$n = 1200 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$$

$$v = ?$$

Znając liczbę obrotów wykonywanych w czasie 1 minuty, obliczymy najpierw okres ruchu:

$$T = \frac{60 \text{ min}}{1200} = \frac{60 \text{ s}}{1200} = \frac{1}{20} \text{ s} = 0,05 \text{ s}.$$

Prędkość, z jaką wylatują iskry, jest równa prędkości liniowej punktów na obrzeżu kamienia:

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

$$v = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \text{ m}}{0,05 \text{ s}} = \frac{0,628 \text{ m}}{0,05 \text{ s}} = 12,56 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

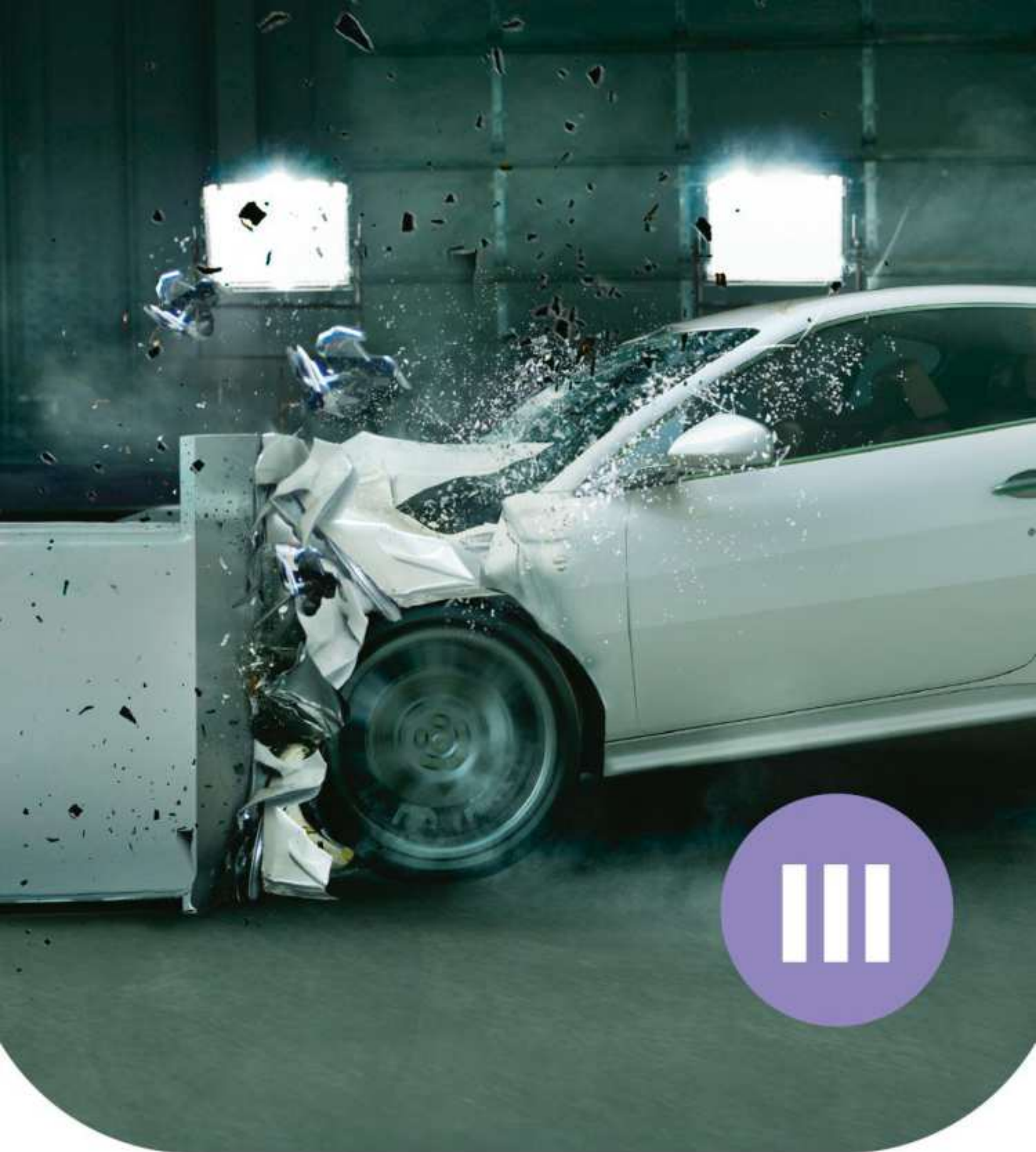


PYTANIA I ZADANIA

1. Z jaką prędkością liniową porusza się biedronka, która usiadła na płycie gramofonowej w odległości 15 cm od osi obrotu? Płyta wykonuje 45 obrotów na minutę.
2. Oszacuj wartość prędkości liniowej Ziemi w ruchu dookoła Słońca. Przyjmij, że orbita jest kołowa i jej promień wynosi 150 milionów km.
3. Ciało porusza się ruchem jednostajnym po okręgu. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

1.	W jednakowych odcinkach czasu promień wodzący zakresła jednakowe kąty.	P	F
2.	Koniec wektora promienia wodzącego porusza się z prędkością, której wartość wynosi: $v = 2\pi rT$, gdzie T to okres.	P	F
3.	Wektor prędkości liniowej jest w każdej chwili styczny do okręgu.	P	F

4. Punkt materialny porusza się ruchem jednostajnym po okręgu o promieniu 1 m z prędkością $3,14 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. W czasie 1 s promień wodzący tego punktu zakresli kąt równy:
A. 360° B. 270° C. 180° D. 90°



DYNAMIKA

3.1. Podstawowe pojęcia dynamiki. I zasada dynamiki

Masa ciała i siła

W każdym dziale fizyki wykorzystujemy wielkości fizyczne. W kinematyce pierwszą wprowadzoną wielkością był czas. W dynamice taką wielkością jest **masa** m .

Masę ciała wyznaczamy za pomocą **wagi**. W szkole posługujemy się najczęściej wagą szalkową. Ważenie polega na porównaniu masy ciała umieszczonego na jednej szalce wagi z masą odważników umieszczonych na drugiej szalce.

Podstawową jednostką masy w układzie SI jest kilogram (1 kg). Często stosowane są też inne jednostki masy, np. gram (1 g = 0,001 kg) lub tona (1 t = 1000 kg).

Masę jednego kilograma ma jeden litr wody destylowanej w temperaturze 4°C.

Najważniejszą wielkością występującą w dynamice jest **siła** $\vec{F}$.



Rys. 3.1. Szalkowa waga laboratoryjna z zestawem odważników.

Siła jest to wielkość fizyczna wektorowa, opisująca wzajemne oddziaływanie ciał, w wyniku którego następuje zmiana prędkości ciała lub jego odkształcenie.



Zmiana prędkości występuje, gdy ciało zostaje wprowadzone w ruch, zostaje zatrzymane albo zostaje zmieniony kierunek wektora prędkości. W każdym z tych przypadków pojawi się przyspieszenie.

Odkształcenie może polegać na przykład na rozciągnięciu lub ściśnięciu sprężyny albo na wygięciu sprężystej listwy.

Jednostką siły jest **niuton** (1 N). Zdefiniujemy go w następnym rozdziale.

Do pomiaru siły można wykorzystać skutki, jakie powoduje jej działanie – zmianę prędkości ciała lub jego odkształcenie. W praktyce łatwiej jest mierzyć odkształcenie niż zmianę prędkości. Dlatego do pomiaru siły stosuje się **siłomierz** – jest to sprężyna zamocowana na jednym końcu i wyskalowana, na przykład przez zawieszanie na niej coraz większej liczby jednakowych obciążników i zaznaczanie wielkości jej wydłużenia. Sprężyna nadaje się

Rys. 3.2. Siłomierz.

szczególnie do pomiaru siły, ponieważ w dużym zakresie swoich odkształceń wykazuje proporcjonalność między wartością siły rozciągającej i wydłużeniem. Dlatego wartość siły możemy wyznaczyć, mierząc wydłużenie sprężyny.

Jeżeli na ciało działa równocześnie kilka sił, wówczas obliczamy siłę wypadkową. **Siła wypadkowa** $\vec{F}_w$ jest to wektorowa suma wszystkich sił działających na ciało. Poszczególne siły są nazywane **siłami składowymi** $\vec{F}_1, \vec{F}_2$:

$$\vec{F}_w = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots$$

Siłę wypadkową oblicza się zgodnie z regułami dodawania wektorów.

Przykład 1

Na ciało działają przedstawione na rysunku siły o wartościach:

$F_1 = 300 \text{ N}$, $F_2 = 450 \text{ N}$, $F_3 = 200 \text{ N}$, $F_4 = 100 \text{ N}$, $F_5 = 150 \text{ N}$. Oblicz wartość siły wypadkowej oraz określ kierunek i zwrot wektora tej siły.

Rozwiązanie

$$\vec{F}_w = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \vec{F}_5,$$

$$\vec{F}_w = \underbrace{\vec{F}_2 + \vec{F}_5}_{\vec{F}_{25}} + \underbrace{\vec{F}_1 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4}_{\vec{F}_{134}}.$$

Wprowadzamy wektor pomocniczy $\vec{F}_{25}$, który jest sumą wektorów sił działających poziomo:

$$\vec{F}_{25} = \vec{F}_2 + \vec{F}_5;$$

jego wartość wynosi:

$$F_{25} = F_2 - F_5 = 450 \text{ N} - 150 \text{ N} = 300 \text{ N}$$

Wektor $\vec{F}_{134}$ jest sumą wektorów działających w kierunku pionowym: $\vec{F}_{134} = \vec{F}_1 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4$,

jego wartość wynosi: $F_{134} = F_1 - F_3 - F_4 = 300 \text{ N} - 200 \text{ N} - 100 \text{ N} = 0$.

Wektor siły wypadkowej ma więc taką samą wartość jak wektor $\vec{F}_{25}$:

$$F_w = F_{25} = 300 \text{ N}$$

Kierunek i zwrot wektora siły wypadkowej $\vec{F}_w$ jest taki sam jak wektora $\vec{F}_2$.

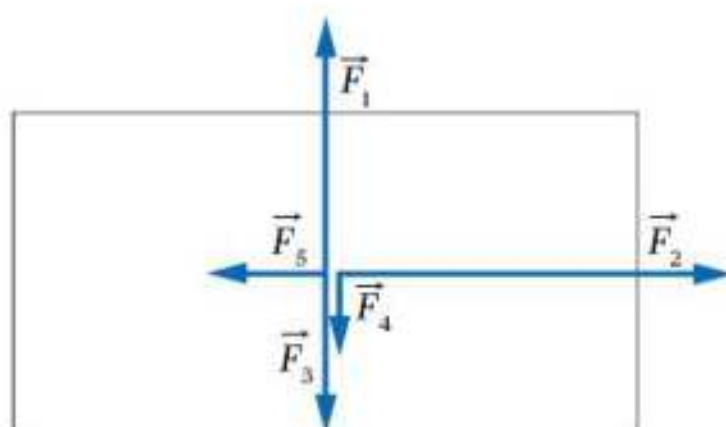
Najważniejszą siłą, z którą spotykamy się na co dzień, jest **siła ciężkości** $\vec{F}_c$, która jest też nazywana **ciężarem ciała**. Jest to siła, z jaką Ziemia przyciąga do siebie ciała znajdujące się na jej powierzchni lub w jej pobliżu. Działa ona na wszystkie ciała i jest zawsze skierowana pionowo w dół, powodując spadanie ciał. Siła ciężkości $\vec{F}_c$ jest powiązana z masą ciała m wzorem:

$$\vec{F}_c = m \cdot \vec{g},$$

gdzie: g to przyspieszenie ziemskie.

Inną siłą, z którą również spotykamy się na co dzień, jest siła tarcia. Początkowo będziemy ją pomijać, w celu uproszczenia naszych rozważań, a następnie wprowadzimy ją w rozdziale 3.3., aby dokładnie analizować rzeczywiste zachowanie się ciał.

Nie należy mylić pojęć: masa, waga i ciężar. W języku potocznym są one stosowane wymiennie, ale w fizyce mają ściśle określone znaczenia.



Rys. 3.3. Rysunek do przykładu 1.

I zasada dynamiki

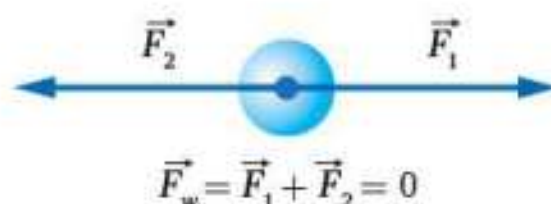
Cała dynamika klasyczna opiera się na kilku filarach – trzy spośród nich to zasady dynamiki sformułowane przez Izaaka Newtona (czyt. niutona) ponad trzysta lat temu. Najważniejsze prawa fizyki są nazywane **zasadami**.

Pierwsza zasada dynamiki (zasada bezwładności)



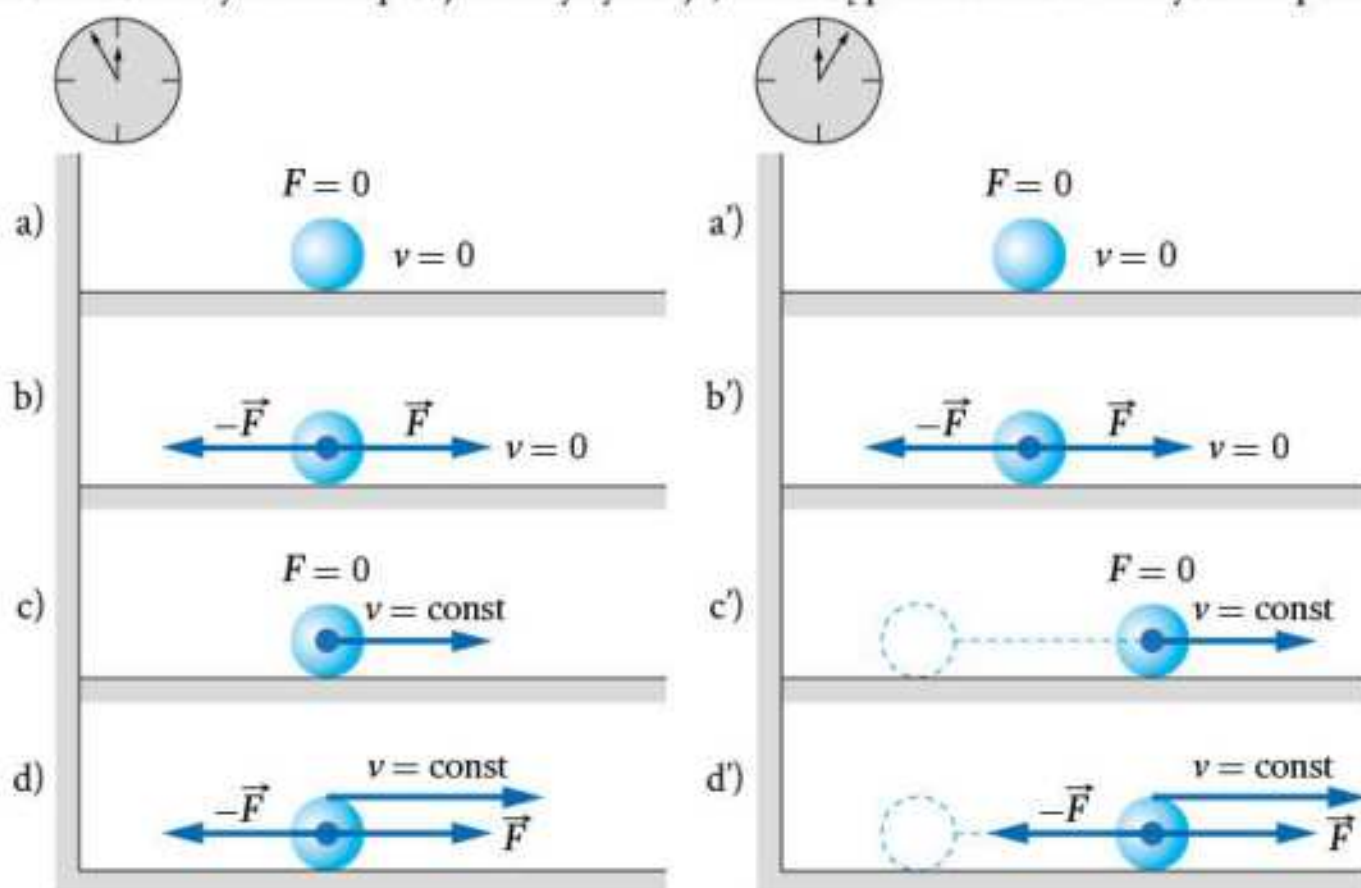
Jeżeli na ciało nie działają żadne siły lub działają siły równoważące się, to ciało pozostaje w spoczynku (jeśli było w spoczynku) lub porusza się ruchem prostoliniowym jednostajnym (jeśli było w takim ruchu).

Siły równoważące się jest to układ sił, dla którego siła wypadkowa jest równa zero.



Rys. 3.4. Siły równoważące się.

Pierwsza zasada dynamiki opisuje cztery sytuacje, które są przedstawione na rysunku poniżej.



Rys. 3.5. Cztery przypadki wynikające z pierwszej zasady dynamiki. Rysunki po lewej stronie przedstawiają ciało w chwili początkowej, po prawej stronie – w chwili końcowej.

Z pierwszej zasady dynamiki wynika, że efekt działania sił równoważących się jest taki sam, jak wtedy, gdy nie działają żadne siły. Gdy ciało początkowo było w spoczynku, dalej pozostanie w spoczynku (rysunki 3.5. a i b). Gdy ciało początkowo się poruszało, dalej będzie się poruszać z tą samą prędkością $\vec{v}$ (rysunki 3.5. c i d).

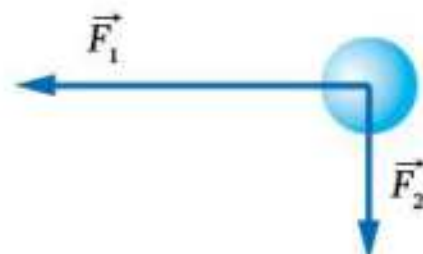


Pierwsza zasada dynamiki mówi o pewnej właściwości ciał, jaką jest **bezwładność**. Bezwładność jest to cecha ciała polegająca na tym, że bez działania siły nie może ono zmienić swojej prędkości. Bez działania siły nie może też ruszyć z miejsca ani się zatrzymać. Jeżeli zaś na ciało działa niezrównoważona siła, bezwładność objawia się tym, że prędkość ciała nie zmienia się nagle, lecz stopniowo – i to

tym wolniej, im większa jest masa ciała. Wynika stąd, że miarą bezwładności jest masa ciała. Na przykład ciężarówka z ładunkiem ma dużą masę i dużą bezwładność – jej prędkość rośnie wolno, natomiast samochód osobowy ma mniejszą masę i mniejszą bezwładność – jego prędkość rośnie szybciej.

PYTANIA I ZADANIA

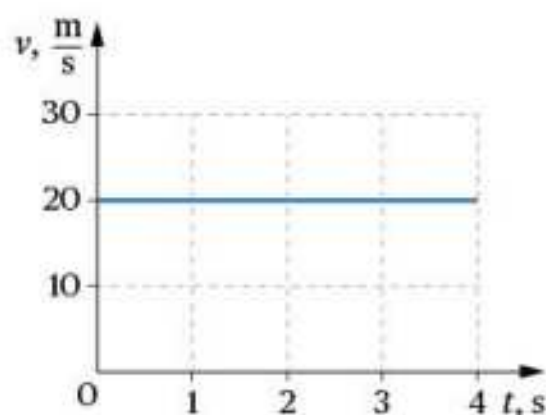
1. Na zwykłej torebce cukru znajdziemy napis „1 kg”. Czy jest to waga, ciężar czy masa tego cukru?
2. Dlaczego, skacząc w górę i odrywając się od podłogi w jadącym ruchem jednostajnym wagonie, spadniemy na to samo, a nie inne miejsce na podłodze (przecież w trakcie naszego podskoku wagon się nieco przemieścił)?
3. Lilka i Piotrek stoją i wspólnie trzymają nieruchomo ciężką torbę o ciężarze 100 N. Piotrek działa siłą 60 N. Jaką siłą działa Lilka?
4. Magnes o masie 50 g przywarł do pionowej, stalowej ścianki. Aby poruszał się on ruchem jednostajnym w dół, trzeba na niego działać pionową siłą o wartości 2,0 N, zwróconą w dół. Jaką pionową siłą trzeba działać na magnes, aby poruszał się on ruchem jednostajnym do góry?
- 5*. Na ciało działają dwie siły przedstawione na rysunku o wartościach: $F_1 = 8 \text{ N}$, $F_2 = 6 \text{ N}$. Oblicz wartość siły wypadkowej.



Rys. 3.6. Rysunek do zadania 5.

6. Wykres przedstawia zależność prędkości od czasu ciała poruszającego się ruchem prostoliniowym. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszyte.

1.	Na ciało działa stała siła.	P	F
2.	W ciągu czterech sekund ciało przebywa drogę $s = 80 \text{ m}$.	P	F
3.	Ciało porusza się ruchem jednostajnie zmiennym.	P	F
4.	Siła wypadkowa działająca na ciało jest równa zero.	P	F



Rys. 3.7. Rysunek do zadania 6.

7. Masa ciała o ciężarze 29,4 N wynosi:
A. 29,4 kg B. 0,3 kg C. 3,0 kg D. 300 g
8. Jeżeli z trzech sił o jednakowym kierunku, działających na ciało będące w spoczynku, dwie mają wartości 20 N i 5 N, to wartość trzeciej siły wynosi:
A. 10 N B. 20 N C. 25 N D. 5 N
9. Jeżeli ciało A porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym z prędkością $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, a ciało B porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym z prędkością $12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, to wypadkowe siły działające na każde z tych ciał spełniają warunek:
A. $F_A = 3 \text{ N}$ i $F_B = 12 \text{ N}$ B. $F_A > F_B$ C. $F_A < F_B$ D. $F_A = F_B = 0$

3.2. Druga i trzecia zasada dynamiki

Pierwsza zasada dynamiki określa warunki, jakie muszą być spełnione, aby prędkość ciała nie uległa zmianie. Druga zasada dynamiki określa z kolei warunek zmiany prędkości ciała. Newton zauważył, że do zmiany prędkości konieczne jest działanie siły. To właśnie siła działająca na ciało wywołuje zmianę prędkości i nadaje mu przyspieszenie.



Druga zasada dynamiki

Jeżeli siły działające na ciało nie równoważą się (czyli siła wypadkowa $\vec{F}_w$ jest różna od zera, ale stała), to ciało porusza się ruchem jednostajnie zmiennym (przyspieszonym lub opóźnionym) z przyspieszeniem wprost proporcjonalnym do siły wypadkowej i odwrotnie proporcjonalnym do masy ciała.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_w}{m}.$$

Kierunek i zwrot przyspieszenia jest zgodny z kierunkiem i zwrotem siły wypadkowej.

Gdy siła wypadkowa (a więc i przyspieszenie) ma zwrot zgodny z wektorem prędkości, to ruch jest jednostajnie przyspieszony, a gdy ma zwrot przeciwny do wektora prędkości, to ruch jest jednostajnie opóźniony.

Gdy na ciało działa tylko jedna siła $\vec{F}$, wstawiamy ją do wzoru w miejsce siły wypadkowej:

$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ i po przekształceniu możemy obliczyć jej wartość:

$$F = ma.$$

Druga zasada dynamiki pozwala zdefiniować jednostkę siły w układzie SI, którą jest niuton.



Jeden **niuton** jest to siła, która działając na ciało o masie 1 kg, nadaje mu przyspieszenie $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

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

Szczególnym przypadkiem poprzedniego wzoru jest wzór na siłę ciężkości: $F_c = mg$, gdzie w miejsce dowolnego przyspieszenia a wstawiliśmy przyspieszenie ziemskie g .

Przykład 1



Oblicz wartość siły działającej w lufie karabinu na pocisk wylatujący z prędkością $v = 800 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, jeżeli jego masa wynosi $m = 5 \text{ g}$. Długość lufy wynosi $l = 64 \text{ cm}$. Zakładamy, że siła działająca na pocisk jest stała.



Rys. 3.8. Rysunek do przykładu 1.

Rozwiązanie:

$$v = 800 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m = 5 \text{ g} = 0,005 \text{ kg}$$

$$l = 64 \text{ cm} = 0,64 \text{ m}$$

$$F = ?$$

Wartość siły obliczymy ze wzoru wynikającego z drugiej zasady dynamiki:

$$F = ma.$$

Przyspieszenie a otrzymamy ze wzorów na drogę ($s = l$) i na prędkość końcową w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej (takim ruchem porusza się pocisk pod działaniem stałej siły pochodzącej od gazów powstałych po spaleniu prochu).

$$\begin{cases} v = at \Rightarrow t = \frac{v}{a} \\ l = \frac{at^2}{2} \end{cases}$$

$$l = \frac{at^2}{2}$$

$$l = \frac{av^2}{2 \cdot a^2} = \frac{v^2}{2 \cdot a}$$

Po przekształceniu:

$$a = \frac{v^2}{2l}.$$

Po podstawieniu danych:

$$a = \frac{\left(800 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 0,64 \text{ m}} = \frac{640000 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{1,28 \text{ m}} = 500000 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

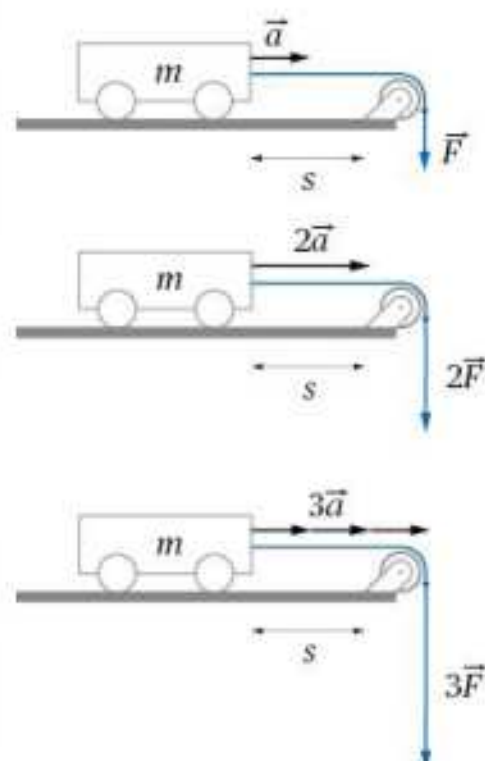
$$F = ma = 0,005 \text{ kg} \cdot 500000 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2500 \text{ N}$$

Drugą zasadę dynamiki można potwierdzić doświadczalnie.

Doświadczenie 1

Do wózka o masie m zaczepiamy nitkę, przerzucamy ją przez bloczek przymocowany do brzegu stołu. Na drugi koniec nitki działamy stałą siłą $\vec{F}$. Pod działaniem stałej siły wózek porusza się coraz szybciej ruchem jednostajnie przyspieszonym. Jego przyspieszenie obliczamy, mierząc czas ruchu t i drogę s przebytą przez wózek. Po przekształceniu wzoru $s = \frac{at^2}{2}$ otrzymujemy wzór na przyspieszenie: $a = \frac{2s}{t^2}$, do którego wstawiamy zmierzone wartości.

Powtarzamy doświadczenie, działając dwa razy większą siłą $2\vec{F}$. Tak jak poprzednio obliczamy przyspieszenie wózka. Okaże się, że jest teraz dwa razy większe. Jeszcze raz powtarzamy doświadczenie, działając siłą trzy razy większą: $3\vec{F}$. Znowu obliczamy przyspieszenie wózka. Okaże się, że tym razem jest trzy razy większe niż na początku. Potwierdziliśmy więc, że wartość przyspieszenia jest wprost proporcjonalna do wartości działającej siły (ile razy rosła siła, tyle razy rosło przyspieszenie): $a \sim F$.

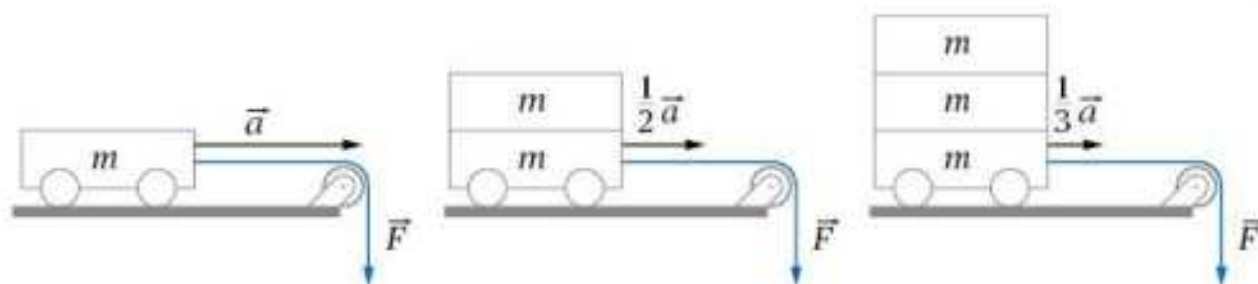


Rys. 3.9. Badanie przyspieszenia wózka pod wpływem działania sił o różnych wartościach.

Bloczek (lub **krażek**) jest to kółko zamocowane na osi z wyżłobieniem na obwodzie, przez które przerzuca się nitkę lub linkę. Linka nie ślizga się po krażku, lecz powoduje jego obrót. Za pomocą krażka możemy zmieniać kierunek siły, nie zmieniając jej wartości.

Doświadczenie 2

Montujemy podobny układ jak poprzednio. Tym razem siła działająca na nitkę jest cały czas taka sama. Zmieniamy zaś masę wózka, nakładając na niego coraz większą liczbę identycznych odważników. Za każdym razem wyznaczamy przyspieszenie wózka, mierząc czas t i drogę s . Okaże się, że dla wózka o dwa razy większej masie jego przyspieszenie jest dwa razy mniejsze. Gdy masę wózka zwiększymy trzykrotnie, jego przyspieszenie zmaleje trzy razy. Potwierdza się, że przyspieszenie jest odwrotnie proporcjonalne do masy: $a \sim \frac{1}{m}$.



Rys. 3.10. Badanie zależności przyspieszenia wózka od jego masy.

Gdy siła działa na układ kilku ciał poruszających się razem (np. połączonych nitką), to przyspieszenie układu jest odwrotnie proporcjonalne do masy całego układu (czyli do sumy mas wszystkich ciał). Stosujemy wówczas wzór na **drugą zasadę dynamiki dla układu ciał**:

$$a = \frac{F_w}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n},$$

gdzie: a oznacza przyspieszenie układu ciał (wszystkie ciała połączone nitką, tworzące układ, poruszają się z takim samym przyspieszeniem),

F_w – siła wypadkowa,

$m_1, m_2, m_3, \dots$ – masy poszczególnych ciał układu.

Przykład 2

Oblicz przyspieszenie układu ciał przedstawionego na rysunku. Masy ciał wynoszą $m_1 = 1 \text{ kg}$, $m_2 = 2 \text{ kg}$, $m_3 = 3 \text{ kg}$.

Rozwiązanie:

$$m_1 = 1 \text{ kg}$$

$$m_2 = 2 \text{ kg}$$

$$m_3 = 3 \text{ kg}$$

$$g \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a = ?$$

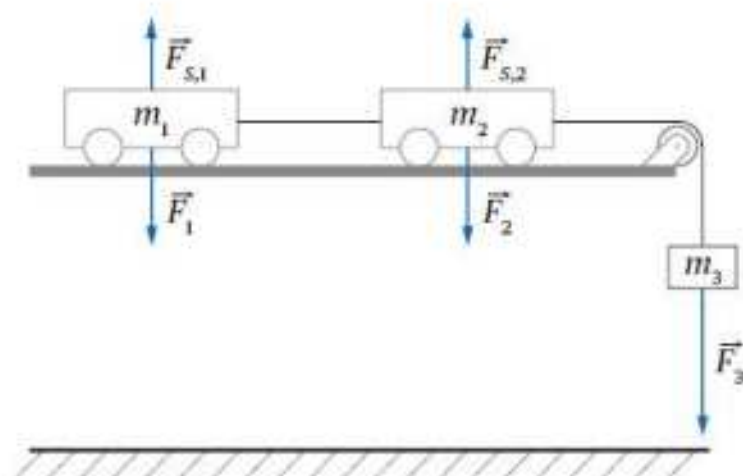
Obliczamy najpierw wartość siły wypadkowej wszystkich sił zewnętrznych działających na układ. Siła ciężkości $\vec{F}_1$ pierwszego klocka jest zrównoważona przez siłę sprężystości podłoża $\vec{F}_{s1}$. Podobnie siła ciężkości drugiego klocka $\vec{F}_2$ i siła sprężystości $\vec{F}_{s2}$ się równoważą. Pozostaje niezrównoważona siła ciężkości trzeciego klocka $\vec{F}_3$ i to właśnie ona jest siłą wypadkową:

$$F_w = F_3 = m_3 g.$$

Masa całego układu jest równa sumie mas wszystkich klocków: $m_1 + m_2 + m_3$.

Stosując wzór na drugą zasadę dynamiki dla układu ciał, otrzymujemy:

$$a = \frac{3 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1 \text{ kg} + 2 \text{ kg} + 3 \text{ kg}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$



Rys. 3.11. Rysunek do przykładu 2.

Druga zasada dynamiki ma niezwykle szeroki zasięg – sprawdza się we wszystkich zjawiskach mechanicznych na Ziemi i w Kosmosie. W odróżnieniu od pierwszej zasady dynamiki, druga jest prawdziwa także wtedy, gdy ciało oprócz ruchu postępowego wykonuje także ruch obrotowy.

Pierwsza i druga zasada dynamiki nie określają, skąd pochodzą siły działające na ciało. Newton stwierdził, że aby na ciało zaczęła działać siła, niezbędne jest drugie ciało, które jest źródłem siły. Dla wszystkich oddziaływań konieczna jest obecność przynajmniej dwóch ciał – każde z nich jest źródłem siły, a jednocześnie przedmiotem działania siły. Oddziałujące na siebie ciała mogą być w bezpośrednim kontakcie (np. piłka w chwili zderzenia ze ścianą), ale mogą też oddziaływać na odległość (np. Ziemia z Księżycem). Zawsze jednak obowiązuje trzecia zasada dynamiki.



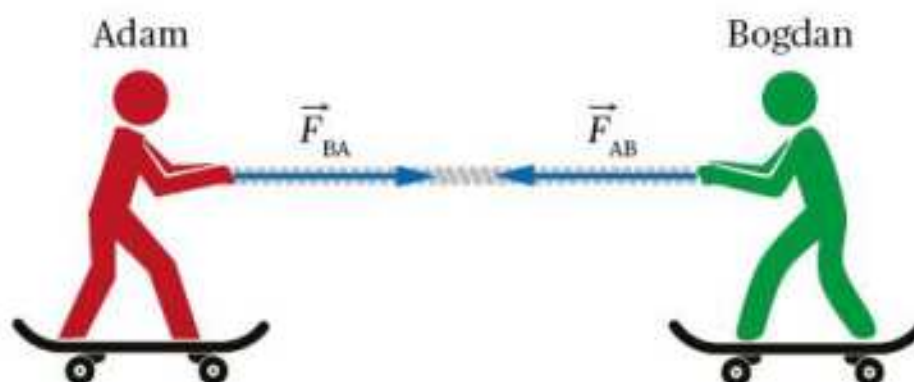
Trzecia zasada dynamiki (zasada akcji i reakcji)

Oddziaływania ciał są wzajemne. Jeżeli ciało A działa na ciało B siłą $\vec{F}_{AB}$, to ciało B działa na ciało A siłą $\vec{F}_{BA}$ o takiej samej wartości, tym samym kierunku, przeciwnym zwrocie i innym punkcie przyłożenia.

Jedną z tych sił nazywa się **siłą akcji**, a drugą **siłą reakcji**. Związek między siłami można zapisać wzorem:

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

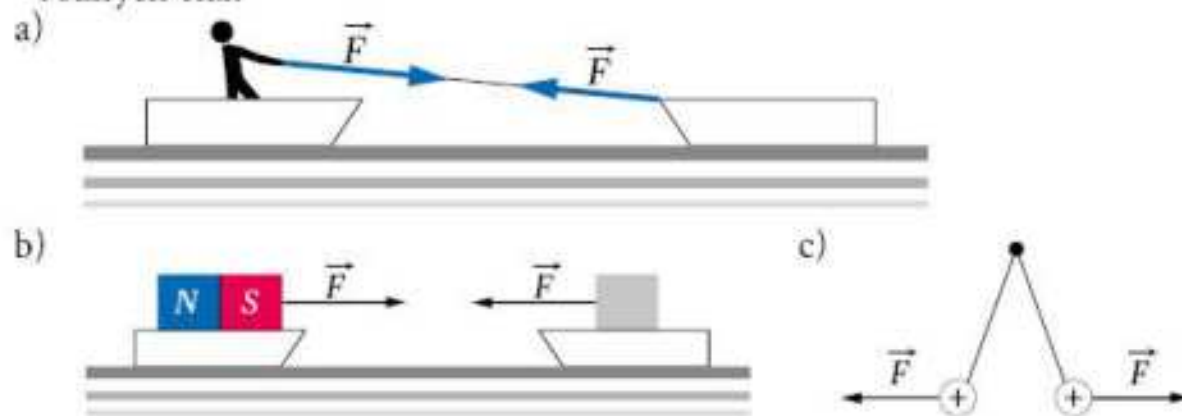
Przypomnijmy, że znak minus mówi o tym, że występujące we wzorze siły to wektory przeciwne, różniące się zwrotami.



Rys. 3.12. Ilustracja trzeciej zasady dynamiki.

Z trzeciej zasady dynamiki wynikają następujące wnioski:

- źródłem siły jest zawsze jakieś ciało; nie jest możliwe istnienie siły niezależnie od jej źródła;
- siły występują zawsze parami, niezbędna jest obecność dwóch ciał, z których każde jest źródłem siły. Na przykład młotek uderzający w kowadło działa na nie siłą zwróconą pionowo w dół; po uderzeniu widzimy, że młotek odskakuje do góry, więc kowadło musi działać na niego siłą zwróconą do góry;
- siły, o których mówi trzecia zasada dynamiki, nie równoważą się, gdyż przyłożone są do różnych ciał.



Rys. 3.13. Przykłady działania trzeciej zasady dynamiki.

Na rysunku a) przedstawiono dwie łódki. W jednej znajduje się chłopiec, który za pomocą liny zaczyna przyciągać do siebie drugą pustą łódź. Obydwie łódki, początkowo nieruchome, zaczynają się do siebie zbliżać. A zatem na obydwie łódki działają siły o przeciwnych zwrotach.

Na rysunku b) mamy dwie małe łódki: na jednej z nich znajduje się silny magnes, na drugiej kawałek stali. Gdy łódki położymy blisko siebie na wodzie, zaczną się wzajemnie do siebie zbliżać. Na obydwie łódki działają siły o przeciwnych zwrotach.

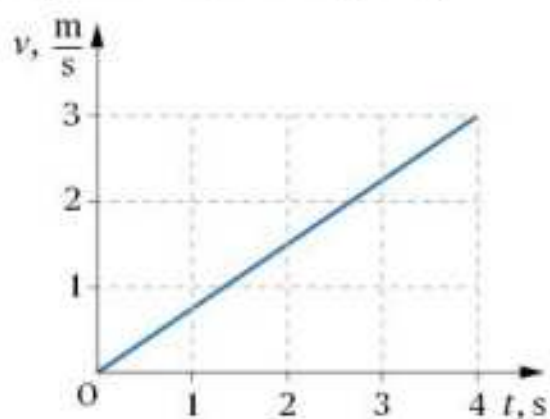
Rysunek c) przedstawia dwie jednakowe kulki naelektryzowane dodatnio, zawieszone na nitkach o jednakowej długości. Obydwie nitki odchyliły się od pionu o taki sam kąt. Wynika stąd, że kulki odpychają się wzajemnie siłami o takich samych wartościach.

PYTANIA I ZADANIA



1. Jaka jest masa ciała, które można podnieść do góry ruchem jednostajnie przyspieszonym na wysokość $h = 10 \text{ m}$ w czasie $t = 10 \text{ s}$, działając siłą $F = 100 \text{ N}$?
- 2*. Pocisk o masie $m = 10 \text{ g}$ poruszający się z prędkością $v = 200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ wbija się w deskę do głębokości $l = 4 \text{ cm}$. Zakładając, że ruch pocisku jest jednostajnie opóźniony, oblicz siłę działającą na pocisk i czas trwania ruchu pocisku w desce.
3. Dopuszczalne opóźnienie przy hamowaniu samochodu (przy którym samochód jeszcze nie wpada w poślizg) wynosi $a = 4,9 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Z jaką maksymalną siłą hamuje wtedy samochód o masie $m = 1200 \text{ kg}$?
4. Aby po płaskiej powierzchni przesunąć ciało o masie $m = 2 \text{ kg}$ ruchem jednostajnym, należy działać poziomą siłą $F = 10 \text{ N}$. Jaką siłą należy działać na to ciało, aby spowodować ruch z przyspieszeniem $a = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$?
5. Wykres przedstawia zależność prędkości od czasu ciała o masie $m = 12 \text{ kg}$ poruszającego się ruchem prostoliniowym. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

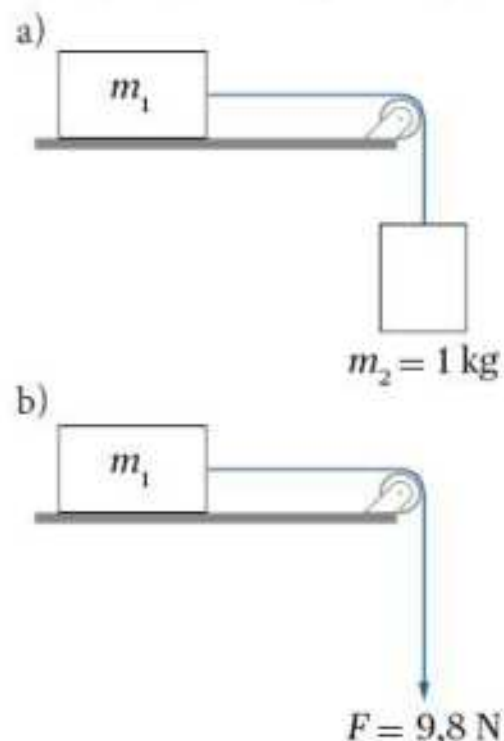
1.	Na ciało działa siła o wartości $F = 8 \text{ N}$.	P	F
2.	W ciągu czasu $t = 3 \text{ s}$ ciało przebędzie drogę $s = 6 \text{ m}$.	P	F
3.	Zależność drogi od czasu jest funkcją liniową.	P	F



Rys. 3.14. Rysunek do zadania 5.

6. Rysunki pokazują dwa sposoby wprowadzania w ruch ciała o masie $m_1 = 10 \text{ kg}$ przy pominięciu tarcia. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

1.	Oba ciała poruszają się z takim samym przyspieszeniem.	P	F
2.	Przyspieszenie ciała na rysunku a) wynosi $0,98 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.	P	F
3.	Prędkość ciała na rysunku b) w ciągu dwóch pierwszych sekund ruchu wzrośnie o $1,96 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.	P	F



Rys. 3.15. Rysunki do zadania 6.

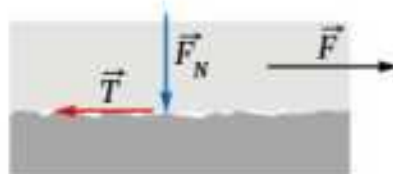
7. Jeżeli na poruszające się ciało działa siła wypadkowa o kierunku równoległym do jego prędkości i o wartości stałej w czasie ruchu, to ciało będzie się poruszało ruchem:
- A. jednostajnym prostoliniowym,
 - B. jednostajnie opóźnionym,
 - C. jednostajnie przyspieszonym,
 - D. jednostajnie zmiennym (opóźnionym lub przyspieszonym).
8. Chłopiec ciągnie wózek, działając siłą 50 N, a więc wózek wywiera na chłopca siłę:
- A. 50 N tak samo zwróconą,
 - B. 50 N zwróconą przeciwnie,
 - C. większą niż 50 N,
 - D. mniejszą niż 50 N.

3.3. Siły tarcia i siły oporu ośrodka

Siły tarcia

W każdym rzeczywistym ruchu ciała występuje siła tarcia. W poprzednich rozdziałach pominieliśmy ją aby uprościć opis ruchu.

Siła tarcia jest siłą oporu, co oznacza, że wektor tej siły jest w każdym ruchu zwrócony przeciwnie do zwrotu wektora prędkości. Gdy ciało jest nieruchome, siła tarcia ma zwrot przeciwny do zwrotu wektora siły wprawiającej ciało w ruch.



Rys. 3.16. Siła tarcia $\vec{T}$ występująca przy przesuwaniu ciała jest tym większa, im większa jest siła nacisku $\vec{F}_N$ działająca prostopadle do stykających się powierzchni.

Przyczyną występowania siły tarcia są nierówności na powierzchniach stykających się ciał. Występują one nawet wtedy, gdy wydaje się nam, że powierzchnie są gładkie. Można je dostrzec przy odpowiednio dużym powiększeniu, stosując szkło powiększające lub mikroskop. Nierówności jednej powierzchni wchodzi w zagłębienia drugiej i zahaczają o siebie, przeciwdziałając ruchowi ciała.

Wartość siły tarcia nie może być większa od wartości siły, która próbuje wprawić ciało w ruch, może co najwyżej być jej równa: $T \leq F$. W przeciwnym razie siła tarcia wprawiłaby ciało w ruch, co oczywiście nie jest możliwe.

Siły tarcia dzielimy na siłę tarcia statycznego $\vec{T}_s$ i siłę tarcia kinetycznego (poślizgowego) $\vec{T}_k$.

Siła tarcia statycznego $\vec{T}_s$ jest to siła działająca na ciało spoczywające, które usiłujemy wprowadzić w ruch.

Siła tarcia kinetycznego $\vec{T}_k$ jest to siła występująca podczas ruchu ciała.

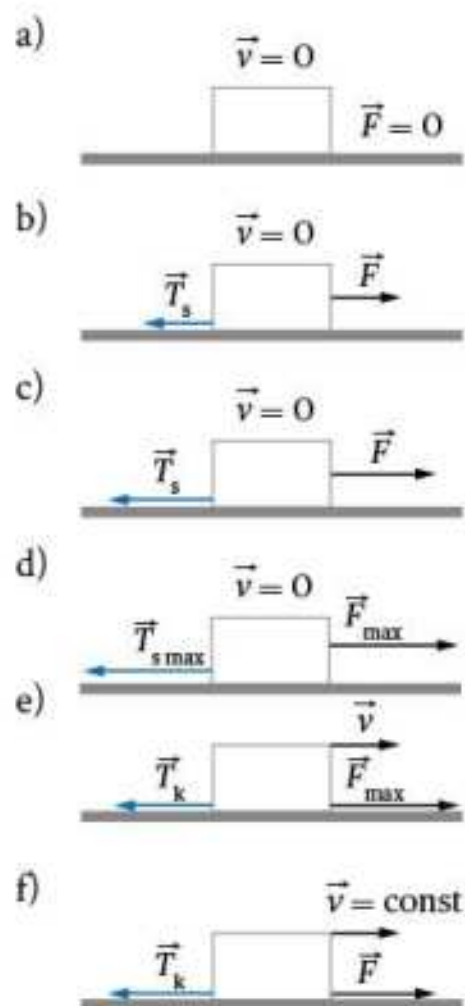
Właściwości sił tarcia statycznego i kinetycznego można zbadać doświadczalnie.

Doświadczenie 1

Na podłodze leży ciężka skrzynia, którą chcemy ruszyć z miejsca. Gdy nie ma siły, która próbuje przesunąć ciało, siły tarcia też nie ma (rys. a). Po przyłożeniu niewielkiej siły zewnętrznej (rys. b) skrzynia pozostaje w miejscu, gdyż siła zewnętrzna zostaje zrównoważona przez siłę tarcia statycznego. Zwiększamy siłę zewnętrzną (rys. c), jednak skrzynia dalej pozostaje nieruchoma. Stąd wniosek, że siła tarcia statycznego też się zwiększyła, skoro nadal równoważy siłę zewnętrzną. W miarę dalszego wzrostu siły zewnętrznej siła tarcia statycznego też rośnie, osiągając wartość maksymalną w chwili, gdy ciało zaczyna się poruszać (rys. d). W tym momencie wartość siły tarcia gwałtownie maleje, gdyż tarcie statyczne zamienia się w tarcie kinetyczne – ciało już jest w ruchu (rys. e). Pojawia się siła wypadkowa i ciało zaczyna się poruszać ruchem przyspieszonym.

Dla uzyskania ruchu jednostajnego (rys. f) siłę zewnętrzną trzeba zmniejszyć, aby mogła ją zrównoważyć siła tarcia kinetycznego.

Na rysunkach nie zaznaczono siły ciężkości i siły sprężystości podłoża, gdyż te siły się równoważą i nie mają wpływu na zachowanie się ciała.

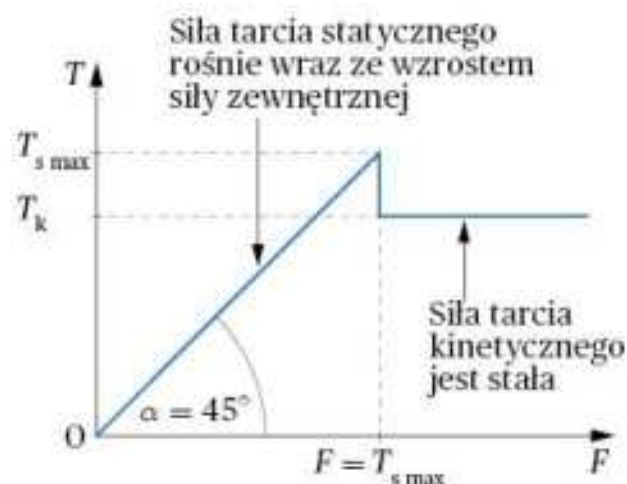


Rys. 3.17. Badanie siły tarcia.

Z przedstawionego doświadczenia wynikają następujące wnioski:

- siła tarcia statycznego $\vec{T}_s$ rośnie w miarę wzrostu siły zewnętrznej, tak aby ją w każdej chwili zrównoważyć;
- siła tarcia statycznego osiąga maksymalną wartość $\vec{T}_{s\max}$, gdy ciało rusza z miejsca. Siła zewnętrzna w tej chwili też jest maksymalna (np. przesuwana szafę najtrudniej ruszyć z miejsca, bo w tym momencie trzeba przyłożyć największą siłę);
- gdy ciało już jest przesuwane, siła tarcia statycznego zamienia się na siłę tarcia kinetycznego $\vec{T}_k$. Jej wartość jest mniejsza od maksymalnej wartości tarcia statycznego: $T_k < T_{s\max}$, dlatego siła zewnętrzna przesuwająca ciało może teraz też być mniejsza (gdy szafa już ruszy z miejsca, łatwiej ją dalej przesuwać);
- siła tarcia kinetycznego jest stała i nie zależy od prędkości ciała (dla niezbyt dużych prędkości).

Powyższe wnioski można zilustrować wykresem. Gdy jednostki przyjęte na obu osiach są jednakowe, to kąt nachylenia linii wykresu wynosi 45° , gdyż siła tarcia statycznego ma taką samą wartość jak siła zewnętrzna.



Rys. 3.18. Zależność siły tarcia od siły zewnętrznej.

Według innego podziału rozróżniamy **tarcie poślizgowe**, które występuje przy przesuwaniu ciał, i **tarcie toczone**, towarzyszące toczeniu ciał. Tarcie toczone jest zawsze mniejsze od tarcia poślizgowego (łatwiej jest przecież toczyć beczkę niż ją przesuwąć).

W technice siły tarcia są najczęściej szkodliwe – powodują straty energii związane z pokonywaniem oporów ruchu, a także rozgrzewanie się ciał (w niektórych obrabiarkach ciała rozgrzewają się do tego stopnia, że trzeba je chłodzić, polewając cieczą). Dlatego dąży się do zmniejszania tarcia, na przykład przez:

- wygładzanie powierzchni trących,
- stosowanie smarów i olejów, których cienka warstwa rozdziela obie powierzchnie,
- stosowanie **łożysk**, które zamieniają tarcie poślizgowe na tarcie toczone.



Rys. 3.19. Łożysko kulkowe. Dzięki zastosowaniu kulek (lub wałków) pierścień zewnętrzny nie ślizga się, lecz toczy po pierścieniu wewnętrznym, co powoduje znaczne zmniejszenie tarcia.

Zapamiętaj

Chociaż różnymi sposobami można zmniejszać siły tarcia, to jednak nie można ich całkowicie wyeliminować.

Siły tarcia bywają też pożyteczne i wówczas staramy się je zwiększyć. Gdyby nie było sił tarcia, nie moglibyśmy normalnie chodzić. Przypomnij sobie, jak trudno jest się poruszać zimą po oblodzonym chodniku. Aby zwiększyć tarcie, posypuje się chodniki piaskiem. W celu zmniejszenia drogi hamowania jadącego samochodu zwiększa się tarcie poprzez dobranie odpowiedniego kształtu bieżnika opon (opony letnie zamienia się na opony zimowe), nawierzchnie jezdni wykonuje się z chropowatego asfaltu, a zimą dodatkowo posypuje się je piaskiem.

Gdyby nie było sił tarcia, nie można byłoby szyc ubrań, nitka łącząca tkaniny łatwo by się wysuplała.

Siły oporu ośrodka

Drugą podstawową siłą oporu jest **siła oporu ośrodka** – powietrza lub cieczy; jest ona zawsze skierowana przeciwnie do kierunku ruchu ciała. Przy niewielkich prędkościach, typowych dla ruchu w cieczech, wartość siły oporu F_{op} jest wprost proporcjonalna do wartości prędkości v .

Przy większych prędkościach, typowych dla ruchu w powietrzu, wartość siły oporu jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości.

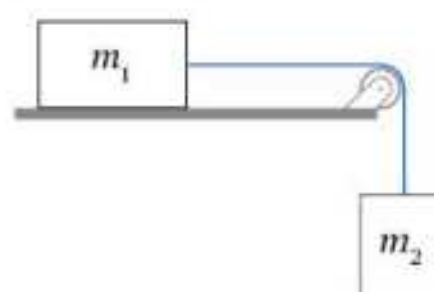
Zależność siły oporu ośrodka od prędkości powoduje, że podczas spadania ciała w powietrzu, w początkowej fazie ruchu, kiedy prędkość jest mała, opór jest też mały. Zatem w początkowych sekundach ruch jest jednostajnie przyspieszony – prędkość narasta liniowo w czasie.

W miarę wzrostu prędkości wzrasta siła oporu, a przyspieszenie ciała maleje. Gdy prędkość wzrośnie znacznie, to siła oporu wzrośnie do tego stopnia, że zrównoważy siłę ciężkości i przyspieszenie zmaleje do zera. Wtedy ruch stanie się jednostajny – ciało będzie opadać ze stałą prędkością, zwaną **prędkością graniczną** v_{gr} .

PYTANIA I ZADANIA

- 1*. Oblicz siłę tarcia łyżew o lód, jeżeli szybkość łyżwiarza $v_0 = 9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ na drodze $s = 25 \text{ m}$ została zredukowana do $v = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Masa łyżwiarza wynosi 40 kg.
2. Ciało o masie $m = 1 \text{ kg}$, spadające z wysokości $h = 5 \text{ km}$, osiągnęło przy upadku prędkość $v = 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Oblicz średnią siłę oporów ruchu, przyjmij: $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.
3. Na rysunku pokazano układ ciał o masach $m_1 = 2 \text{ kg}$ i $m_2 = 0,5 \text{ kg}$. Siła tarcia pomiędzy stołem a ciałem o masie m_1 wynosi 3,92 N. Przyjmij: $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

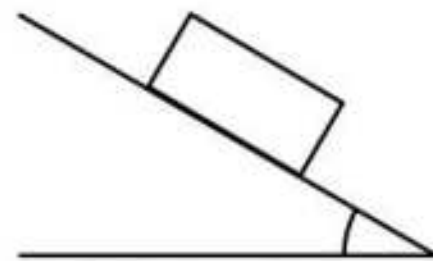
1.	Układ będzie poruszać się z przyspieszeniem $0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.	P	F
2.	Układ będzie się poruszać z przyspieszeniem $a = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$.	P	F
3.	Zależność prędkości układu ciał od czasu dana jest funkcją $v = at$.	P	F



Rys. 3.20. Rysunek do zadania 3.

4. Jeżeli umieszczony na równi pochyłej klocek pozostaje w spoczynku, to:

- A. siła tarcia równoważy ciężar klocka,
- B. siła tarcia jest większa niż składowa jego ciężaru równoległa do równi,
- C. równoważą się siły: ciężkości klocka, tarcia i nacisku klocka na równię,
- D. równoważą się siły: ciężkości klocka, sprężystości równi i tarcia.



Rys. 3.21. Rysunek do zadania 4.

5. Spadochroniarz, którego masa wraz ze spadochronem wynosi 85 kg, spada pionowo w dół z prędkością o stałej wartości $4,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Siła oporu powietrza ma wartość około:

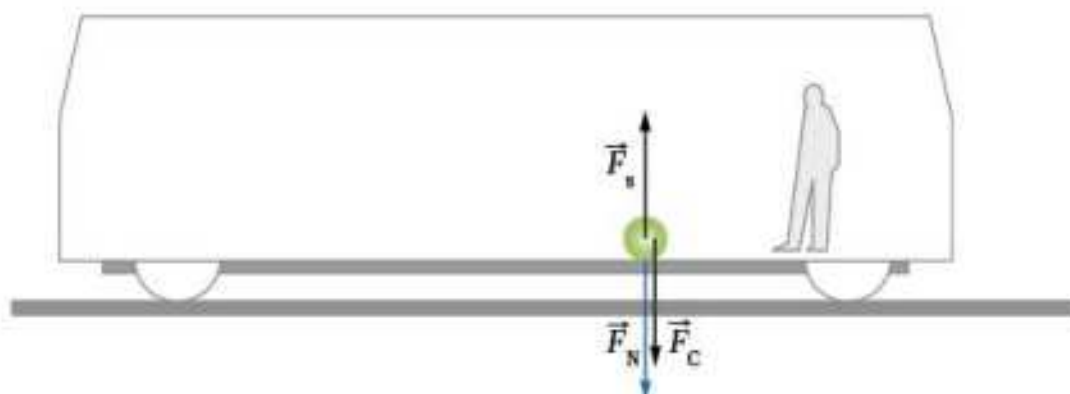
- A. 85 N
- B. 45 N
- C. 450 N
- D. 850 N



3.4. Siły bezwładności

Kolejnym rodzajem sił, które często towarzyszą nam w życiu codziennym, są siły bezwładności. Pozwalają one wyjaśnić zachowanie się ciał w układach odniesienia, które poruszają się z jakimkolwiek przyspieszeniem.

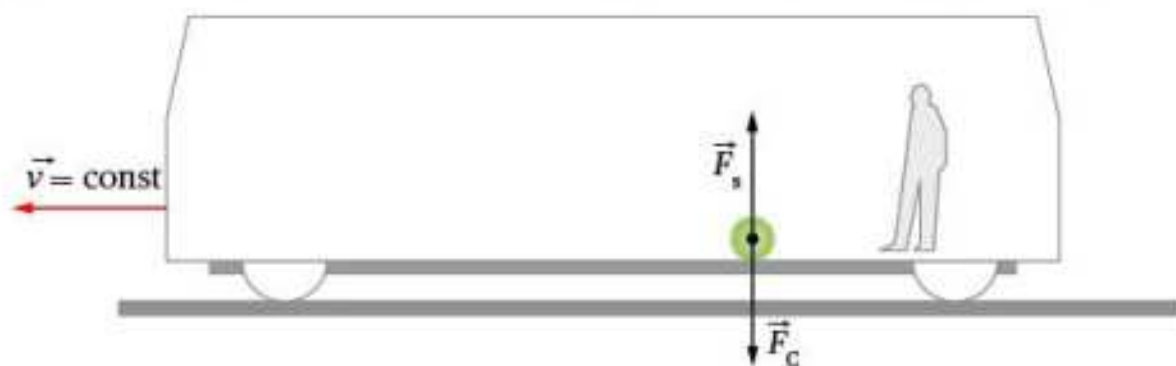
Przeanalizujemy najpierw siły działające na piłkę spoczywającą na podłodze w nieruchomym autobusie. Czy obserwator stojący obok potwierdzi słuszność pierwszej zasady dynamiki?



Rys. 3.22. Nieruchoma piłka w układzie odniesienia związanym z nieruchomym autobusem.

Zastanówmy się, z jakimi ciałami oddziałuje piłka spoczywająca na podłodze. Z pewnością oddziałuje z Ziemią, czego efektem jest stała siła ciężkości $\vec{F}_c$ działająca na nią pionowo w dół. Piłka oddziałuje również z powierzchnią podłogi, wywiera na nią nacisk, działając siłą nacisku $\vec{F}_N$ zwróconą w dół. Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki, jeśli piłka działa na podłogę siłą akcji $\vec{F}_N$, to podłoga działa na piłkę siłą reakcji $\vec{F}_s$ o takiej samej wartości ($F_s = F_N$), tym samym kierunku i przeciwnym zwrocie – do góry. Siłę $\vec{F}_s$ nazywamy **siłą sprężystości podłoża**. Siła $\vec{F}_N$ jest przyłożona do podłogi, a siła $\vec{F}_s$ – do piłki. Na piłkę działa więc nie jedna, lecz dwie siły: siła ciężkości $\vec{F}_c$, będąca miarą oddziaływania piłki z Ziemią, i siła sprężystości podłoża $\vec{F}_s$, będąca miarą jej oddziaływania z podłogą. Obie siły są przyłożone do tego samego ciała, mają taki sam kierunek i przeciwne zwroty. Jeśli mają taką samą wartość ($F_s = F_c$), będą się równoważyć. Piłka jest nieruchoma względem autobusu. Obserwator stwierdzi więc, że pierwsza zasada dynamiki jest spełniona.

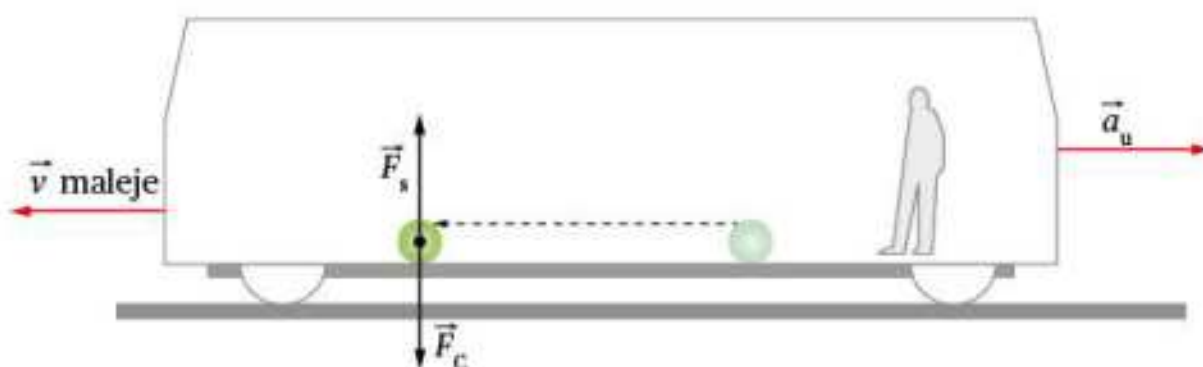
Rozważmy zachowanie piłki w autobusie, który porusza się ze stałą prędkością $\vec{v} = \text{const}$.



Rys. 3.23. Nieruchoma piłka w układzie odniesienia związanym z autobusem poruszającym się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Obserwator w autobusie stwierdzi to samo, co poprzednio. Na piłkę działają dwie równoważące się siły $\vec{F}_c$ i $\vec{F}_s$, piłka pozostaje nieruchoma względem autobusu – pierwsza zasada dynamiki jest spełniona.

Rozważmy teraz zachowanie się piłki w układzie związanym z autobusem, który zaczyna gwałtownie hamować, jego prędkość maleje, więc porusza się ruchem opóźnionym. W ruchu opóźnionym występuje wektor przyspieszenia $\vec{a}_u$, który ma zwrot przeciwny do zwrotu wektora prędkości.



Rys. 3.24. Piłka w układzie odniesienia związanym z hamującym autobusem.

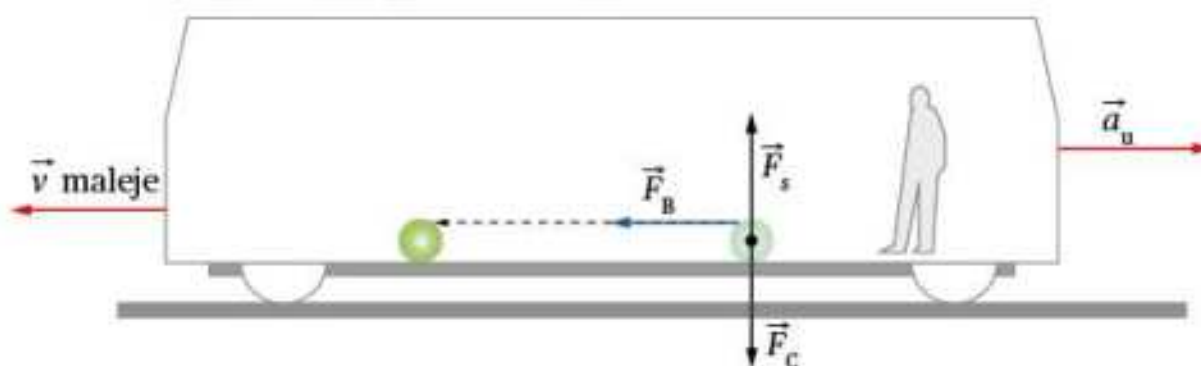
Na piłkę działają te same równoważące się siły $\vec{F}_c$ i $\vec{F}_s$, co poprzednio. Dopóki autobus jechał ruchem jednostajnym prostoliniowym, piłka była nieruchoma. Z chwilą rozpoczęcia hamowania obserwator zauważył, że piłka zaczyna się poruszać, oddalając się od niego. Zachowanie się piłki jest sprzeczne z pierwszą zasadą dynamiki. Na piłkę działają równoważące się siły, a piłka – początkowo nieruchoma – zaczyna się poruszać. Jak więc wyjaśnić zachowanie się piłki? Przecież żadne ciało nie wywierało na nią dodatkowej siły. Odpowiedź na to pytanie podał francuski matematyk Jean d'Alembert (czyt. ża dalamber), wprowadzając pojęcie nowej siły, która nosi nazwę **siły bezwładności**.

Zapamiętaj

Aby wyjaśnić zachowanie się ciał w układach poruszających się z przyspieszeniem a , do wszystkich sił rzeczywistych działających na ciało należy dodać siłę bezwładności $\vec{F}_b$. Po zastosowaniu takiej poprawki zasady dynamiki Newtona są spełnione. Siła bezwładności ma zwrot przeciwny do przyspieszenia układu.

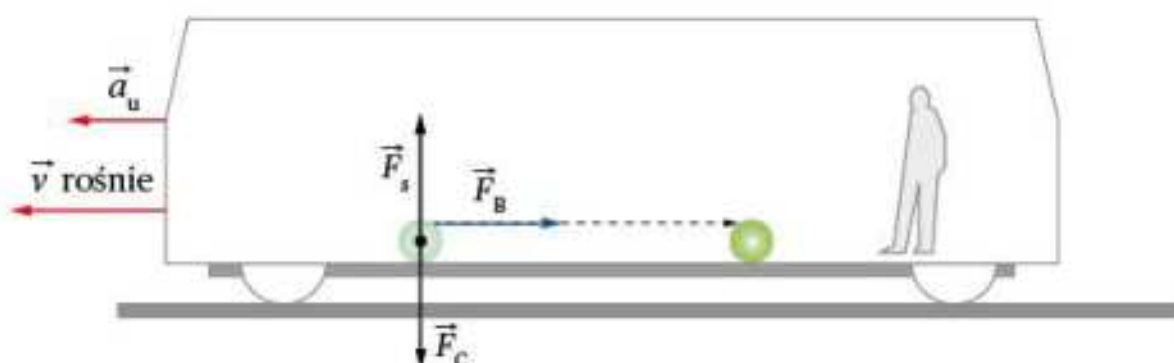


W hamującym autobusie na piłkę działa siła bezwładności $\vec{F}_b$ zwrócona przeciwnie do przyspieszenia układu $\vec{a}_u$, wprawiając ją w ruch do przodu.



Rys. 3.25. Siła bezwładności $\vec{F}_b$ działająca na piłkę w układzie związanym z hamującym autobusem.

W przyspieszającym autobusie siła bezwładności $\vec{F}_b$ też jest zwrócona przeciwnie do przyspieszenia układu $\vec{a}_u$, wprawiając piłkę w ruch do tyłu.



Rys. 3.26. Siła bezwładności $\vec{F}_b$ działająca na piłkę w układzie związanym z przyspieszającym autobusem.

Każdy z nas odczuł działanie sił bezwładności. Kiedy znajdujemy się w gwałtownie hamującym autobusie, musimy mocno trzymać się poręczy, gdyż siła bezwładności popycha nas do przodu. Gdy autobus rusza z przystanku, gwałtownie przyspieszając, odczuwamy działanie siły bezwładności zwróconej do tyłu.

Aby się chronić przed tragicznymi skutkami, jakie mogą wywierać siły bezwładności w chwili zderzenia samochodu z przeszkodą, stosuje się pasy bezpieczeństwa, poduszki powietrzne i specjalne foteliki dla dzieci.



Rys. 3.27. Pasy bezpieczeństwa powinny być zawsze zapięte. Podczas wypadku drogowego mogą uratować nasze zdrowie, a nawet życie.

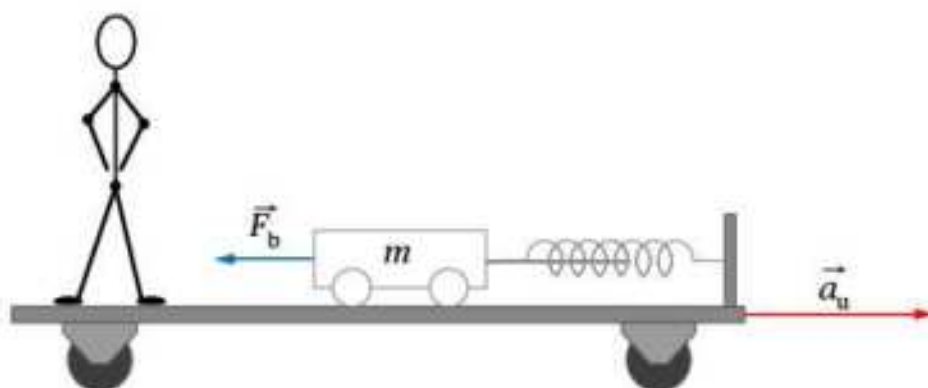
Wartość siły bezwładności działającej na ciało jest wprost proporcjonalna do wartości przyspieszenia, z jakim porusza się układ, i do masy ciała:

$$F_b = ma_u.$$

Zależność tę można potwierdzić doświadczalnie.

Doświadczenie 1

Na ruchomej platformie znajduje się wózek o masie m mogący się poruszać prawie bez tarcia. Gdy platforma porusza się w prawo ze stałym przyspieszeniem, to wózek względem platformy porusza się w lewo z przyspieszeniem



Rys. 3.28. Platforma z wózkiem.

o takiej samej wartości, ale skierowanym przeciwnie. Jeżeli obserwator znajdujący się na platformie zaczepi siłomierz do wózka i do podpórki znajdującej się na końcu platformy (rys. 3.27), to sprężyna siłomierza się wydłuży, a wózek będzie w spoczynku względem platformy. Wydłużenie tej sprężyny jest miarą siły bezwładności. Im większe jest przyspieszenie platformy a_u , tym większa jest wartość siły bezwładności F_b , jaką wskazuje siłomierz. Z doświadczenia wynika też, że siły bezwładności działają na wszystkie ciała w układzie poruszającym się z przyspieszeniem, ale nie są jednakowe dla wszystkich ciał. Dla ciał o dużej masie mają większą wartość niż dla ciał lekkich.

W hamującym autobusie siły bezwładności działają na wszystkich pasażerów, ale dla tych o dużej masie mają większą wartość, dlatego trudniej jest im utrzymać równowagę.

Przykład 1

Pasażer autobusu położył na podłodze piłkę. Oblicz, jaką drogę przebędzie piłka w ciągu 4 s od chwili, kiedy autobus ruszy. Pojazd jedzie z przyspieszeniem $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Siłę tarcia pomijamy.

Rozwiązanie:

$$t = 4 \text{ s}$$

$$a_u = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$s = ?$$

Sytuację opisaną w zadaniu ilustruje rysunek 3.25. W układzie odniesienia związanym z autobusem na piłkę działa siła bezwładności $\vec{F}_b$, pod wpływem której piłka zaczyna się poruszać z przyspieszeniem $\vec{a}_k$ względem autobusu. Wartość tego przyspieszenia otrzymamy z drugiej zasady dynamiki:

$$a_k = \frac{F_b}{m} = \frac{m \cdot a_u}{m} = a_u$$

Piłka porusza się względem autobusu z przyspieszeniem o takiej samej wartości, jak autobus względem Ziemi, ale skierowanym przeciwnie.

Drogę przebytą przez piłkę obliczamy ze wzoru dla ruchu jednostajnie przyspieszonego:

$$s = \frac{a_k \cdot t^2}{2}$$

$$s = \frac{0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (4 \text{ s})^2}{2} = 4 \text{ m}$$



Siły bezwładności różnią się od sił rzeczywistych:

- nie spełniają trzeciej zasady dynamiki Newtona. Siły rzeczywiste zawsze występują parami, natomiast siły bezwładności występują pojedynczo, nie można dla nich wskazać drugiej siły „do pary”, o której mówi trzecia zasada dynamiki;
- dla sił bezwładności nie można wskazać ciała, które byłoby źródłem tej siły;
- siły bezwładności występują tylko w układach poruszających się z przyspieszeniem a .

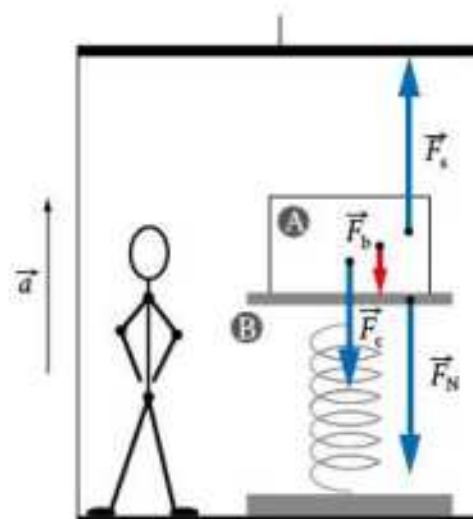
Ze względu na te różnice siły bezwładności są nazywane **siłami pozornymi**.

Przy rozwiązywaniu różnych problemów fizycznych warto korzystać z sił bezwładności, ponieważ często ułatwia to analizę zachowania się ciał. Dla przykładu przeanalizujemy siły działające na skrzynię (oznaczoną literą A) umieszczoną na wadze sprężynowej (talerz wagi jest oznaczony literą B) w windzie poruszającej się ruchem przyspieszonym.

1. Gdy winda porusza się z przyspieszeniem $\vec{a}$, na skrzynię oprócz siły ciężkości działa też siła bezwładności. Gdy wektor przyspieszenia $\vec{a}$ jest zwrócony do góry, siła bezwładności $\vec{F}_b$ jest zwrócona w dół.

Waga wskazuje wartość siły nacisku, która jest równa sumie siły ciężkości $\vec{F}_c$ i siły bezwładności $\vec{F}_b$.

Wskazanie wagi jest większe od siły ciężkości, w windzie występuje **stan przeciążenia**.

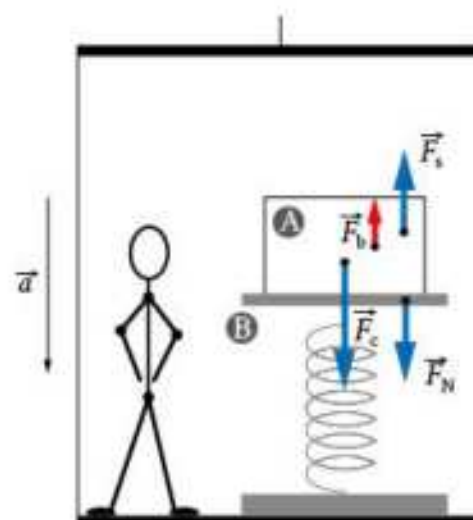


Rys. 3.29. W windzie poruszającej się z przyspieszeniem $\vec{a}$ zwróconym do góry występuje stan przeciążenia.

2. Gdy winda porusza się z przyspieszeniem $\vec{a}$ zwróconym w dół, na skrzynię oprócz siły ciężkości działa siła bezwładności zwrócona do góry.

Waga wskazuje wartość siły nacisku, która jest równa różnicy siły ciężkości $\vec{F}_c$ i siły bezwładności $\vec{F}_b$.

Wskazanie wagi jest mniejsze od siły ciężkości, w windzie występuje **stan niedociążenia**.



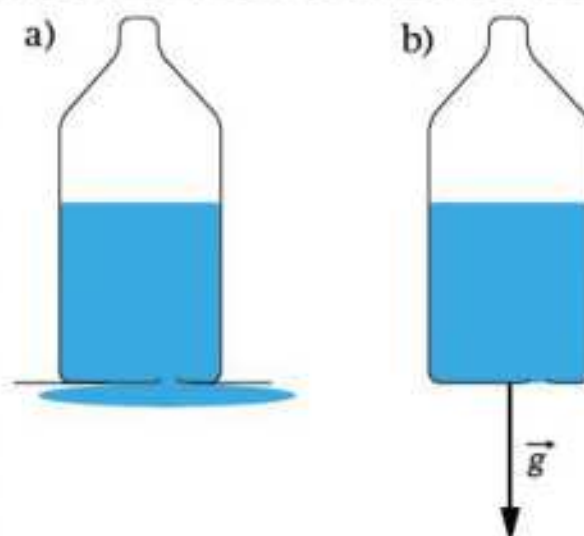
Rys. 3.30. W windzie poruszającej się z przyspieszeniem $\vec{a}$ zwróconym w dół występuje stan niedociążenia.

3. Gdy winda spada swobodnie z przyspieszeniem $a = g$, siła bezwładności $F_b = ma$ ma taką samą wartość jak siła ciężkości $F_c = mg$. Obydwie siły działające na skrzynię równoważą się i nie wywiera ona na wagę żadnego nacisku: $F_N = F_c - F_b = 0$. Gdy waga wskazuje zero, w windzie występuje **stan nieważkości**.

Doświadczenie 2

Plastikową butelkę z otworem w dnie napełniamy wodą. Woda wylewa się przez otwór, ponieważ jest przyciągana przez Ziemię siłą grawitacji. Siła ta powoduje nacisk wody na dno butelki. Gdy woda natrafia na otwór – wypływa.

Kiedy butelkę upuścimy z pewnej wysokości, tak aby mogła swobodnie spadać, woda przestanie się wylewać. Nacisk wody na dno butelki zmaleje wówczas do zera. Woda w spadającej swobodnie butelce jest w stanie nieważkości.



Rys. 3.31. Butelka z otworem w dnie: a) będąca w spoczynku, b) spadająca z pewnej wysokości.

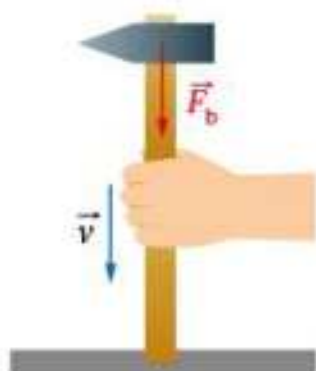
Chcesz wiedzieć więcej?



Stan przeciążenia możesz odczuć, jadąc szybkobieżną windą, kiedy rozpędza się ona, jadąc do góry, lub gdy hamuje, jadąc w dół. Siła bezwładności będzie cię dodatkowo dociskać do podłogi. Stan niedociążenia odczujesz, gdy winda się rozpędza, jadąc w dół, lub gdy hamuje, jadąc do góry. Siła bezwładności będzie zmniejszać nacisk na podłogę.

Rys. 3.32 Wskazania wagi, gdy winda porusza się z przyspieszeniem, dają możliwość pomiaru siły bezwładności działającej na twoje ciało.

Pomiaru siły bezwładności możesz dokonać samodzielnie, stając na wadze sprężynowej (wyskalowanej w niutonach) w windzie. Gdy winda jest w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym, waga wskazuje twój ciężar. Gdy przyspieszenie windy jest zwrócone w górę, wartość wskazywana przez wagę jest większa od twojego ciężaru o wartość siły bezwładności. Natomiast gdy przyspieszenie windy jest zwrócone w dół, waga wskazuje wartość mniejszą od twojego ciężaru o wartość siły bezwładności.



Siła bezwładności może mieć zastosowanie praktyczne. Czasami zdarza się, że metalowa część młotka jest zbyt luźno osadzona na drewnianym trzonku. Aby naprawić tę usterkę, uderzamy ustawionym pionowo młotkiem o podłogę. Po zetknięciu z podłogą, młotek porusza się w dół ruchem opóźnionym, a jego przyspieszenie jest zwrócone do góry. Dzięki sile bezwładności, która działa na metalową część pionowo w dół, osadza się ona mocniej na drewnianym trzonku.

Rys. 3.33. Uderzając młotkiem o podłogę, można luźną metalową część osadzić mocno na trzonku.



Pytania i zadania



1. Pomiędzy dno szufladki a ściankę pudełka od zapalek wsunięto od dołu niewielką monetę w taki sposób, aby jej połowa wystawała. Następnie uderzano w wierzch pudełka łyżeczką do herbaty. Zaobserwowano, że moneta przesunęła się w górę pudełka. Wyjaśnij zachowanie się monety, wykorzystując informacje o sile bezwładności.

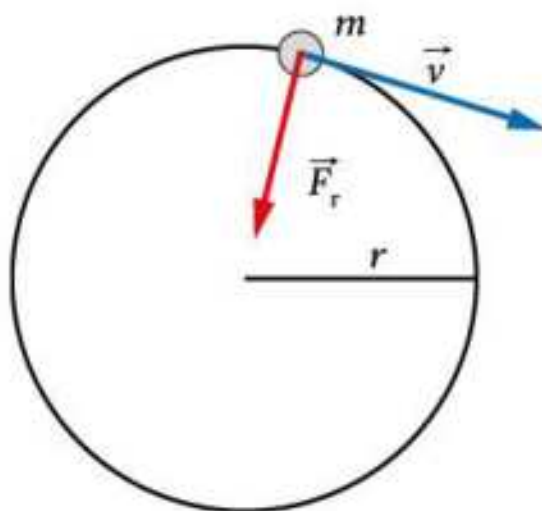


Rys. 3.34. Moneta wsunięta między dno szufladki a ściankę pudełka od zapalek.

2. W którą stronę (do przodu czy do tyłu) powinien się nachylić człowiek, aby nie upaść w hamującym autobusie?
3. Przy prędkości samochodu $v_0 = 105 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ kierowca zaczyna gwałtownie hamować i zatrzymuje samochód na odcinku $s = 40 \text{ m}$. Oblicz siłę bezwładności działającą na kierowcę o masie $m = 60 \text{ kg}$.
- 4*. Określ zwrot i oblicz wartość przyspieszenia windy, wiedząc, że wskazanie wagi sprężynowej umieszczonej w windzie jest o 20% większe niż w przypadku pomiaru dokonanego w nieruchomej windzie.
5. Człowiek stojący w windzie na wadze sprężynowej zauważa, że waga wskazuje $3/4$ jego ciężaru. Na tej podstawie można wywnioskować, że winda porusza się ruchem:
A. jednostajnie przyspieszonym w górę,
B. jednostajnie opóźnionym w dół,
C. jednostajnie przyspieszonym w górę lub ruchem jednostajnie opóźnionym w dół,
D. jednostajnie opóźnionym w górę lub ruchem jednostajnie przyspieszonym w dół.
6. W układzie odniesienia poruszającym się ruchem postępowym z przyspieszeniem a :
A. na wszystkie ciała działają siły bezwładności o zwrotach przeciwnych do przyspieszenia układu i o wartościach niezależnych od mas tych ciał,
B. na wszystkie ciała działają siły bezwładności o zwrotach przeciwnych do prędkości układu i o wartościach zależnych od mas tych ciał,
C. na wszystkie ciała działają jednakowe siły bezwładności,
D. na wszystkie ciała działają siły bezwładności o wartościach wprost proporcjonalnych do mas tych ciał.

3.5. Siły w ruchu po okręgu

Na ciało poruszające się po okręgu musi działać siła zwrócona do środka okręgu. Jest ona nazywana **siłą dośrodkową** $\vec{F}_r$.



Rys. 3.35. Siła dośrodkowa $\vec{F}_r$ w ruchu po okręgu.

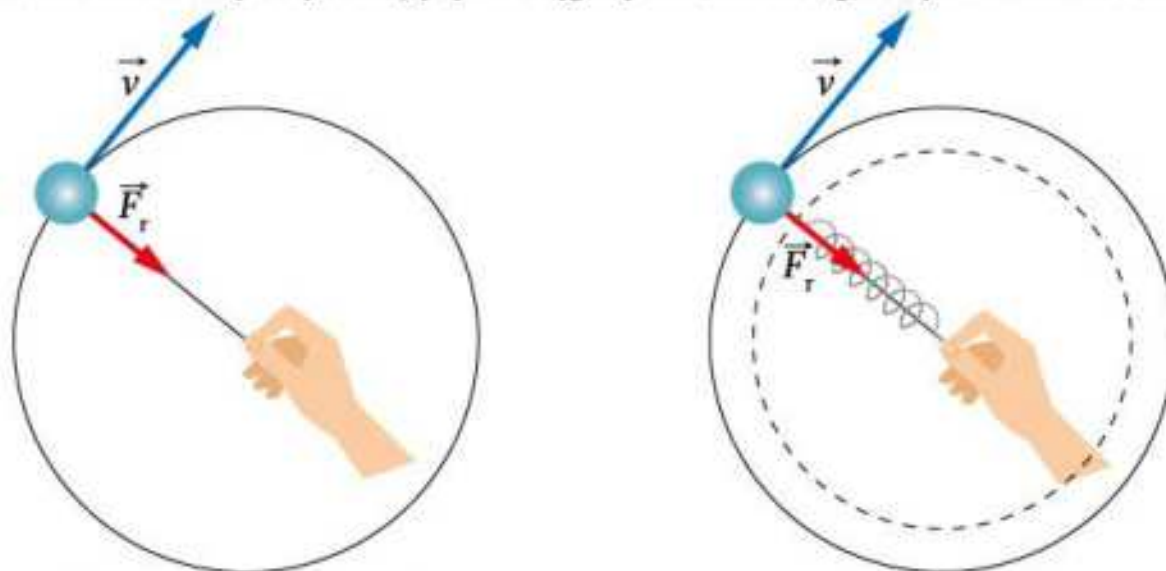
Zapamiętaj

Występowanie siły dośrodkowej jest warunkiem koniecznym ruchu po okręgu, ponieważ powoduje ona zakrzywianie toru i zmianę kierunku wektora prędkości.

Wartość siły dośrodkowej zależy od masy poruszającego się ciała m , wartości prędkości v oraz promienia okręgu r , po którym się porusza, co można zbadać doświadczalnie.

Doświadczenie 1

Przywiązana do sznurka kulkę można wprowadzić w ruch po okręgu w płaszczyźnie poziomej, trzymając jeden koniec sznurka w ręku. Siłą dośrodkową, która zmusza kulkę do ruchu po okręgu, jest działająca na nią siła sprężystości wywierana przez napięty sznurek. W myśl trzeciej zasady dynamiki Newtona, kulka działa na sznurek siłą o takiej samej wartości, lecz przeciwnie zwróconą i wywołującą rozciąganie sznurka (praktycznie niezauważalne).



Rys. 3.36. Badanie siły dośrodkowej.

Gdy zamiast sznurka zastosujemy sprężynę, siła naciągu sprężyny uwidoczni się przez jej wydłużenie. Mierzając wydłużenie sprężyny, możemy wyznaczyć siłę sprężystości, która jest równa sile dośrodkowej działającej na kulkę. Zamiast zwykłej sprężyny można zastosować siłomierz – wtedy wartość siły dośrodkowej można odczytać bezpośrednio z podziałki siłomierza. Zwiększając prędkość kulki v , zauważymy, że wartość siły wskazywanej przez siłomierz jest coraz większa. Dokładniejsze pomiary wykazują, że gdy prędkość kulki wzrośnie dwa razy, to wartość działającej na nią siły wzrośnie cztery razy. Gdy powtórzymy doświadczenie z inną kulką o większej masie m , zauważymy, że przy tej samej prędkości na kulkę o większej masie działa większa siła. Wreszcie, gdy przy stałej prędkości kulki będziemy zmniejszać promień okręgu r , zobaczymy, że wartość siły rośnie. Wyniki pomiarów wykazują zależności wyrażone wzorem:

$$F_r = \frac{mv^2}{r}.$$

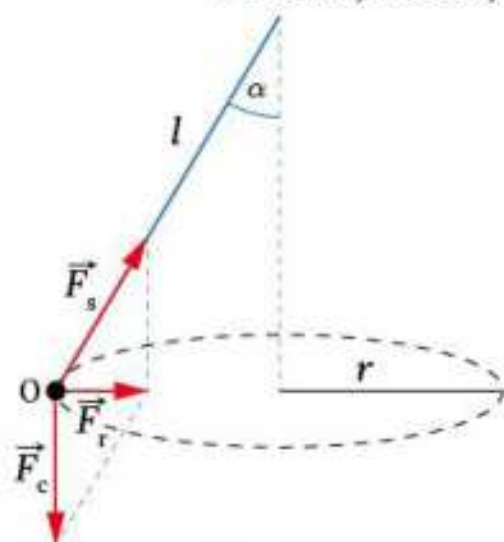
Wartość siły dośrodkowej można też wyrazić przez okres ruchu (bo $v = \frac{2\pi r}{T}$):

$$F_r = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$$

lub przez częstotliwość (bo $f = \frac{1}{T}$):

$$F_r = 4\pi^2 mrf^2.$$

W ruchu jednostajnym po okręgu ($v = \text{const}$) siła dośrodkowa ma stałą wartość.

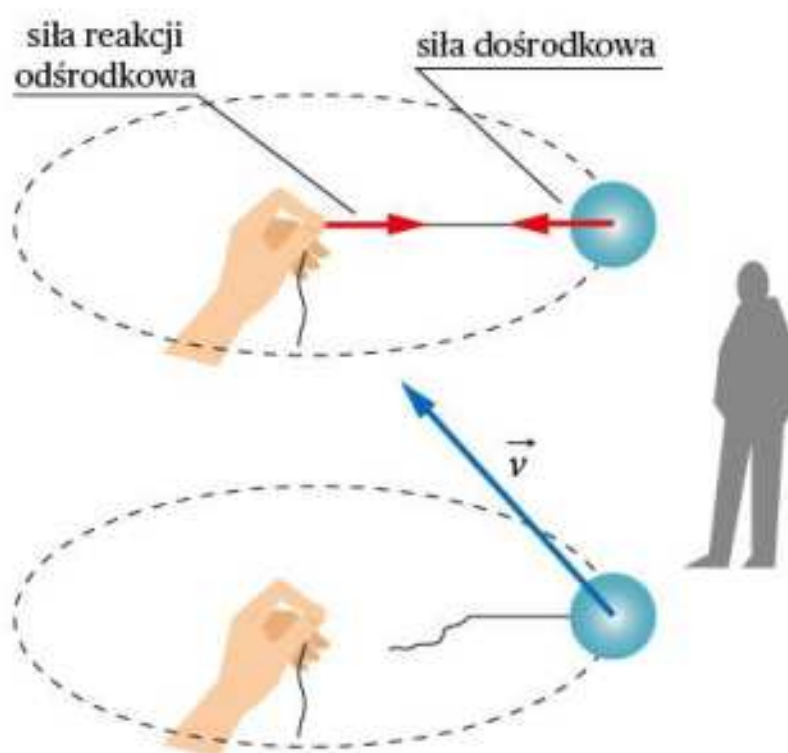


Siła dośrodkowa nie jest jakąś dodatkową siłą działającą na ciało. Jest wypadkową wszystkich sił działających na ciało, które w wyniku działania tych sił porusza się po okręgu.

Rys. 3.37. Kulka zawieszona na lince porusza się ruchem po okręgu w płaszczyźnie poziomej. Siłą dośrodkową jest w tym przypadku wypadkowa siły ciężkości kulki $\vec{F}_c$ i siły sprężystości linki $\vec{F}_s$.

Doświadczenie 2

Kulką przymocowaną do nitki kręcimy nad głową w płaszczyźnie poziomej. Kulka porusza się ruchem po okręgu, ponieważ działa na nią siła dośrodkowa pochodząca od dłoni. Jeśli w pewnym momencie nitka się zerwie, siła dośrodkowa przestanie działać i kulka polecą dalej po linii prostej, stycznej do okręgu.



Rys. 3.38. Badanie siły dośrodkowej.

Siła dośrodkowa występuje w każdym ruchu po okręgu. Jej funkcję pełni: dla Ziemi krążącej wokół Słońca – siła grawitacji (będziemy o niej mówić w dalszej części podręcznika), dla elektronu krążącego wokół jądra atomowego – siła elektryczna (będzie o niej mowa w elektrostatyce), a dla ciała położonego na wirującej tarczy – siła tarcia. Jeśli siła dośrodkowa przestaje działać, ciało porusza się dalej po linii prostej – stycznej do okręgu, po którym krążyło wcześniej.

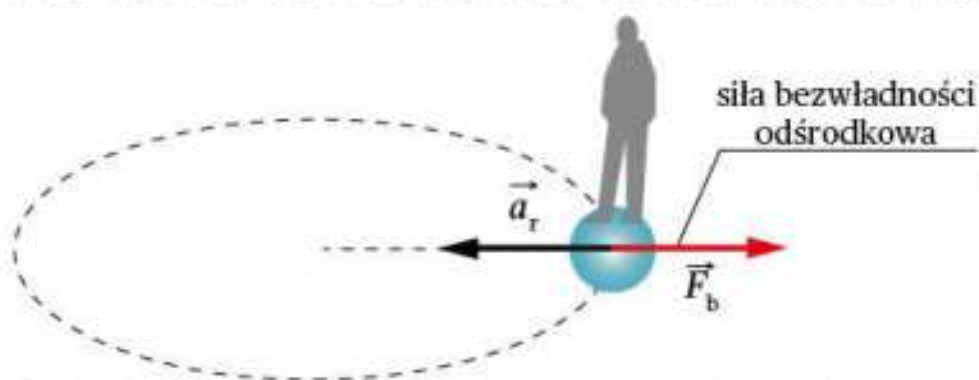
Gdy dłoń działa na kulkę siłą zwróconą do środka okręgu, to zgodnie z trzecią zasadą dynamiki kulka oddziałuje na dłoń siłą reakcji zwróconą przeciwnie. Siły te się nie równoważą, gdyż są przyłożone do różnych ciał.



Przeanalizujmy doświadczenie jeszcze raz, z punktu widzenia obserwatora znajdującego się na poruszającej się po okręgu kulce. Układ odniesienia związany z poruszającym się po okręgu ciałem porusza się z przyspieszeniem zwróconym do środka okręgu, nazywanym przyspieszeniem dośrodkowym a_r . Występuje w nim **siła bezwładności odśrodkowa** (zwrócona od środka okręgu, przeciwnie do przyspieszenia).

Wartość siły odśrodkowej bezwładności jest taka sama, jak siły dośrodkowej:

$$F_b = \frac{mv^2}{r}.$$



Rys. 3.39. W układzie odniesienia poruszającym się po okręgu, działa siła bezwładności zwrócona od środka okręgu.

Chcesz wiedzieć więcej?

Siła dośrodkowa i siła bezwładności odśrodkowa mają taką samą wartość, ten sam kierunek, przeciwne zwroty i są przyłożone do tego samego ciała, ale się nie równoważą, gdyż występują w różnych układach odniesienia – siła dośrodkowa w układzie związanym z Ziemią (układzie inercyjnym), a siła bezwładności w układzie związanym z poruszającym się po okręgu ciałem (układzie nieinercyjnym). Nie można tych sił rozpatrywać równocześnie, gdyż obserwator nie może być w dwóch miejscach na raz.

Działanie siły odśrodkowej bezwładności możemy odczuć w autobusie, który jedzie po zakręcie lub po rondzie. Układ odniesienia związany z autobusem wykonuje ruch po okręgu. Występuje w nim siła bezwładności, która odrzuca nas w bok, od środka zakrętu, po którym porusza się autobus. Dzięki sile bezwładności można osuszyć pranie w wirującym bębnie pralki automatycznej i oddzielić sok od miąższu w sokowirówce.

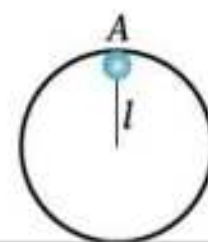
Rys. 3.40. Siła odśrodkowa bezwładności powoduje odchylenie od pionu łańcucha, na którym zawieszony jest fotelik karuzeli łańcuchowej.





PYTANIA I ZADANIA

1. Czy siła dośrodkowa działająca na samochód pokonujący zakręt z pewną prędkością jest taka sama, większa, czy mniejsza niż siła dośrodkowa działająca na autobus jadący po tym samym zakręcie z taką samą prędkością?
2. Maksymalna wartość siły tarcia działającej na koła samochodu jadącego po poziomym odcinku szosy wynosi 9000 N. Samochód ma masę jednej tony. Oblicz maksymalną prędkość, z jaką ten samochód może pokonać zakręt o promieniu 100 m.
3. Na obrotowej scenie w odległości 10 m od osi obrotu stoją pudła z dekoracjami o masie 4 kg. Pełny obrót sceny trwa 1 min. Oblicz minimalną wartość siły tarcia między pudłami a sceną, przy której dekoracje nie zsuną się ze sceny.
4. Kulkę o masie $m = 200$ g zaczepioną na nitce o długości $l = 40$ cm rozpędzamy tak, aby poruszała się po okręgu w płaszczyźnie pionowej. Jaką najmniejszą prędkość musi mieć kulka w punkcie A, aby mogła zatoczyć pełny okrąg?



Rys. 3.41. Rysunek do zadania 4.

5. Na dwóch końcach nieważkiej, nierozciągliwej nitki uczeń zawiesił dwie kulki o jednakowych masach. Linka została przełożona przez rurkę, a następnie uczeń, trzymając za rurkę ustawioną pionowo, wprowadził kulkę znajdującą się u góry w ruch po okręgu w płaszczyźnie poziomej, tak jak pokazano na rysunku. Wybierz elementy A lub B oraz 1 lub 2 tak, aby poniższe zdania były prawdziwe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.



Rys. 3.42. Rysunek do zadania 5.

Kiedy uczeń wprowadził górną kulkę w ruch po okręgu z wystarczająco dużą częstotliwością, dolna kulka	A. wzniosła się.	Miało to związek z działaniem	1. ciężaru drugiej kulki.
	B. opadła.		2. siły bezwładności odśrodkowej działającej na drugą kulkę.

6. Pod wpływem działania siły dośrodkowej w ruchu jednostajnym po okręgu ulega zmianie:

A. wartość prędkości liniowej,	C. kierunek prędkości liniowej,
B. wartość okresu,	D. wartość częstotliwości.



IV

PRACA, MOC I ENERGIA

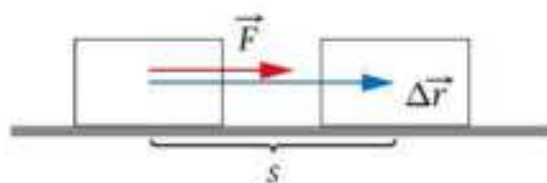
4.1. Praca i moc

Praca

Z lekcji fizyki w szkole podstawowej wiesz już, że siła, która działając na ciało, powoduje jego przesunięcie lub odkształcenie, wykonuje pracę. Praca W , wykonana przez siłę o wartości F przy przesunięciu ciała na drodze s , obliczana była ze wzoru $W = F \cdot s$. Wzór ten można jednak stosować tylko w szczególnym przypadku – gdy stała siła działa na ciało poruszające się po linii prostej, a wektor siły $\vec{F}$ i wektor przemieszczenia $\Delta\vec{r}$ (który łączy położenie początkowe i końcowe ciała) mają taki sam kierunek i zwrot.

Praca jest to iloczyn wartości siły F i wartości wektora przemieszczenia Δr , gdy kierunek i zwrot wektora siły jest zgodny z kierunkiem i zwrotem wektora przemieszczenia.

$$W \stackrel{\text{def}}{=} F \cdot \Delta r$$



Rys. 4.1. Gdy kierunek i zwrot wektora siły jest zgodny z kierunkiem i zwrotem wektora przemieszczenia, wykonana praca zależy tylko od wartości siły i od przebytej drogi.

W ruchu prostoliniowym wartość wektora przemieszczenia Δr jest równa przebytej drodze s , otrzymujemy więc wzór na pracę w postaci:

$$W = F \cdot s.$$

Jednostką pracy w układzie SI jest **dżul** (J). Jej nazwa pochodzi od nazwiska angielskiego fizyka – Jamesa Joule’a, który odkrył prawo przemiany prądu elektrycznego na ciepło.

Jeden **dżul** jest to praca, jaką siła jednego niutona wykonuje na drodze jednego metra, gdy kierunek i zwrot wektora siły jest zgodny z kierunkiem i zwrotem wektora przemieszczenia.

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

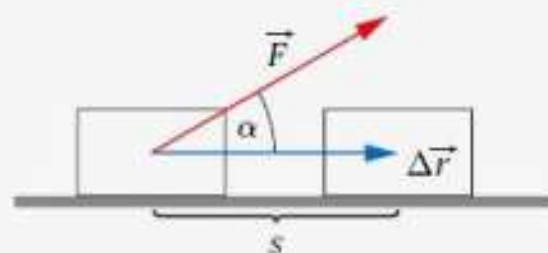
Pamiętając, że niuton można zapisać jako $1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$, jednostkę dżul można rozpisać na jednostki podstawowe układu SI: $1 \text{ J} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$.

Chcesz wiedzieć więcej?

Gdy kierunek lub zwrot siły nie jest zgodny z kierunkiem i zwrotem przemieszczenia, pracę obliczamy z ogólniejszego wzoru:

$$W = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha,$$

gdzie: W to praca, F – wartość siły wykonującej pracę, Δr – wartość przemieszczenia, α – kąt zawarty pomiędzy wektorem siły i wektorem przemieszczenia.



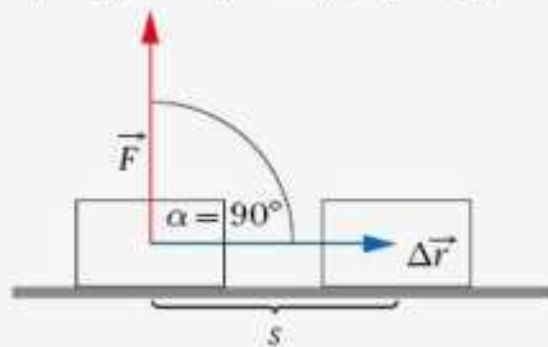
Rys. 4.2. Siła powodująca przesunięcie ciała wykonuje pracę.

Okienko matematyczne

Cosinusem kąta ostrego α w trójkącie prostokątnym nazywamy stosunek przyprostokątnej leżącej przy tym kącie do przeciwprostokątnej.

Ze wzoru: $W = F \cdot s \cdot \cos \alpha$ wynika, że praca może być równa zero w trzech przypadkach:

- gdy $F = 0$; praca jest zawsze wykonywana przez konkretną siłę, bez działania siły nie ma pracy;
- gdy $s = 0$; jeżeli podczas działania siły ciało się nie przesuwa, nie ma pracy (np. gdy pchasz szafę, która ani drgnie, lub gdy trzymasz nieruchomo ciężką skrzynkę, nie wykonujesz pracy);
- gdy $\alpha = 90^\circ$, wówczas $\cos 90^\circ = 0$; siła skierowana prostopadle do przemieszczenia nie wykonuje pracy (np. siła dośrodkowa w ruchu po okręgu nie wykonuje pracy). Gdy niesiesz ciężką walizkę, mimo działania siły i drogi różnej od zera, nie wykonujesz pracy. Dzieje się tak, ponieważ niosąc walizkę, działasz na nią siłą zwróconą pionowo do góry – musisz zrównoważyć siłę ciężkości, żeby walizka nie spadła na ziemię, a wektor przemieszczenia jest ułożony poziomo, więc $\alpha = 90^\circ$ i $W = 0$).



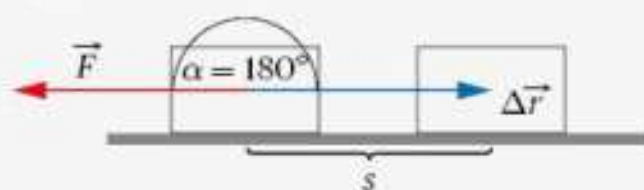
Rys. 4.3. Siła skierowana prostopadle do przemieszczenia nie wykonuje pracy: $W = 0$.

Praca może być też ujemna, bo dla niektórych kątów funkcja cosinus przyjmuje wartości ujemne. W szczególności $\cos 180^\circ = -1$ i wzór na pracę przyjmuje postać:

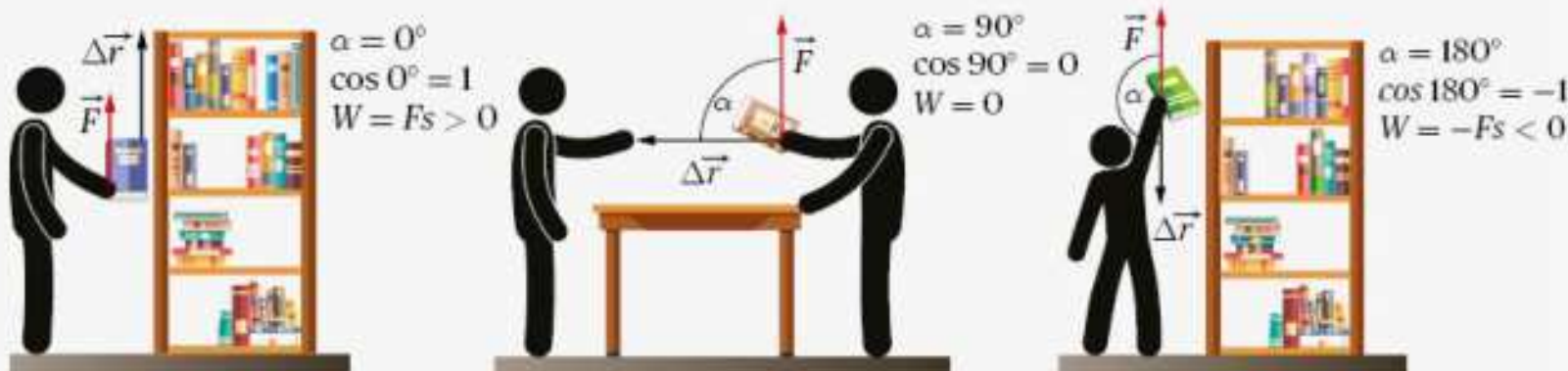
$$W = F \cdot s \cdot \cos 180^\circ = -F \cdot s.$$

Na przykład praca wykonana przez siłę tarcia jest ujemna.

Praca może więc być dodatnia, może być równa zero, a nawet może być ujemna.



Rys. 4.4. Siła, która ma zwrot przeciwny do wektora przemieszczenia, wykonuje ujemną pracę $W < 0$.



Rys. 4.5. Przenosząc książkę na górną półkę, wykonujemy pracę dodatnią; podając poziomo książkę kole-dze, nie wykonujemy pracy; przenosząc książkę na dolną półkę, wykonujemy pracę ujemną.

Moc

Urządzeniami służącymi do wykonywania pracy są silniki elektryczne i spalinowe.

O użyteczności tych urządzeń decyduje nie tylko wartość wykonanej pracy, lecz także czas, w którym dana praca została wykonana. Lepszym urządzeniem jest to, które określoną pracę wykonuje w krótszym czasie. Wielkością opisującą szybkość wykonywania pracy jest **moc** oznaczana symbolem P (od angielskiego słowa *power*).



Moc P jest to stosunek pracy W do czasu t , w którym została ona wykonana:

$$P \stackrel{\text{def}}{=} \frac{W}{t}$$

Moc informuje nas, jaką pracę wykonało dane urządzenie w czasie jednej sekundy.

Jednostką mocy w układzie SI jest **wat** (W). Nazwa ta pochodzi od nazwiska angielskiego fizyka, Jamesa Watta, który ulepszył maszynę parową. Skonstruowanie tej maszyny było kamieniem milowym w rozwoju techniki i nauki.



Jeden **wat** jest to moc takiego urządzenia, które pracę jednego dżula wykonuje w czasie jednej sekundy.

$$1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}}$$

Jednostkę wat można wyrazić w jednostkach podstawowych układu SI: $1 \text{ W} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$.

W praktyce często stosuje się jednostki większe, na przykład jednostkę tysiąc razy większą;

kilowat $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} = 10^3 \text{ W}$,

i jednostkę milion razy większą:

megawat $1 \text{ MW} = 1\,000\,000 \text{ W} = 10^6 \text{ W}$.

W kilowatach podaje się między innymi moc silników elektrycznych, a w megawatach – moc elektrowni.



Przykład 1

Żuraw budowlany, napędzany silnikiem o mocy 11 kW (kilowatów), dźwiga ruchem jednostajnym element konstrukcyjny o masie 2 ton na wysokość 9 m. Oblicz czas podnoszenia.

Rozwiązanie:

$$P = 11 \text{ kW} = 11000 \text{ W}$$

$$m = 2 \text{ t} = 2000 \text{ kg}$$

$$h = 9 \text{ m}$$

$$g \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$t = ?$$

Korzystamy ze wzorów na moc i pracę:

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

$$W = F \cdot s$$

Gdy element konstrukcyjny porusza się ruchem jednostajnym do góry, dźwig działa na niego siłą równoważącą siłę ciężkości $F = F_c = m \cdot g$, zwróconą do góry, zgodnie z wektorem przemieszczenia. Droga s jest równa wysokości h , na której znalazł się element.

$$W = mg \cdot h$$

$$P = \frac{mg \cdot h}{t}$$

Po przekształceniu wzoru otrzymamy czas ruchu:

$$t = \frac{mg \cdot h}{P},$$

$$t = \frac{2000 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 9 \text{ m}}{11000 \text{ W}} = 16,4 \text{ s}$$

Po połączeniu wzorów na moc i pracę otrzymamy:

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

Iloraz $\frac{s}{t}$ to prędkość v w ruchu jednostajnym prostoliniowym, zatem:

$$P = F \cdot v.$$

Z powyższego wzoru możemy korzystać nie tylko w przypadku ruchu jednostajnego, lecz również w ruchach zmiennych, gdy wyznaczamy moc w bardzo krótkim czasie. Wówczas P oznacza moc chwilową, a v – prędkość chwilową.

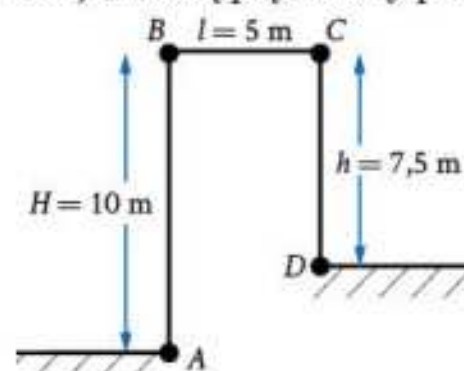
PYTANIA I ZADANIA

1. Jaką pracę trzeba wykonać, aby ciało przesunąć ze stałą prędkością po poziomym torze na odległość $s = 20 \text{ m}$, jeżeli siła tarcia pomiędzy ciałem a podłożem wynosi $T = 0,2 \text{ N}$?
2. Samochód jechał ze stałym przyspieszeniem $8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ na odcinku drogi o długości 100 m . Oblicz pracę wykonaną przez silnik na tym odcinku, jeżeli masa samochodu wraz z obciążeniem wynosiła 1800 kg , a siła tarcia była równa $0,9 \text{ kN}$.
3. Oblicz moc w czasie wystrzału kuli o masie $m = 5 \text{ g}$ z karabinu, którego lufa ma długość $l = 64 \text{ cm}$; prędkość kuli przy wylocie z lufy wynosi $v = 820 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Załóż, że siła wywierana przez gazy prochowe w lufie jest stała.
4. Elektrowóz ciągnie pociąg z prędkością o wartości $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Jeśli moc elektrowozu jest równa 10^6 W , to jego siła ciągu ma wartość:
A. 80 kN B. 50 kN C. 10 kN D. 5 kN
5. Ciało porusza się po okręgu o promieniu 2 m wskutek działania siły dośrodkowej 10 N . Praca wykonana przez tę siłę w czasie jednego okresu wynosi:
A. 0 J B. 5 J C. 20 J D. 40 J

6. Ciało o masie $m = 10 \text{ kg}$ przemieszczamy w płaszczyźnie pionowej (ze stałą prędkością) pomiędzy punktami A, B, C, D , tak jak pokazuje rysunek.

Przyjmij $g \approx 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

1.	Praca na odcinku BC wynosi 490 J .	P	F
2.	Praca na odcinku CD jest ujemna.	P	F
3.	Praca na odcinku AB jest równa 981 J .	P	F



Rys. 4.6. Rysunek do zadania 6.

4.2. Energia potencjalna

Bardzo ważną wielkością fizyczną bezpośrednio powiązaną z pracą jest **energia mechaniczna**, którą będziemy się zajmować w tym rozdziale. Energię mechaniczną ma ciało, które jest zdolne do wykonania pracy. W następnych rozdziałach poznasz też inne rodzaje energii, np. energię cieplną, energię elektryczną, energię jądrową itd.



Energia mechaniczna E jest to wielkość fizyczna skalarna, jaką ma ciało, które jest zdolne do wykonania pracy.

Energię mechaniczną ma młotek uniesiony na pewną wysokość, który spadając, może wykonać pracę, np. wbić gwóźdź w deskę. Energię mechaniczną ma rozciągnięta sprężyna – gdy zwolnimy jej koniec, może wykonać pracę, przesuważając przymocowany do niej klocek. Poruszający się samochód też ma energię mechaniczną – gdy uderzy w jakiś przedmiot, przesunie go, wykonując pracę. Aby ciało uzyskało energię mechaniczną, należało wcześniej wykonać nad nim pracę, np. podnieść młotek, rozciągnąć sprężynę lub rozpędzić samochód.



Związek pomiędzy energią mechaniczną i pracą

Zmiana energii ΔE mechanicznej ciała, na które oprócz siły ciężkości działają dodatkowe siły, jest równa pracy W wykonanej nad ciałem przez te dodatkowe siły.

$$\Delta E = W$$

Ze wzoru wynika, że energia ma taką samą jednostkę jak praca, czyli jednostką energii jest dżul (J).

W podanych przykładach każde ciało ma inny rodzaj energii mechanicznej. Wiesz już ze szkoły podstawowej, że energia mechaniczna występuje w różnych formach jako:

- energia kinetyczna, którą mają ciała będące w ruchu,
- energia potencjalna, którą mogą mieć ciała nieruchome.

Energia potencjalna występuje w dwóch odmianach:

a) **Energia potencjalna grawitacji**, którą mają ciała na pewnej wysokości nad ziemią (nawet gdy są nieruchome). Ciało znajdujące się na wysokości h ma energię potencjalną grawitacji, więc opadając, wykonuje pracę. Tak jest w starym zegarze z ciężarkami. Aby taki zegar uruchomić, trzeba te ciężarki unieść, nadając im energię. Dzięki tej energii mogą przez kilka dni wykonywać pracę, napędzając cały mechanizm zegara.

b) **Energia potencjalna sprężystości**, którą mają odkształcone ciała sprężyste (nawet nieruchome). Odkształcona sprężyna ma energię potencjalną sprężystości – wracając do pierwotnego kształtu, wykonuje pracę. Tak jest w starym zegarze ze sprężyną. Nakręcając zegar, odkształcamy sprężynę, dlatego uzyskuje ona energię. Dzięki tej energii może wykonywać pracę, napędzając mechanizm zegara.

Obliczmy pracę, jaką wykonujemy, działając siłą zewnętrzną, podnosząc klocek o masie m ruchem jednostajnym ($v = \text{const}$) na wysokość h mierzoną od wysokości stołu.

Zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki, siły działające na ciało poruszające się ruchem jednostajnym się równoważą. A zatem podnosząc klocek, musimy działać na niego siłą $\vec{F}_z$ zwróconą pionowo do góry, równoważącą jego ciężar $\vec{F}_c$:

$$F_z = F_c = mg.$$

Działając siłą na pewnej drodze, wykonujemy pracę, obliczaną ze wzoru:

$$W = F \cdot \Delta r.$$

W naszym przypadku siłą wykonującą pracę jest siła zewnętrzna: $F_z = F_c = mg$, wartość przemieszczenia jest równa wysokości: $\Delta r = h$.

Wykonana przez nas praca jest więc równa: $W = F_z \cdot h = mgh$ i jest dodatnia.

Zgodnie ze wzorem $\Delta E = W$, zmiana energii ΔE też jest dodatnia, oznacza więc przyrost energii. Praca wykonana nad ciałem przez siłę zewnętrzną jest równa przyrostowi energii mechanicznej ciała (energia ciała rośnie).

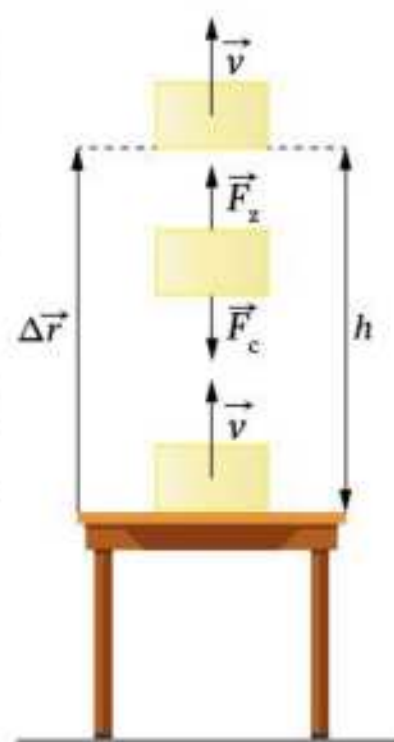
Rys. 4.9. Przy podnoszeniu klocka do góry działamy na niego siłą zewnętrzną $\vec{F}_z$, wykonując pracę.



Rys. 4.7. Uniesione ciężarki zegara mają energię potencjalną grawitacji.

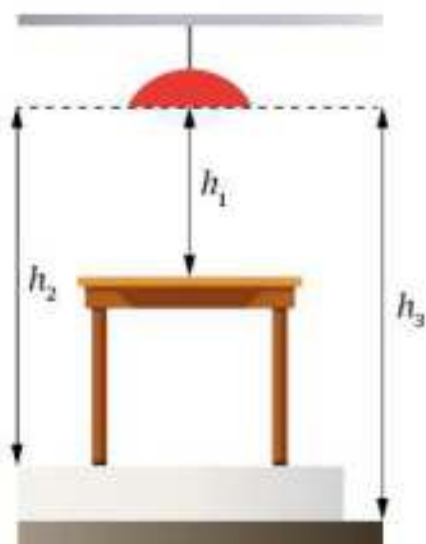


Rys. 4.8. Odkształcona sprężyna zegara ma energię potencjalną sprężystości.



Okienko matematyczne

Symbol Δx oznacza zmianę danej wielkości x – jej przyrost (gdy x rośnie), wówczas $\Delta x > 0$, lub ubytek (gdy x maleje): $\Delta x < 0$; gdy zaś jest stała ($x = \text{const}$): $\Delta x = 0$.



Rys. 4.10. Aby wyznaczyć energię potencjalną lampy wiszącej pod sufitem, musimy ustalić, czy jej wysokość mierzymy względem stołu, względem podłogi, czy też względem poziomu ziemi.

Dzięki wykonywanej przez nas pracy rośnie energia potencjalna klocka (przy stałej prędkości energia kinetyczna jest stała): $\Delta E_p = W = mgh$.

Przyrost energii potencjalnej ΔE_p obliczymy, odejmując od większej wartości (po wykonaniu pracy) na wysokości h mniejszą wartość (przed wykonaniem pracy) na wysokości stołu $h = 0$.

Przyjmujemy, że na wysokości stołu energia potencjalna jest równa zero. Otrzymamy ostatecznie wzór na energię potencjalną grawitacji E_p :

$$E_p = mgh,$$

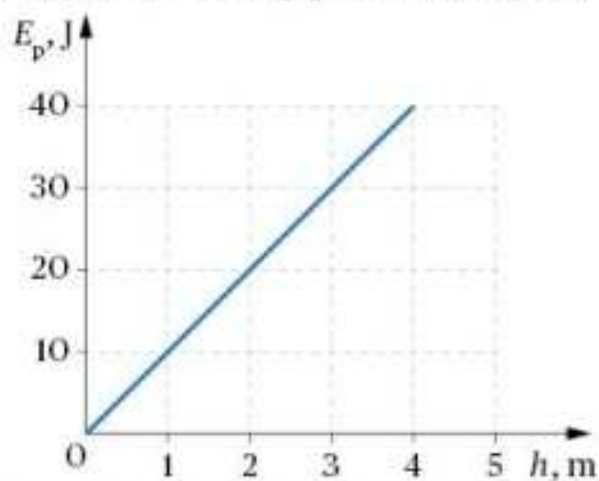
gdzie: m oznacza masę ciała, g – przyspieszenie ziemskie, a h – wysokość.

Jak wynika z umowy przyjętej przy wyprowadzaniu wzoru, aby jednoznacznie określić wartość energii potencjalnej grawitacji ciała, trzeba ustalić poziom (tzw. poziom zerowy), na którym przyjmujemy wartość energii potencjalnej równą zero. Od tego poziomu mierzymy wysokość, na której znajduje się ciało. Wartość energii potencjalnej zależy więc od miejsca, względem którego ją wyznaczamy.



PYTANIA I ZADANIA

1. Czy energia potencjalna spadającego swobodnie ciała maleje szybciej na początku, czy pod koniec ruchu? Odpowiedź uzasadnij, rysując w zeszycie wykres zależności energii potencjalnej od czasu.
2. Ile razy energia potencjalna grawitacji ciała o masie $m_1 = 200$ kg zawieszonego na wysokości $h_1 = 10$ cm jest większa od energii ciała o masie $m_2 = 200$ g podniesionego na wysokość $h_2 = 100$ m?
3. Jaką pracę wykonał dźwig, który ciało o masie $m = 100$ kg podniósł z platformy ciężarówki na wysokości $h_1 = 1$ m na balkon położony na wysokości $h_2 = 10$ m?
4. Na wykresie przedstawiono zależność energii potencjalnej ciała od wysokości. Przyspieszenie ziemskie wynosi $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Jaka jest masa tego ciała?
5. Ciało o masie $1,5$ kg podniesiono ruchem jednostajnym z wysokości 5 m na wysokość 10 m. Jego energia potencjalna:
A. wzrosła 5 razy, B. wzrosła 10 razy, C. wzrosła 2 razy, D. nie zmieniła się.



Rys. 4.11. Wykres do zadania 4.

4.3. Energia kinetyczna. Zasada zachowania energii

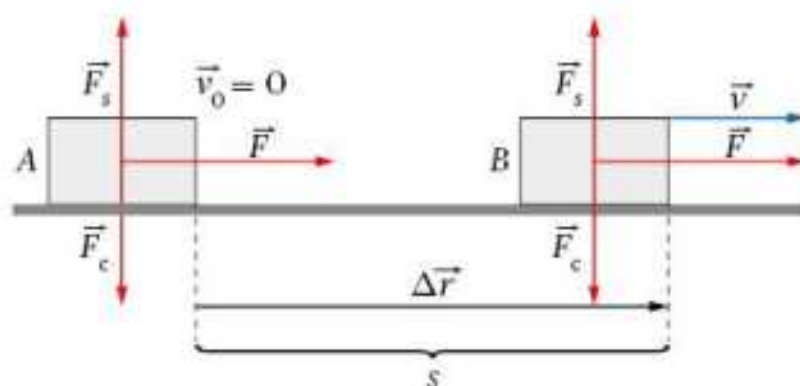


Rys. 4.12. Biegający zawodnicy mają energię kinetyczną.

Wiemy już, że ciało będące w ruchu ma energię mechaniczną, gdyż jest zdolne do wykonania pracy. Energię związaną z ruchem ciała nazywamy **energiją kinetyczną**.

Aby ciało uzyskało taką energię, należy wykonać nad nim pracę, wprowadzając je w ruch.

Obliczmy pracę, jaką wykonujemy, działając stałą siłą zewnętrzną $\vec{F}_x$ na drodze s , aby nieruchomy klocek rozpędzić do prędkości o wartości v .



Rys. 4.13. Praca, jaką wykonujemy, rozpędzając ciało do prędkości v , jest równa energii kinetycznej, jaką uzyskuje ciało.

Korzystamy ze wzoru na pracę: $W = F \cdot \Delta r$. W naszym przypadku długość wektora przemieszczenia jest równa drodze: $\Delta r = s$. Po podstawieniu mamy:

$$W = F_x \cdot s.$$

Z drugiej zasady dynamiki: $F_x = ma$. Siła ciężkości $\vec{F}_c$ i siła sprężystości podłoża $\vec{F}_s$ działające na klocek się równoważą, więc nie bierzemy ich pod uwagę.

$$W = mas$$

Pod działaniem stałej siły ciało zaczyna poruszać się ruchem jednostajnie przyspieszonym, więc drogę liczymy ze wzoru $s = \frac{at^2}{2}$ i otrzymujemy:

$$W = ma \cdot \frac{at^2}{2} = m \frac{a^2 t^2}{2} = m \frac{(at)^2}{2}.$$

Wyrażenie w nawiasie przedstawia prędkość końcową w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej $v = at$.

Wykonana praca wynosi:

$$W = m \frac{v^2}{2}.$$

Praca wykonana nad ciałem jest równa przyrostowi energii mechanicznej ciała (energia ciała rośnie): $\Delta E = W$. Tym razem chodzi o przyrost energii kinetycznej (wysokość h się nie zmienia, więc energia potencjalna jest stała): $\Delta E_k = \frac{mv^2}{2}$.

Przyrost energii kinetycznej ΔE_k obliczymy, odejmując od większej wartości (po wykonaniu pracy), czyli w położeniu B , mniejszą wartość (przed wykonaniem pracy) w położeniu A . W położeniu A ciało było nieruchome, więc nie miało energii kinetycznej. Otrzymujemy ostatecznie energię kinetyczną E_k ciała o masie m poruszającego się z prędkością v :

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

Wzór ten wyprowadziliśmy dla przypadku rozpędzania nieruchomego ciała przez stałą siłę. Jednak jest on prawdziwy dla dowolnego ciała poruszającego się z prędkością v . Zwróćmy uwagę, że energia kinetyczna zależy od kwadratu prędkości ciała, więc jest ona zawsze dodatnia, niezależnie od tego, czy ciało porusza się w prawo, czy w lewo.

Przykład 1

W jakim czasie ciało o masie $m = 1 \text{ kg}$ i energii kinetycznej $E_k = 5 \text{ J}$ poruszające się po okręgu o promieniu $r = 50 \text{ cm}$ wykona jeden pełny obieg?

Rozwiązanie:

$$m = 1 \text{ kg}$$

$$E_k = 5 \text{ J}$$

$$r = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$$

$$T = ?$$

Ze wzoru na energię kinetyczną obliczamy prędkość ciała:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}},$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 5 \text{ J}}{1 \text{ kg}}} = 3,16 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Czas jednego obiegu okręgu, czyli okres, uzyskamy z wyrażenia na prędkość w ruchu jednostajnym po okręgu:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi r}{v},$$

$$T = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \text{ m}}{3,16 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 1 \text{ s}.$$

Ciało może mieć równocześnie energię kinetyczną i energię potencjalną. Na przykład lecący samolot ma energię kinetyczną (ponieważ jest w ruchu) i energię potencjalną (ponieważ znajduje się na pewnej wysokości). Sumę energii kinetycznej i energii potencjalnej nazywamy **całkowitą energią mechaniczną**.

W przypadku, gdy ciało ma kilka rodzajów energii mechanicznej, wykonana nad nim praca jest równa zmianie całkowitej energii mechanicznej:

$$W = \Delta E$$

Siły, jakimi działamy, wykonując pracę przy rozpędzaniu klocka, rozciąganiu sprężyny czy podnoszeniu ciała, są **siłami zewnętrznymi**.

Zalóżmy, że siły zewnętrzne nie wykonują pracy nad ciałem: $W = 0$. Wówczas zmiana całkowitej energii mechanicznej ciała też jest równa zero: $\Delta E = 0$. Oznacza to, że całkowita energia mechaniczna ciała jest stała: $E = \text{const.}$

Zasada zachowania energii mechanicznej

Jeżeli siły zewnętrzne nie wykonują nad ciałem pracy, to całkowita energia mechaniczna ciała (suma energii kinetycznej E_k i energii potencjalnej E_p) jest stała. Energia nie powstaje z niczego i nie ginie, może tylko się zamieniać z jednej formy w inną.

Zasadę zachowania energii mechanicznej można rozszerzyć na inne formy energii: energię cieplną, elektryczną, jądrową itd., otrzymując jedną z fundamentalnych zasad zachowania (która obowiązuje zawsze i wszędzie): **zasadę zachowania energii**.

Energia mechaniczna jest zachowana w trakcie ruchu ciała, na które działa tylko siła ciężkości (która nie należy do sił zewnętrznych). Można to sprawdzić, rozwiązując zadanie.

Przykład 2

Pilkę o masie m rzucono pionowo do góry z prędkością początkową v_0 . Oblicz energię pilki na maksymalnej wysokości.

Rozwiązanie:

Na poruszającą się pilkę działała tylko siła ciężkości. Na pilkę nie działała żadna siła zewnętrzna.

Pilka wznosi się do góry ruchem jednostajnie opóźnionym. Na maksymalnej wysokości (w punkcie B) się zatrzymuje, zatem ma tylko energię potencjalną:

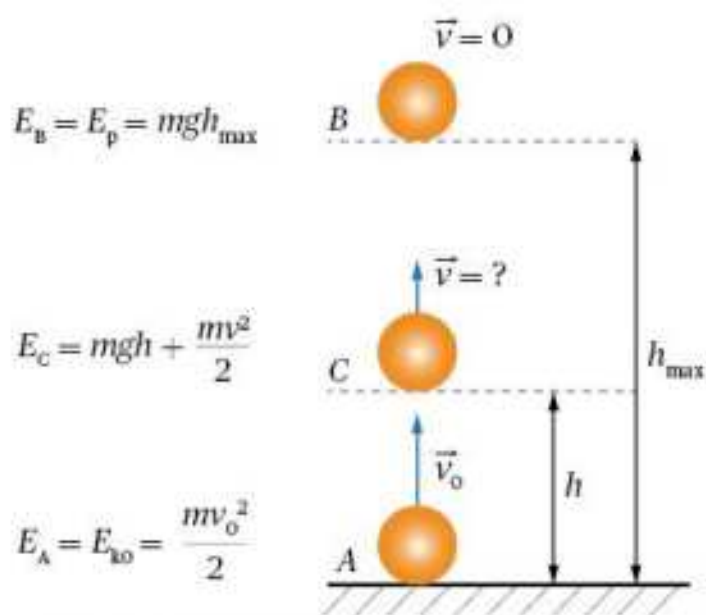
$$E_p = mgh_{\max}.$$

Obliczmy wysokość maksymalną, na którą wzniesie się pilka. Droga w ruchu jednostajnie opóźnionym: $s = v_0 t - \frac{at^2}{2}$ w naszym

przypadku przyjmuje postać: $h_{\max} = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$.

Czas wznoszenia na maksymalną wysokość obliczymy ze wzoru na prędkość końcową w ruchu jednostajnie opóźnionym: $v = v_0 - at$, który w naszym przypadku przyjmuje postać:

$$0 = v_0 - gt \Rightarrow t = \frac{v_0}{g}.$$



Rys. 4.14. Zmiany energii pilki rzuconej do góry.

Wysokość maksymalna jest więc równa:

$$h_{\max} = v_0 \frac{v_0}{g} - \frac{g}{2} \left(\frac{v_0}{g} \right)^2 = \frac{v_0^2}{g} - \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g},$$

a energia potencjalna:

$$E_p = mgh_{\max} = mg \frac{v_0^2}{2g} = \frac{mv_0^2}{2} = E_{k0}.$$

Okazało się, że energia potencjalna na maksymalnej wysokości jest równa energii kinetycznej w chwili wyrzucenia piłki. Całkowita energia mechaniczna w punkcie A odpowiada całkowitej energii mechanicznej w punkcie B.

Chcesz wiedzieć więcej?

Obliczmy całkowitą energię mechaniczną kulki w punkcie C na dowolnej, mniejszej wysokości h . W tym punkcie piłka ma zarówno energię potencjalną, jak i kinetyczną.

Obliczmy wysokość h , na jaką wzniosła się piłka w punkcie C.

Wzór na drogę w ruchu jednostajnie opóźnionym: $s = v_0 t - \frac{at^2}{2}$ przyjmuje postać:

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Czas wznoszenia liczymy ze wzoru na szybkość końcową w ruchu jednostajnie opóźnionym:

$$v = v_0 - gt \Rightarrow t = \frac{v_0 - v}{g}$$

$$h = v_0 \left(\frac{v_0 - v}{g} \right) - \frac{g}{2} \left(\frac{v_0 - v}{g} \right)^2 = \frac{v_0^2 - v_0 v}{g} - \frac{g}{2} \frac{(v_0^2 - 2v_0 v + v^2)}{g^2}$$

$$h = \frac{v_0^2 - v_0 v}{g} - \frac{v_0^2 - 2v_0 v + v^2}{2g} = \frac{2v_0^2 - 2v_0 v - v_0^2 + 2v_0 v - v^2}{2g}$$

$$h = \frac{v_0^2 - v^2}{2g}$$

Całkowita energia mechaniczna piłki w punkcie C wynosi:

$$E_C = mgh + \frac{mv^2}{2} = mg \frac{v_0^2 - v^2}{2g} + \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2}.$$

Całkowita energia mechaniczna kulki wyrzuconej pionowo do góry jest w dowolnym punkcie taka sama.

Podobne obliczenia można przeprowadzić dla dowolnego ruchu (np. dla rzutu poziomego czy rzutu ukośnego), w którym na ciało działa tylko siła ciężkości, uzyskując taki sam rezultat.

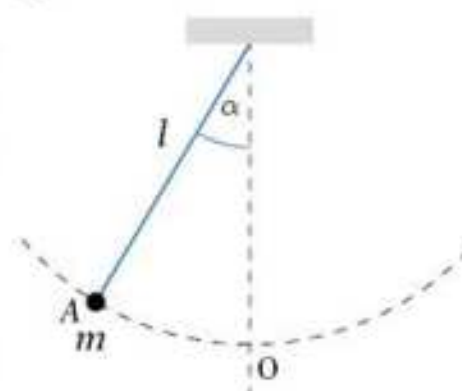
W przypadku, gdy na ciało działają siły tarcia lub siły oporu ośrodka (które należą do sił zewnętrznych) i wykonują nad tym ciałem pracę, to jego energia mechaniczna nie jest zachowana.



PYTANIA I ZADANIA



- 1*. Przedstaw na wykresie zależność energii kinetycznej spadającego swobodnie ciała od czasu.
2. Ile razy energia potencjalna samolotu lecącego na wysokości $h = 5 \text{ km}$ z prędkością $v = 360 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ jest większa od jego energii kinetycznej?
- 3*. Ciało rzucono pionowo do góry z prędkością początkową $v_0 = 16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Stosując zasadę zachowania energii, oblicz, jaką prędkość będzie miało to ciało na wysokości równej $\frac{1}{4}$ największego wzniesienia.
4. Po okręgu w płaszczyźnie pionowej wiruje odważnik przywiązany do linki o długości $l = 50 \text{ cm}$. Kiedy odważnik znajduje się w najwyższym punkcie okręgu, linka nie jest napięta. Oblicz prędkość odważnika w najniższym punkcie okręgu.
- 5*. Wahadło o długości $l = 1 \text{ m}$ odchylono od pionu o kąt $\alpha = 30^\circ$. Jaką prędkość będzie miała kulka wahadła o masie $m = 50 \text{ g}$ w najniższym położeniu? Jaką wartość będzie mieć siła naciągu nitki w tym punkcie?



Rys. 4.15. Rysunek do zadania 5.

6. Z wysokości h spada swobodnie ciało o masie m . Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

1.	Największą energię kinetyczną ciało posiada w momencie uderzenia w Ziemię.	P	F
2.	W połowie wysokości energia kinetyczna tego ciała jest równa energii potencjalnej.	P	F
3.	Prędkość końcowa ciała osiągnie wartość $v = \sqrt{2gh}$.	P	F

7. Jeżeli energia kinetyczna ciała wzrosła 4 razy, to jego prędkość zwiększyła się:
A. 4 razy, B. 2 razy, C. 8 razy, D. $\sqrt{2}$ razy.
8. Na ciało o masie m pozostające początkowo w spoczynku działa stała siła o wartości F . Jego energia kinetyczna po czasie t wynosi:
A. $\frac{F^2 t^2}{2m}$ B. $\frac{1}{2} \left(\frac{F \cdot t}{m} \right)^2$ C. $\frac{m F t}{2}$ D. $\frac{1}{2} \frac{F t^2}{m}$

4.4. Maszyny proste

Często się zdarza, że siła, jaką działamy, jest zbyt mała, aby wykonać określoną czynność. Na przykład siła mięśni jest za mała, aby wyjąć gwóźdź z deski lub rozłupać kłodę drewna. Do wykonania tych czynności używamy wówczas odpowiednich narzędzi (obcęków, siekiery). Narzędzia te oraz części składowe bardziej skomplikowanych urządzeń (np. dźwigów) służące do pokonywania dużych oporów za pomocą mniejszych sił są nazywane **maszynami prostymi**.

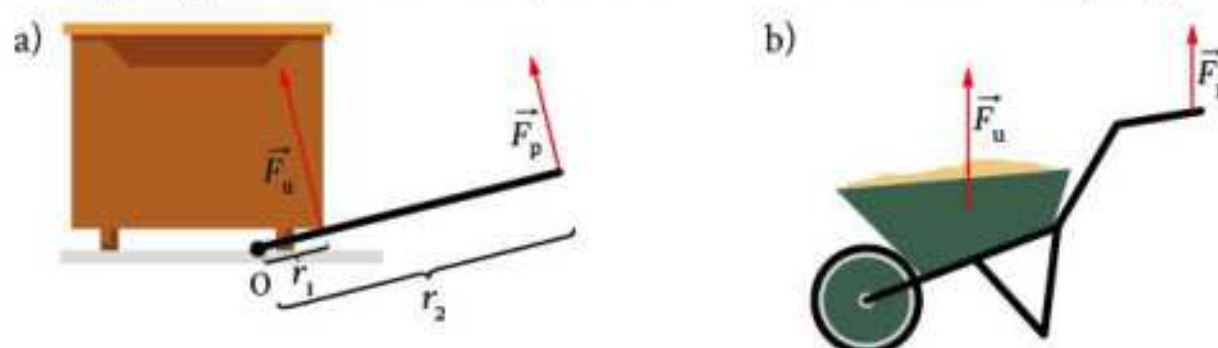


Maszyny proste to urządzenia ułatwiające wykonanie pracy przez zastąpienie jednej siły (tzw. siły użytecznej $\vec{F}_u$) inną siłą (tzw. poruszającą $\vec{F}_p$) o mniejszej wartości.

Do najczęściej stosowanych maszyn prostych należą: dźwignia jednostronna i dwustronna, krążek (blok) nieruchomy i ruchomy, kołowrót, klin, śruba i przekładnie – łańcuchowe, zębate i pasowe.

Dźwignie

Dźwignia jednostronna to sztywna belka osadzona obrotowo na jednym końcu.



Rys. 4.16. Zastosowania dźwigni jednostronnej a) do podnoszenia szafy, b) do przewożenia ciężkich materiałów.

Na rysunku 4.16a przedstawiono zastosowanie dźwigni jednostronnej do podnoszenia ciężkiej szafy. Siła użyteczna $\vec{F}_u$ działająca na szafę i siła poruszająca $\vec{F}_p$, jaką działamy na koniec dźwigni, mają punkty przyłożenia znajdujące się po tej samej stronie osi obrotu O. Pomiędzy wartościami tych sił występuje związek:

$$F_p = F_u \frac{r_1}{r_2},$$

gdzie: r_1 oznacza ramię siły $\vec{F}_u$, a r_2 – ramię siły $\vec{F}_p$ (**ramię siły** to odległość prostej, na której leży wektor siły, od osi obrotu).

Wartość siły poruszającej F_p jest tyle razy mniejsza od wartości siły użytecznej F_u , ile razy ramię r_1 , jest mniejsze od ramienia r_2 . Stosując dźwignię, można podnieść ciało o dużym ciężarze, działając znacznie mniejszą siłą. Można też łatwo rozłupać twardy orzech.

Przykład 1

Na rysunku jest przedstawiony dziadek do orzechów. Aby rozłupać orzech, trzeba działać siłą $F_1 = 50 \text{ N}$. Oblicz minimalną wartość siły F_2 potrzebnej do rozłupania orzecha.

Rozwiązanie:

$$r_1 = 3 \text{ cm} = 0,03 \text{ m}$$

$$r_2 = 0,15 \text{ m}$$

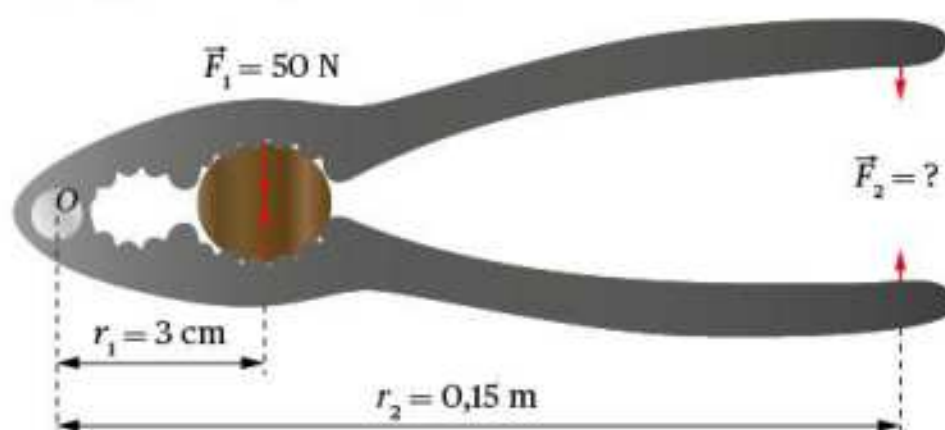
$$F_1 = 50 \text{ N}$$

$$F_2 = ?$$

$$F_2 = F_1 \frac{r_1}{r_2}$$

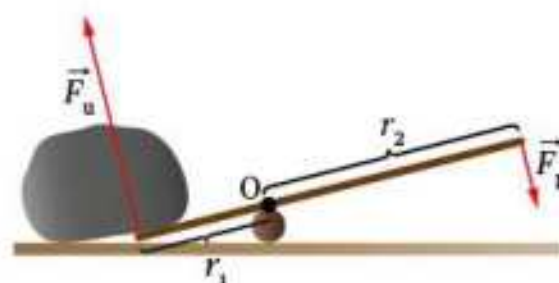
$$F_2 = 50 \text{ N} \cdot \frac{0,03 \text{ m}}{0,15 \text{ m}}$$

$$F_2 = 10 \text{ N}$$



Rys. 4.17. Dziadek do orzechów.

Dźwignia dwustronna to sztywna belka, dla której punkt podparcia (i oś obrotu O) leży między wektorem siły poruszającej $\vec{F}_p$ i wektorem siły użytecznej $\vec{F}_u$.



Rys. 4.18. Podnoszenie ciężkiego kamienia za pomocą dźwigni dwustronnej.

Dźwignię dwustronną stosuje się często do podnoszenia ciężkich przedmiotów. Gdy musisz podnieść kamień, którego ciężar przekracza twoje możliwości, możesz zastosować dźwignię dwustronną. Związek pomiędzy wartościami siły poruszającej F_p i siły użytecznej F_u jest taki sam, jak dla dźwigni jednostronnej:

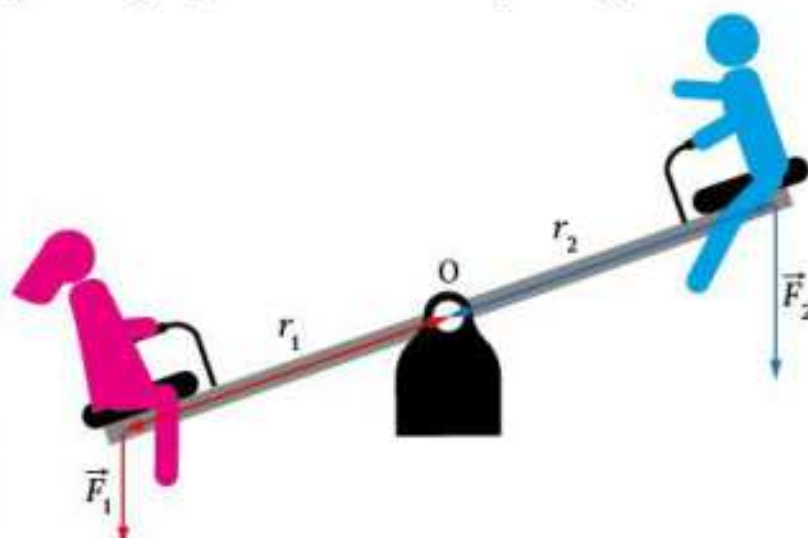
$$F_p = F_u \frac{r_1}{r_2}.$$

Siła F_p , z jaką działasz, jest tyle razy mniejsza od siły F_u potrzebnej do pokonania siły ciężkości kamienia, ile razy ramię siły użytecznej r_1 jest mniejsze od ramienia twojej siły r_2 . Zasadę działania dźwigni dwustronnej wykorzystuje się np. w wadze szalkowej, w nożycach do cięcia blach, obcęgach i kombinerkach.

Przykładem dźwigni dwustronnej jest też huśtawka, którą można znaleźć na placu zabaw. Punkt podparcia znajduje się w środku huśtawki. Z obu stron punktu podparcia na huśtawkę działają siły ciężkości siedzących dzieci. Huśtawka jest w równowadze, gdy obie siły ciężkości (a więc i masy dzieci) są równe. Gdy siły ciężkości $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ są różne, można tak dobrać ramiona sił r_1 i r_2 (przesuwając punkt podparcia), aby huśtawka była w równowadze. Spełniony jest wówczas **warunek równowagi dźwigni**:

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$

Rys. 4.19. Dźwignia dwustronna jest w stanie równowagi tylko, gdy $F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$.





Przykład 2

Ze sztywnej belki o długości 4 m chcemy zbudować huśtawkę dla Ani, której masa wynosi 18 kg, i dla Piotrka, którego masa wynosi 22 kg. W jakiej odległości od miejsca, w którym siedzi Ania, należy zamontować punkt podparcia huśtawki, aby mogła ona znaleźć się w równowadze, gdy dzieci siedzą na końcach belki?

Rozwiązanie:

$$l = 4 \text{ m}$$

$$m_1 = 18 \text{ kg}$$

$$m_2 = 22 \text{ kg}$$

$$r_1 = ?$$

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$

$$m_1 g \cdot r_1 = m_2 g \cdot r_2 \quad | :g$$

$$m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2$$

$$r_2 = l - r_1$$

$$m_1 \cdot r_1 = m_2 (l - r_1)$$

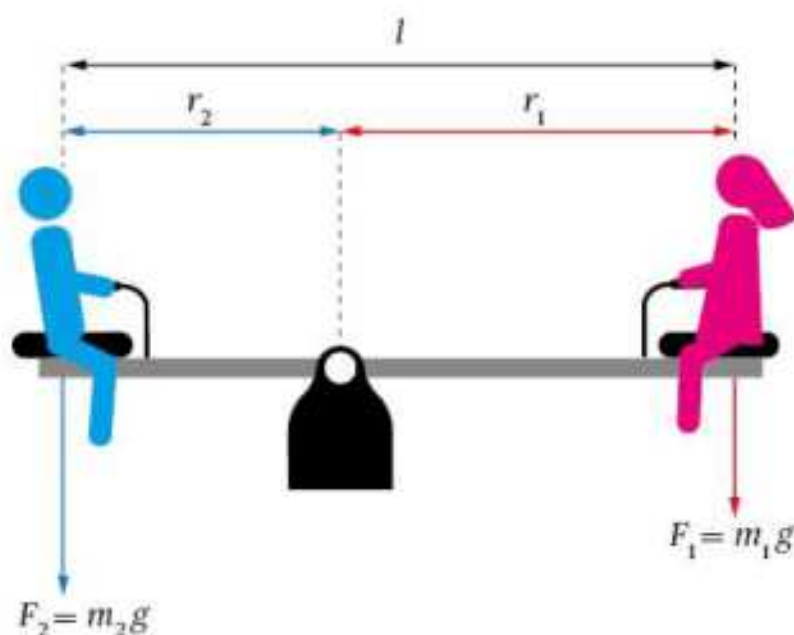
$$m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot l - m_2 \cdot r_1$$

$$m_1 \cdot r_1 + m_2 \cdot r_1 = m_2 \cdot l$$

$$(m_1 + m_2) \cdot r_1 = m_2 \cdot l$$

$$r_1 = \frac{m_2 \cdot l}{m_1 + m_2}$$

$$r_1 = \frac{22 \text{ kg} \cdot 4 \text{ m}}{18 \text{ kg} + 22 \text{ kg}} = \frac{22 \text{ kg} \cdot 4 \text{ m}}{40 \text{ kg}} = 2,2 \text{ m}$$



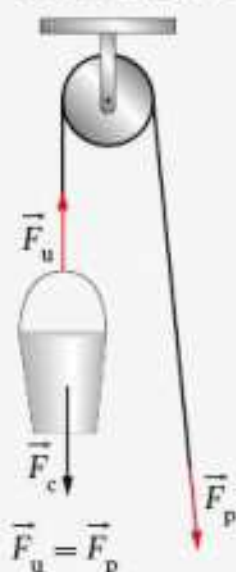
Rys. 4.20. Huśtawka w stanie równowagi.



Chcesz wiedzieć więcej?

Krażki

Krażek (nazywany też blokiem) to okrągła tarcza, osadzona obrotowo na osi, zaopatrzona na obwodzie w rowek, przez który przechodzi lina. Mamy dwa rodzaje krzyżków:



– **Krażek nieruchomy** ma zamocowaną oś i służy jedynie do zmiany zwrotu działającej siły. Wartość siły poruszającej F_p jest taka sama, jak wartość siły użytecznej F_u , która pokonuje siłę ciężkości.

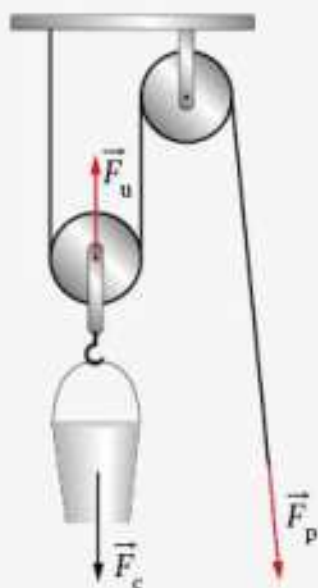
$$F_p = F_u$$

Taki krażek jest powszechnie stosowany na budowach do wciągania ładunków. Ułatwia on pracę, nie zmniejszając siły potrzebnej do jej wykonania. Pracownik, zamiast stać na piętrze i transportować ładunek, ciągnąc koniec liny do góry, może stać bezpiecznie na ziemi i ciągnąć koniec liny w dół.

Rys. 4.21. Krażek nieruchomy (stały).

– **Krażek ruchomy** wisi na opasującej go linie, której jeden koniec jest przytwierdzony nieruchomo. Krażek podnosimy razem z ciałem. Siła poruszająca F_p jest równa połowie siły użytecznej F_u (i połowie siły ciężkości ciała), ale koniec liny musimy ciągnąć do góry.

$$F_p = \frac{F_u}{2}$$



Rys. 4.22. Krażek ruchomy.



Można równocześnie wykorzystać zalety obydwu krążków, łącząc je w układ nazywany **dwukrażkiem**. Pracownik może stać na ziemi i transportować ciężkie ciało do góry, ciągnąc koniec liny w dół siłą dwa razy mniejszą niż ciężar ciała.

$$F_p = \frac{F_u}{2}$$

Rys. 4.23. Stosując dwukrażek wykorzystujemy zalety krążka ruchomego i krążka nieruchomego.

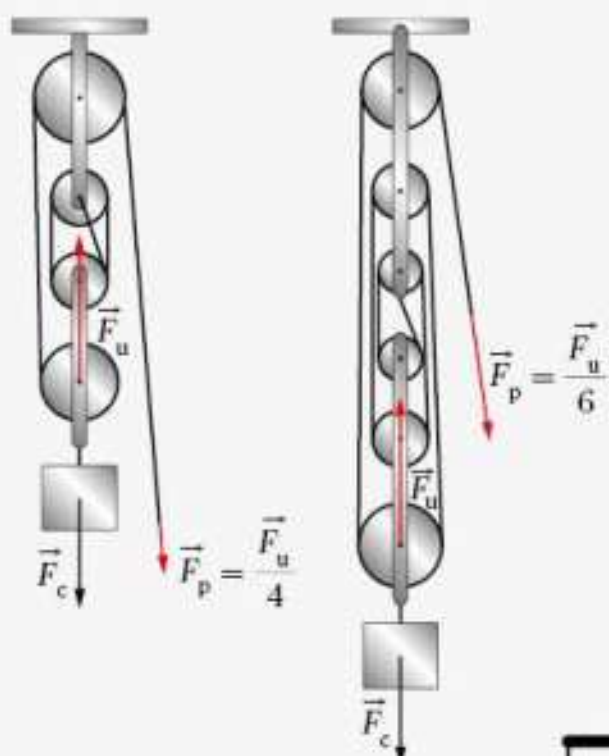
W podobny sposób można łączyć ze sobą większą liczbę krążków, jeszcze bardziej zmniejszając siłę poruszającą. Taki zespół jest nazywany **wielokrażkiem**. Siła poruszająca F_p jest wtedy n razy mniejsza od siły użytecznej F_u (i ciężaru podnoszonego ciała):

$$F_p = \frac{F_u}{n},$$

gdzie n oznacza liczbę krążków.

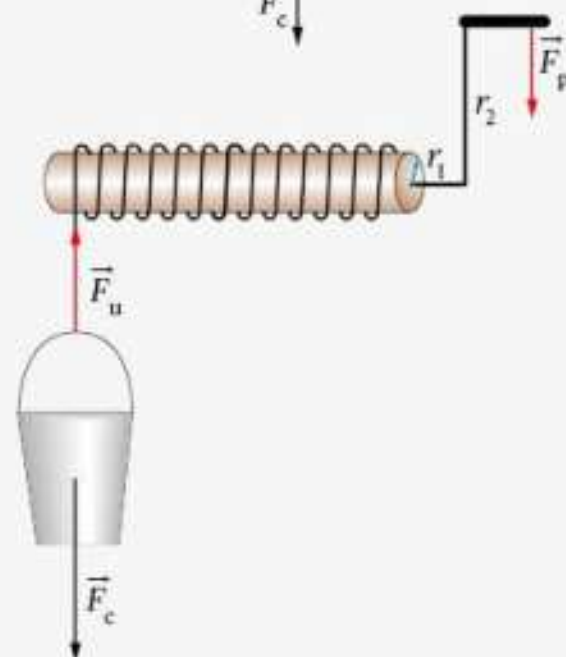
Wielokrażki, na przykład stosowane w dźwigach, pozwalają zmniejszyć grubość liny nośnej. W żaglówkach służą do wybierania i luzowania żagli oraz do zwiększania naciągu olinowania.

Rys. 4.24. Stosując wielokrażki, można wielokrotnie zmniejszyć siłę działającą przy podnoszeniu ciała.



Kołowrót

Kołowrót jest zbudowany z osadzonego na łożyskach walca o promieniu r_1 , który może się obracać względem swojej osi. Do jednego z jego końców przymocowana jest korba lub koło o promieniu r_2 . Na walec nawinięta jest lina lub łańcuch, do którego przymocowany jest ładunek (np. wiadro z wodą). Kołowrót działa na zasadzie dźwigni. Aby za jego pomocą można było wyciągnąć ciężkie ciało przy użyciu stosunkowo małej siły, ramię korby musi mieć większą długość niż promień walca.



Rys. 4.25. Kołowrót.

Siła poruszająca F_p , jaką działamy na korbę, jest tyle razy mniejsza od siły użytecznej F_u równoważącej ciężar ładunku, ile razy promień walca r_1 jest mniejszy od ramienia korby r_2 :

$$F_p = F_u \frac{r_1}{r_2}.$$

Kołowrót znalazł zastosowanie na przykład w studniach, z których jest czerpana woda, w kopalniach do wyciągania urobku i na statkach do wyciągania kotwicy.

Śruba

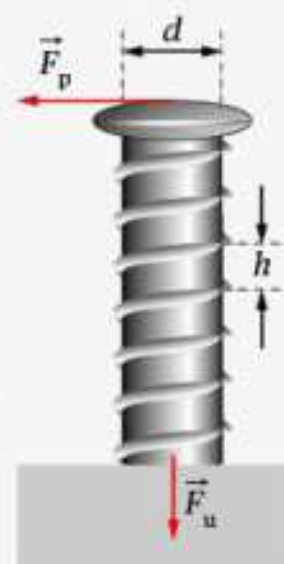
Śruba ma kształt walca zaopatrzonego w występ biegnący po jego powierzchni wzdłuż linii śrubowej (tzw. gwint). Jest ona wkręcana w nakrętkę, w której jest odpowiedni rowek. Śrubę można uważać za równię pochyłą nawiniętą na walec.

Śruba obracana siłą poruszającą $\vec{F}_p$, styczną do jej obwodu, wkręca się w nieruchomą nakrętkę, przy czym jej przesuwający się koniec działa siłą użyteczną $\vec{F}_u$, pokonując opór użyteczny (np. ciężar samochodu podnoszonego za pomocą podnośnika śrubowego). Wartość siły poruszającej F_p jest mniejsza od wartości siły użytecznej F_u zgodnie ze wzorem:

$$F_p = F_u \frac{h}{\pi d},$$

gdzie: h to skok śruby (odległość dwóch sąsiednich rowków), a d – średnica walca.

Śruby mają bardzo szerokie zastosowanie jako elementy łączące w budowie maszyn i w wielu konstrukcjach budowlanych.



Rys. 4.26. Śruba.

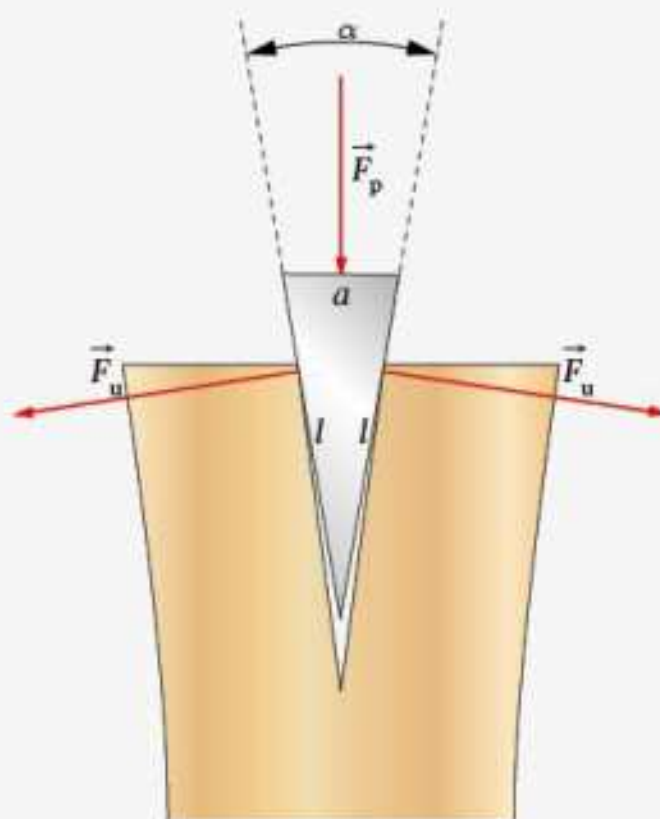
Klin

Klin to bryła, której dwie ściany boczne są płaszczyznami tworzącymi ze sobą niewielki kąt, a trzecia ściana stanowi grzbiet klina. Siła poruszająca $\vec{F}_p$ działa prostopadłe do grzbietu, a wówczas ściany boczne klina działają na rozłupywany przedmiot siłami użytecznymi $\vec{F}_u$. Wartość siły poruszającej F_p jest wyrażona wzorem:

$$F_p = F_u \frac{a}{l},$$

gdzie: a to długość grzbietu klina, a l – długość ściany bocznej.

Klin jest najczęściej stosowany do rozłupywania (siekiera) i do krojenia (nóż).



Rys. 4.27. Klin i przykład jego zastosowania.

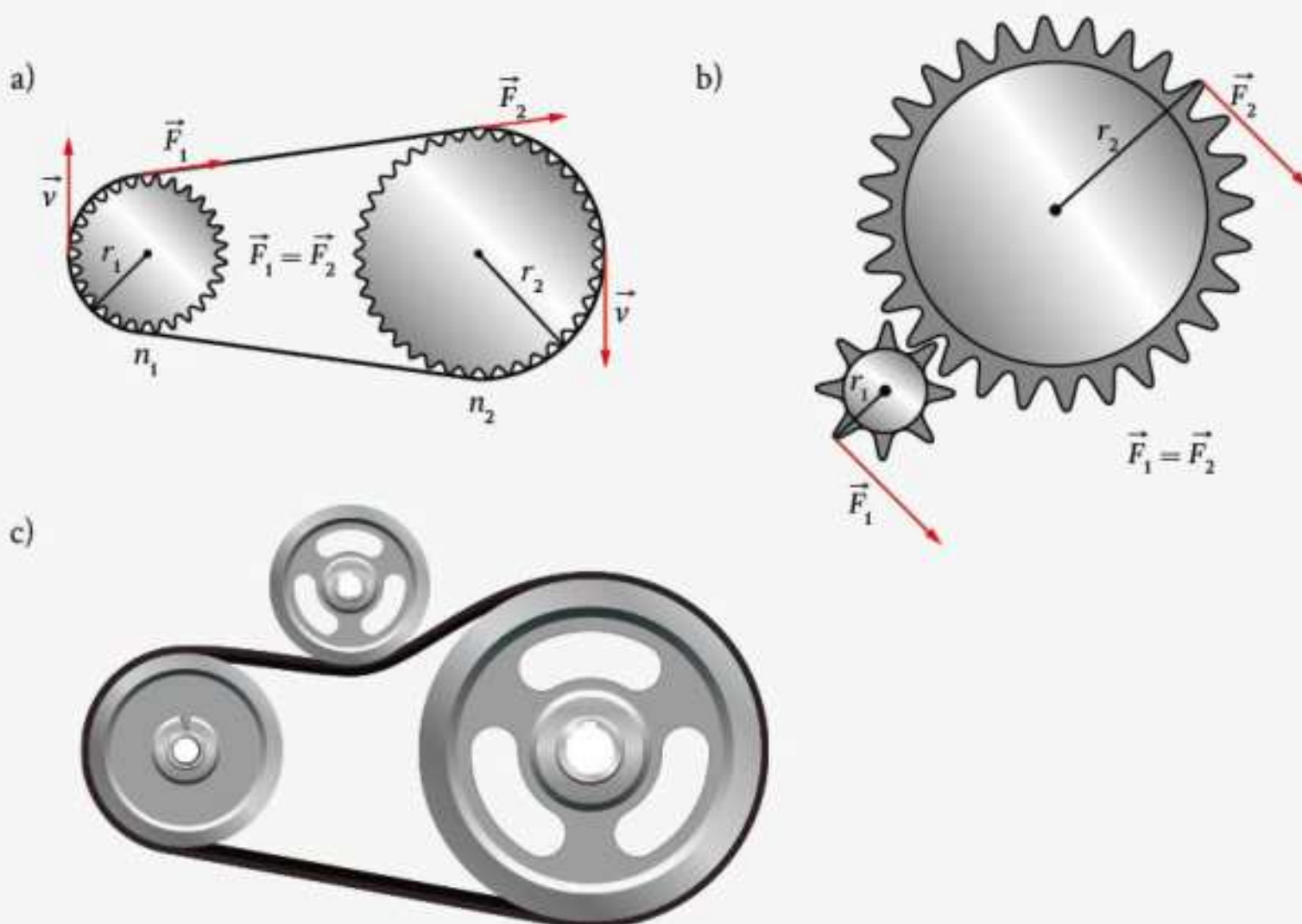
Przekładnie

Przekładnie są to mechanizmy służące do przeniesienia ruchu obrotowego z koła napędowego na koło napędzane z jednoczesną zmianą częstotliwości obrotów obu kół. W przemyśle powszechnie stosowane są przekładnie: łańcuchowe, zębate i pasowe. Dla każdej z nich wartość prędkości punktów położonych na obwodzie dwu kół o różnych promieniach r_1 i r_2 jest taka sama. Przekładnie zmieniają liczbę obrotów na sekundę obu kół (czyli częstotliwość) n_1 i n_2 w stosunku odwrotnym do promieni tych kół:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Stosunek n_1 do n_2 jest nazywany **przełożeniem**. W przypadku przekładni zębatych jest on równy stosunkowi liczby zębów na obu kołach.

Przekładnia łańcuchowa jest w rowerze. Przy pedalach znajduje się jedno duże koło zębate (lub dwa albo trzy w rowerze górskim). Przy tylnym kole jest mniejsze koło zębate (lub do dziesięciu kół zębatych w rowerze górskim) połączone łańcuchem z kołem znajdującym się przy pedalach roweru. Przekładnie zębate są stosowane w zegarkach mechanicznych. Są podstawowymi częściami skrzyni biegów w samochodach. Za pomocą dźwigni zmiany biegów możemy nastawić koła zębate w taki sposób, aby uzyskać przekładnię o innym przełożeniu.



Rys. 4.28. Przekładnie: a) łańcuchowa, b) zębata, c) pasowa.



Rys. 4.29. Przykłady zastosowań przekładni: a) przekładnia łańcuchowa w rowerze, b) przekładnie zębate w zegarku mechanicznym, c) samochodowa skrzynia biegów.

W działaniu wszystkich maszyn prostych obowiązuje **zasada niezmienności pracy**.

Zapamiętaj

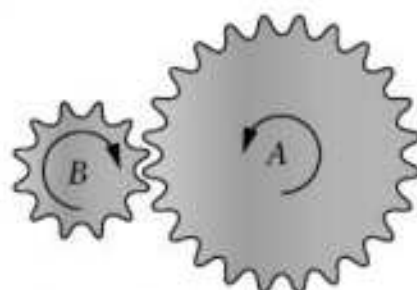
Praca, jaką wykonujemy, działając siłą poruszającą (praca włożona), nie może być mniejsza od pracy siły użytecznej (pracy uzyskanej). Jeżeli możemy zaniedbać opory ruchu, to obie prace: włożona i uzyskana, są sobie równe.

Praca, jaką wykonujemy (np. podnosząc ciało) za pomocą dowolnej maszyny prostej, jest taka sama jak praca, jaką wykonalibyśmy, podnosząc to ciało bezpośrednio, bez użycia maszyny. Jeśli tarcie można pominąć, a siła poruszająca jest dwa razy mniejsza od siły równoważącej ciężar ciała, to droga, na której działa ta siła, okazuje się dwa razy większa. Dlatego w obu przypadkach wykonana praca jest taka sama. Maszyny proste nie wykonują pracy, pośredniczą jedynie w jej wykonaniu.

PYTANIA I ZADANIA

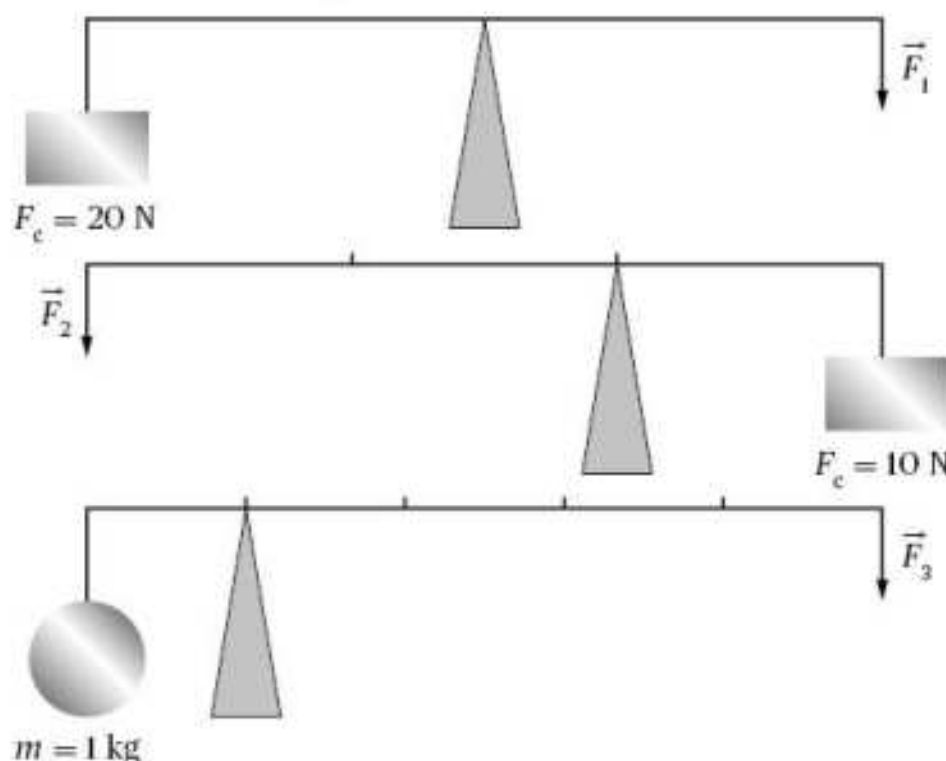


1. Aby wsunąć dywan pod szafę, trzeba ją nieco unieść. Wkładamy więc pod szafę metalową rurkę o długości 1,6 m, opierając jej koniec o podłogę. Pod szafą znajduje się część rurki o długości 20 cm. W miejscu, gdzie krawędź szafy styka się z rurką, działa na nią siła 800 N. Oblicz, jaką siłą musimy działać na drugi koniec rurki.
2. Na jednym końcu huśtawki, w odległości 2,4 m od osi obrotu, usiadło dziecko o masie 18 kg. W jakiej odległości od osi obrotu powinien usiąść tata o masie 80 kg, aby huśtawka mogła znaleźć się w równowadze?
- 3*. Wciągarka służy do podnoszenia materiałów budowlanych na wyższe piętra. Przy zastosowaniu krążka nieruchomego może podnosić elementy o ciężarze dochodzącym do 4000 N. Oblicz, z ilu minimalnie krążków powinien składać się wielokrążek, aby wciągarka mogła unieść ładunek o ciężarze 16 000 N.
- 4*. Do wyciągania wody ze studni rolnik korzystał z kołowrotu, którego średnica walca wynosiła 24 cm, a korba miała promień 0,5 m. Jaką siłą działał rolnik, wyciągając z głębokości 6 m wiadro z wodą o łącznej masie 10 kg? Ile razy (w przybliżeniu) musiał obrócić korbą? Jaką wykonał pracę? Pomijamy siły tarcia i przyjmujemy $g \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.
- 5*. Do rozłupania drewnianego klocka użyto stalowego klina, którego długość ściany bocznej wynosiła 16 cm, a długość grzbietu 4 cm. Siła, z jaką uderzono w klin, miała wartość 250 N. Oblicz wartość siły działającej na drewno.
- 6*. Na rysunku przedstawiono dwa koła zębate, z których koło A ma 24 zęby, a koło B – 12 zębów. Ile obrotów na sekundę wykona małe koło, jeśli duże wykonuje dziesięć obrotów na sekundę?
7. Jakie są wartości sił F_1 , F_2 , F_3 utrzymujących w równowadze dźwignie w sytuacjach przedstawionych na rysunkach? Przyjmij $g \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.



Rys. 4.30. Rysunek do zadania 6.

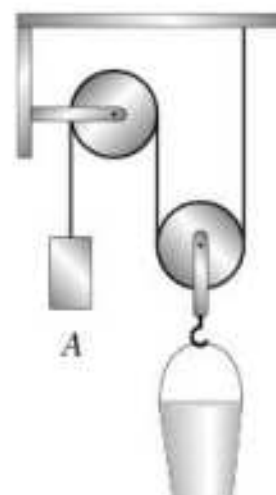
- A. 10 N; 10 N; 0,25 N
- B. 20 N; 10 N; 2,5 N
- C. 20 N; 5 N; 2,5 N
- D. 20 N; 5 N; 10 N



Rys. 4.31. Rysunek do zadania 7.

8*. Układ przedstawiony na rysunku był w równowadze. Następnie jeden z dwóch obciążników o jednakowych masach podwieszono w punkcie A, a drugi umieszczono w wiaderku. Zaniedbując siły oporu, można stwierdzić, że wiaderko:

- A. nadal pozostanie w spoczynku,
- B. zacznie się wznosić,
- C. zacznie opadać ruchem jednostajnym,
- D. zacznie opadać ruchem przyspieszonym.



Rys. 4.32. Rysunek do zadania 8.

4.5. Badanie warunków równowagi dźwigni

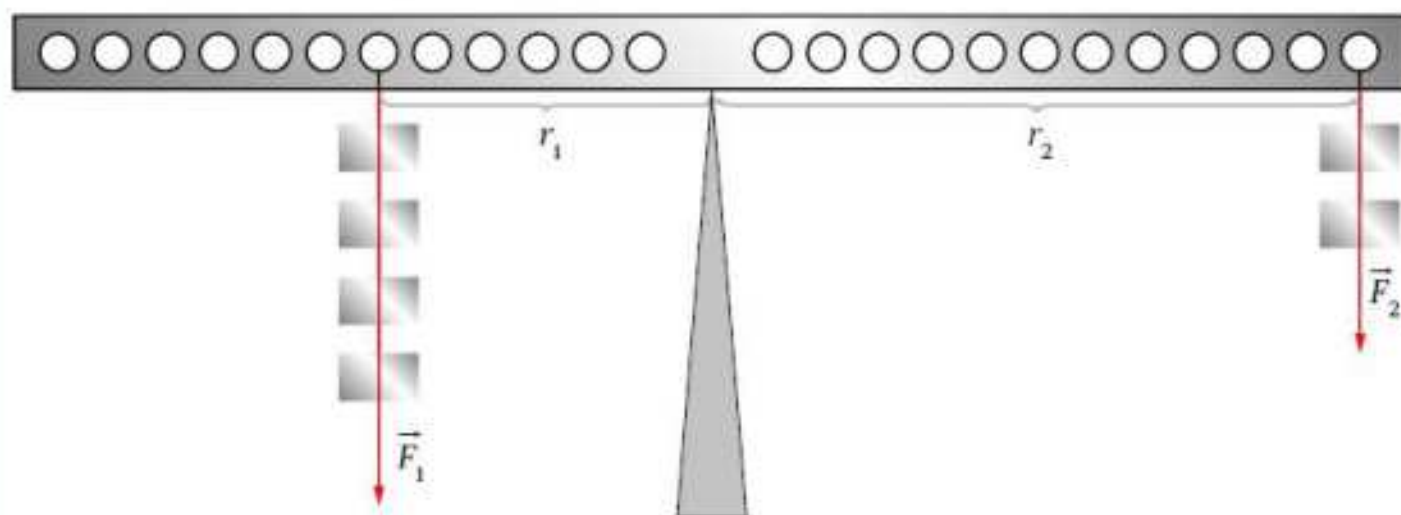
Dźwignia dwustronna

Doświadczenie 1

Do przeprowadzenia doświadczenia potrzebne są następujące przyrządy: drewniana lub metalowa listwa o długości około 1 m z zaczepami lub otworami do zawieszania odważników, odważniki 50-gramowe, statyw, linijka z podziałką milimetrową.

Listwę zawieszamy na statywie w połowie jej długości tak, aby mogła się swobodnie obracać. Sprawdzamy, czy otrzymana w ten sposób dźwignia dwustronna jest w równowadze. Nieobciążona listwa powinna utrzymywać pozycję poziomą. Jeżeli nie, trzeba ją wypoziomować, dolepiając kawałki plasteliny.

Na lewym ramieniu dźwigni zawieszamy kilka odważników w dowolnie wybranym miejscu. Na prawym ramieniu zawieszamy inną liczbę odważników w takiej odległości od osi obrotu, aby zrównoważyć dźwignię.



Rys. 4.33. Badanie równowagi dźwigni dwustronnej.

Mierzymy odległość r_1 odważników na lewym ramieniu od osi obrotu, a następnie odległość r_2 odważników na prawym ramieniu od osi. Obliczamy ciężar F_1 wszystkich odważników zawieszonych na lewym ramieniu, mnożąc ich liczbę n_1 przez masę jednego odważnika

($m = 50 \text{ g} = 0,05 \text{ kg}$) i przez przyspieszenie ziemskie ($g \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$):

$$F_1 = n_1 mg.$$

Tak samo obliczamy ciężar F_2 wszystkich odważników zawieszonych na prawym ramieniu:

$$F_2 = n_2 mg.$$

Wyniki wpisujemy do tabeli.

Zmieniamy liczbę obciążników i ich odległości od osi obrotu. Ponownie mierzymy odległości r_1 i r_2 , obliczamy ciężary odważników F_1 i F_2 . Wyniki wpisujemy do tabeli.

Powtarzamy wszystkie czynności kilka razy.

Tabela 4.1. Przykładowe wyniki

Lp.	r_1 , m	F_1 , N	$r_1 \cdot F_1$, N · m	r_2 , m	F_2 , N	$r_2 \cdot F_2$, N · m
1.	0,15	2,0	0,30	0,30	1,0	0,30
2.	0,20	1,5	0,30	0,12	2,5	0,30
3.	0,60	0,5	0,30	0,10	3,0	0,30

Porównując wyniki zawarte w tabeli, zauważysz, że iloczyny długości ramion i wartości ciężarów po obu stronach osi obrotu są jednakowe. Możemy więc zapisać wniosek, że dźwignia dwustronna jest w równowadze wtedy, gdy iloczyn długości ramienia i wartości sił działających po obu stronach osi obrotu jest taki sam:

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2.$$

Jest to **warunek równowagi dźwigni dwustronnej**.

Chcesz wiedzieć więcej?

Wyznaczenie masy ciała za pomocą dźwigni dwustronnej

Wniosek wynikający z doświadczenia można wykorzystać do wyznaczenia masy ciała. Na lewym ramieniu dźwigni, w połowie odległości od osi obrotu zawieszamy ciało o nieznannej masie m_1 . Odpowiednią liczbę odważników o znanej masie m_2 zawieszamy na prawym ramieniu dźwigni w takiej odległości od osi obrotu, aby dźwignia była w równowadze. Mierzmy odległości ciała r_1 i odważników r_2 od osi obrotu, a następnie, korzystając z warunku równowagi dźwigni, wyznaczamy nieznaną masę m_1 :

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$

$$m_1 \cdot g \cdot r_1 = m_2 \cdot g \cdot r_2$$

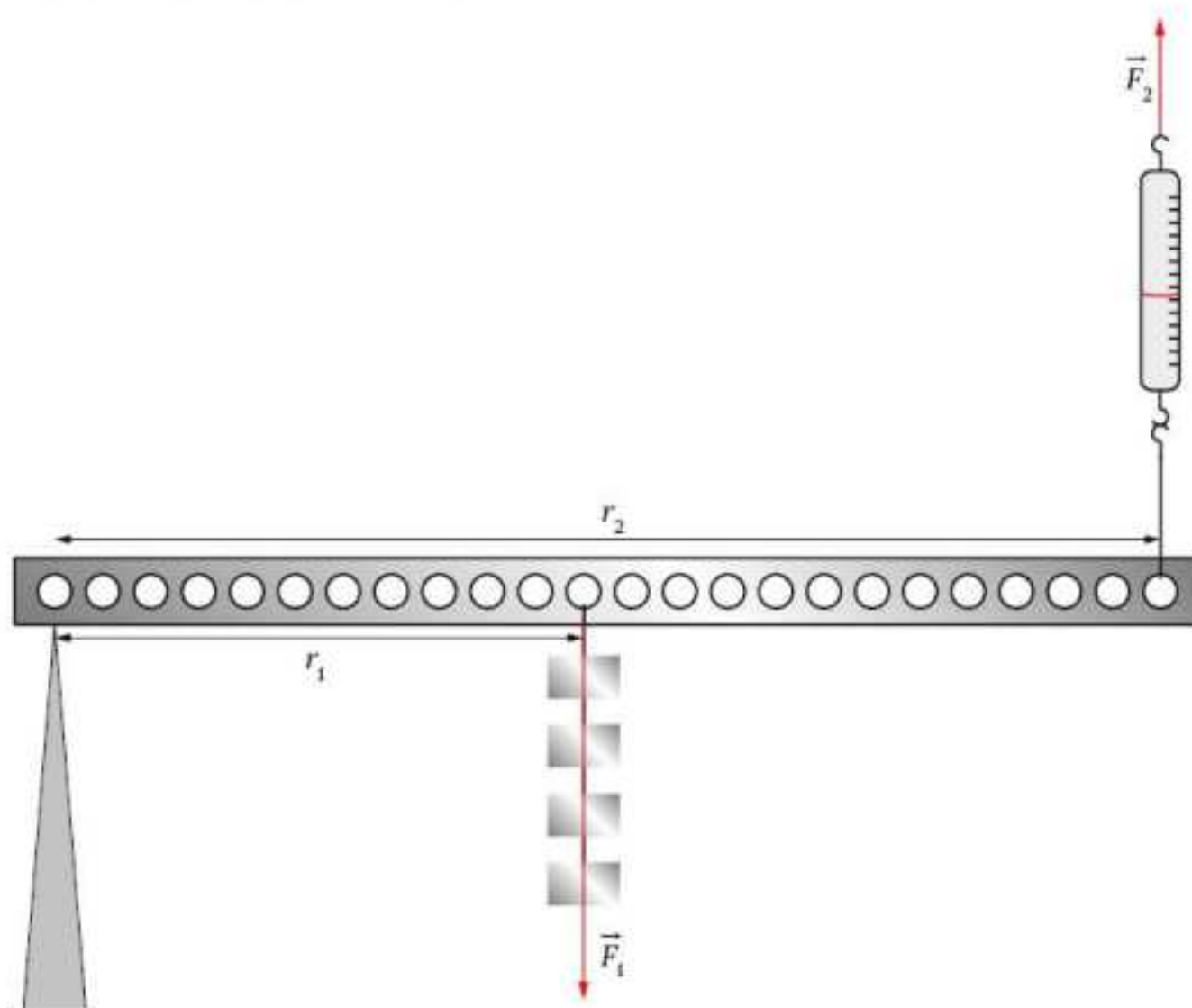
$$m_1 = m_2 \cdot \frac{r_2}{r_1}$$

Dźwignia jednostronna

Doświadczenie 2

Do doświadczenia potrzebne są te same przyrządy co poprzednio.

Jeden koniec listwy mocujemy do statywu tak, aby mogła się swobodnie obracać. Otrzymujemy w ten sposób dźwignię jednostronną. W dowolnej odległości od punktu podparcia zawieszamy odważniki. Do drugiego końca listwy zaczepiamy siłomierz i trzymamy go, działając siłą F_2 tak, aby listwa była pozioma.

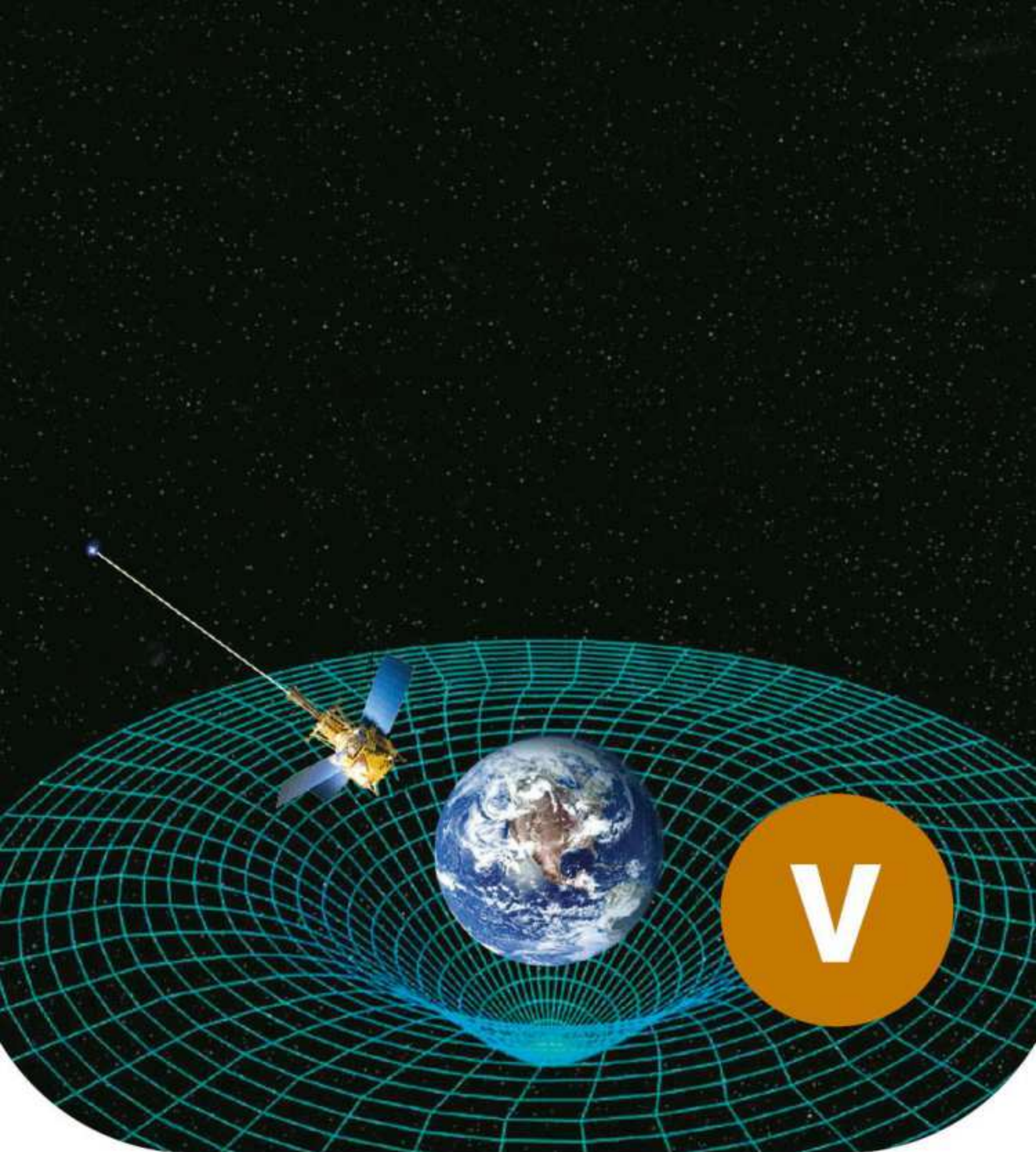


Rys. 4.34. Badanie równowagi dźwigni jednostronnej.

Mierzymy odległość r_1 odważników od osi obrotu i odległość r_2 punktu zaczepienia siłomierza od osi. Odczytujemy wskazanie siłomierza F_2 , gdy dźwignia jest w równowadze. Znając masę odważników, obliczamy ich ciężar F_1 . Wyniki wpisujemy do tabeli. Mocujemy siłomierz w innym miejscu. Ponownie mierzymy odległość r_2 i odczytujemy nowe wskazanie siłomierza F_2 . Powtarzamy pomiary dla innych położень odważników i różnej ich liczby. Wszystkie wyniki wpisujemy do tabeli. Porównując te wyniki, otrzymamy analogiczny wniosek, jak w przypadku dźwigni dwustronnej:

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2.$$

Dźwignia jednostronna jest w równowadze wtedy, gdy iloczyn długości ramienia i wartości obu działających sił jest taki sam.

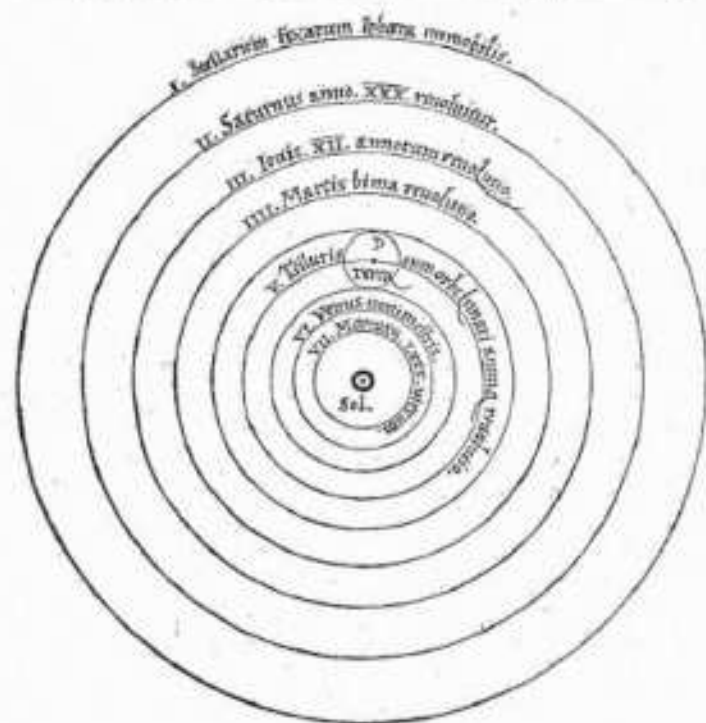


GRAWITACJA I ELEMENTY ASTRONOMII

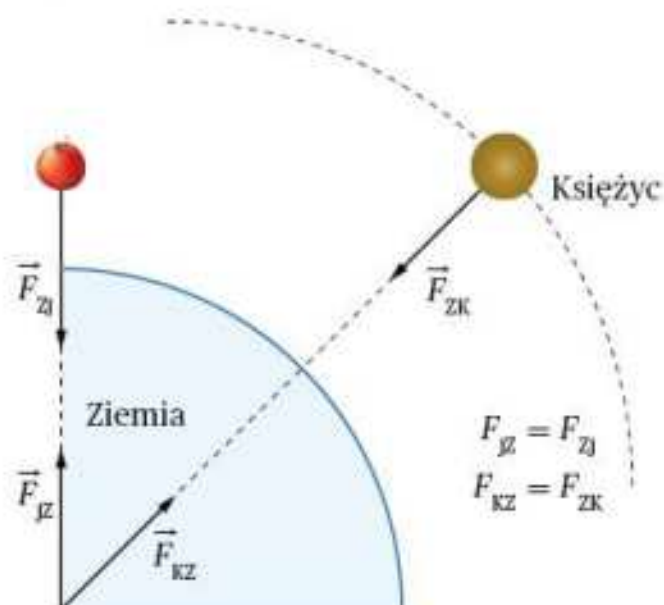
5.1. Prawo powszechnego ciążenia

NICOLAI COPERNICI

net, in quo terram cum orbe lunari tanquam epicyclo contineri diximus. Quinto loco Venus nono mense reducitur. Sextum denique locum Mercurius tenet, octuaginta dierum spacio circū currens. In medio uero omnium residet Sol. Quis enim in hoc



Rys. 5.1. Rysunek z dzieła Mikołaja Kopernika *O obrotach sfer niebieskich*.



Rys. 5.2. Siły grawitacji działające między jabłkiem, Ziemią i Księżycem (na rysunku nie zachowano proporcji rozmiarów i odległości).

Od czasów starożytnych przyjmowano, że ruch planet odbywa się po orbitach kołowych. Uważano jednak, że Słońce oraz planety krążą wokół Ziemi. W pierwszej połowie XVI wieku polski astronom Mikołaj Kopernik (1473–1543) sformułował teorię głoszącą, że to Ziemia i pozostałe planety krążą wokół Słońca po orbitach kołowych.

Warunkiem koniecznym ruchu po okręgu jest występowanie siły dośrodkowej. Skoro Ziemia porusza się po okręgu wokół Słońca, a Księżyc po okręgu wokół Ziemi, to zarówno na Ziemię, jak i na Księżyc musi działać siła dośrodkowa. Co jest jej źródłem?

Teoria Kopernika opisywała ruch planet, ale nie mówiła, skąd pochodzą siły utrzymujące planety na orbitach. Teorię tę rozwinął Johannes Kepler (1571–1630), który na podstawie wieloletnich obserwacji sformułował prawa ruchu planet. Jednak za czasów Kopernika i Keplera panowało przekonanie, że ruchy ciał niebieskich nie podlegają prawom fizyki ziemskiej. Wyjaśnienie podał dopiero Isaak Newton (1643–1727). Podobno pewnego dnia, kiedy odpoczywał pod jabłonią i zastanawiał się, skąd pochodzi siła powodująca ruch Księżyca, zauważył jabłko spadające na ziemię. Wtedy uzmysłowił sobie, że siła powodująca spadanie jabłka i siła utrzymująca Księżyc na orbicie mają ten sam charakter.

Z trzeciej zasady dynamiki wiadomo, że przyciąganie ciał jest wzajemne, skoro więc Ziemia przyciąga jabłko siłą $\vec{F}_{ZJ}$, to jabłko również przyciąga Ziemię siłą $\vec{F}_{JZ}$. Obydwie te siły mają takie same wartości. Również Ziemia i Księżyc przyciągają się wzajemnie siłami $\vec{F}_{ZK}$ i $\vec{F}_{KZ}$ o takich samych wartościach. Siły te Newton nazwał **siłami grawitacji**.

Idąc dalej tokiem tego rozumowania, uczony uznał, że skoro Ziemia krąży wokół Słońca, to Słońce musi przyciągać Ziemię siłą grawitacji (podobnie jak Ziemia przyciąga Księżyc). Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki Ziemia musi przy-

ciągać Słońce siłą o takiej samej wartości. To samo dotyczy innych planet krążących wokół Słońca. Newton uogólnił swoje wnioski i stwierdził, że wszystkie ciała przyciągają się wzajemnie siłami grawitacji. Od czasów Newtona wiemy, że siła o tej samej naturze powoduje zarówno spadanie jabłka z drzewa, jak i ruch Księżyca wokół Ziemi oraz obieg planet wokół Słońca. Te same siły, które możemy badać, obserwując spadanie ciał na Ziemię, powodują ruch ciał niebieskich w kosmosie.

Aby określić, od jakich czynników zależy wartość siły grawitacji, Newton przeprowadził następujące rozumowanie. Aby planeta o masie m mogła się poruszać z prędkością v po orbicie kołowej o promieniu r , musi działać na nią – znana ci już – siła dośrodkowa o wartości: $F = \frac{mv^2}{r}$,

gdzie prędkość liniową liczymy ze wzoru: $v = \frac{2\pi r}{T}$, zatem: $F = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$.

Z obserwacji Keplera wynikało zaś, że $T^2 \sim r^3$, a zatem: $F \sim \frac{r}{r^3}$ i ostatecznie: $F_g \sim \frac{1}{r^2}$.

Newton doszedł w ten sposób do wniosku, że wartość siły grawitacji działającej na planety jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości planet od Słońca.

Uczony przyjął, że znana na Ziemi siła ciężkości $F_c = mg$, powodująca spadanie ciał, jest szczególnym przypadkiem siły grawitacji, zatem wartość siły grawitacji musi być wprost proporcjonalna do masy spadającego ciała. Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki wartość siły, którą Ziemia działa na ciało (proporcjonalna do masy ciała), jest równa wartości siły, którą ciało działa na Ziemię (proporcjonalnej do masy Ziemi). Wartość każdej z tych sił musi więc być wprost proporcjonalna do mas obu oddziałujących ciał: $F_g \sim m_1 \cdot m_2$.

Ostatnie zależności można zapisać razem:

$$F_g \sim \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$$

Symbol proporcjonalności można zastąpić znakiem równości, wstawiając do wzoru stały współczynnik proporcjonalności. Oznaczono go literą G i nazwano **stałą grawitacji**.

Ostatecznie więc wartość siły grawitacji, jaką działają na siebie wzajemnie dwa ciała o masach m_1 i m_2 , wyraża się wzorem:

$$F_g = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

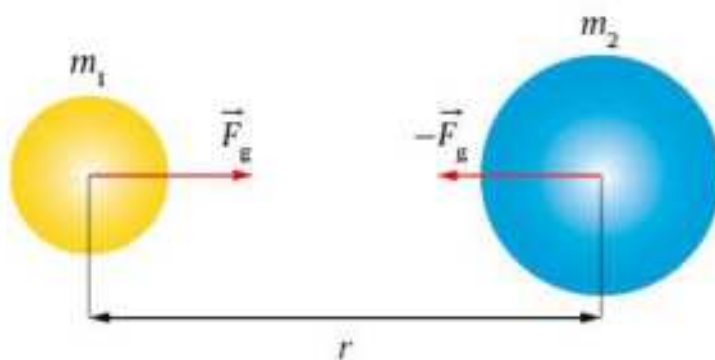
gdzie r oznacza odległość między środkami ciał.

Przedstawiony wzór można stosować dla ciał o symetrii kulistej (np. jednorodnych kul) oraz ciał, które można potraktować jako punkty materialne (gdy odległość między nimi jest znacznie większa od ich rozmiarów). Wszystkie wnioski wynikające z rozważań Newtona zawiera **prawo powszechnego ciążenia**, nazywane też **prawem powszechnej grawitacji**.

Prawo powszechnego ciążenia (prawo powszechnej grawitacji)

Każde dwa ciała przyciągają się wzajemnie siłami grawitacji F_g o wartości wprost proporcjonalnej do iloczynu mas tych ciał i odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między ich środkami.

Rys. 5.3. Siły grawitacji działające między dwoma ciałami leżącymi na prostej przechodzącej przez środki ciał.



Prawo powszechnej grawitacji tłumaczy spadanie ciał na Ziemię, ruch planet i komet w Układzie Słonecznym, gwiazd w Galaktyce, a nawet ruch galaktyk, rządzi więc całą mechaniką Kosmosu.

Stałą grawitacji G wyznaczono doświadczalnie. Jej wartość uzyskana w wyniku współczesnych pomiarów wynosi:

$$G = (6,673 \pm 0,003) \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}.$$

Ze względu na bardzo małą wartość stałej grawitacji siły przyciągania grawitacyjnego są często zbyt małe, żeby można było zaobserwować efekt ich działania.

Przykład 1

Oblicz wartość siły wzajemnego przyciągania się dwóch kul o masie 100 kg każda, których środki są odległe od siebie o 40 cm. Czy kule mogą ruszyć z miejsca, jeżeli maksymalna wartość siły tarcia statycznego wynosi 49 N?

Rozwiązanie:

$$m_1 = m_2 = m = 100 \text{ kg}$$

$$r = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$$

$$T_{\text{max}} = 49 \text{ N}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$$

Obliczamy wartość siły grawitacji przyciągania się dwóch kul.

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

Podstawiamy wartości liczbowe.

$$F_g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{(100 \text{ kg})^2}{(0,4 \text{ m})^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{10^4 \text{ kg}^2}{0,16 \text{ m}^2} \approx 4,17 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

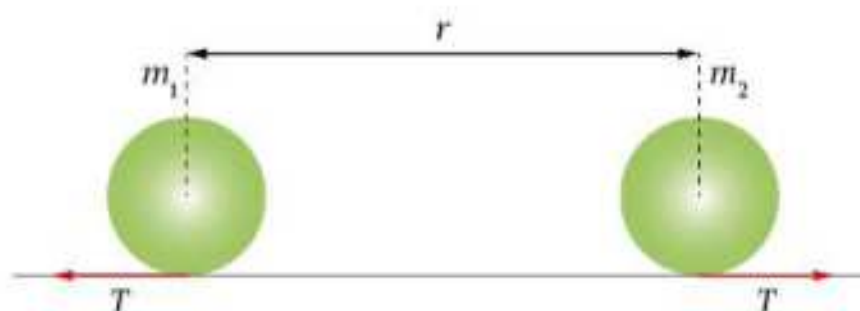
Porównamy siłę grawitacji z maksymalną siłą tarcia statycznego, obliczając ich stosunek.

$$\frac{F_g}{T_{\text{max}}} = \frac{4,17 \cdot 10^{-8} \text{ N}}{49 \text{ N}} = 8,5 \cdot 10^{-9}$$

Siła grawitacji działająca na obie kule jest ponad 10 milionów razy mniejsza od maksymalnej siły tarcia statycznego, więc nie może ich wprowadzić w ruch.

Jeśli jednak masa przynajmniej jednego z przyciągających się ciał jest wystarczająco duża (np. masa Ziemi), to siłę grawitacji łatwo zaobserwować. Codziennie doświadczamy skutków działania sił grawitacji pochodzących od naszej planety – w postaci sił ciężkości działających na wszystkie ciała.

Znając wartość stałej grawitacji, można w prosty sposób obliczyć masę naszej planety.



Rys. 5.4. Rysunek do przykładu 1.

Przykład 2

Wiedząc, że stała grawitacji ma wartość $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$, przyspieszenie ziemskie $g \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, a promień Ziemi $R_Z = 6370 \text{ km}$, oblicz masę Ziemi.

Rozwiązanie:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}, \quad g \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \quad R_Z = 6370 \text{ km} = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$M_Z = ?$$

Przyjmujemy, że wartość siły ciężkości F_c działającej na ciało znajdujące się na powierzchni Ziemi jest równa sile grawitacji F_g :

$$F_c = F_g$$

$$mg = \frac{GMm}{r^2}$$

Odległość między środkami ciał jest równa promieniowi Ziemi: $r = R_Z$

$$M = \frac{gR_Z^2}{G}$$

$$M_Z = \frac{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (6,37 \cdot 10^6 \text{ m})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}} \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

Sily grawitacji, o których mówi prawo powszechnego ciążenia, mają inną naturę niż sily, które poznaliśmy dotychczas. Aby klocek leżący na podłodze wprowadzić w ruch, trzeba podziałać na niego siłą. Twoje dłonie są w bezpośrednim kontakcie z klockiem. Jeśli ten sam klocek upuścisz z pewnej wysokości, to będzie spadał, gdyż Ziemia przyciąga go siłą grawitacji. Tym razem klocek i Ziemia nie stykają się ze sobą. Jak widzisz, siła grawitacji działa na odległość, w przeciwieństwie do sily, jaką ty musisz działać, aby przesunąć klocek.

PYTANIA I ZADANIA

1. Jak i ile razy zmienilaby się siła wzajemnego oddziaływania między Ziemią i Księżycem, gdyby Księżyc miał dwa razy większą masę i znajdował się dwa razy dalej od Ziemi?
2. Ile wynosilby twój ciężar na Księżycu? Masa Księżycza jest 81 razy mniejsza od masy Ziemi, a promień Księżycza jest 3,66 razy mniejszy od promienia Ziemi.
- 3*. Oblicz wartość sily, jaką przyciągają się dwie stykające się ze sobą ołowiane kule o średnicy $d = 1 \text{ m}$ każda. Gęstość ołowiu wynosi $\rho = 11,3 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, a stała grawitacji $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$.
4. Satelita o masie 2000 kg krąży po orbicie przebiegającej na wysokości $h = R_Z$ nad powierzchnią Ziemi. Jeżeli przyjmujemy, że przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni Ziemi wynosi $g \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, to ile wynosi siła grawitacji działająca na satelitę?

5*. Odległość Księżyca od Ziemi wynosi $r = 384\,000\text{ km}$, a stosunek masy Księżyca do masy Ziemi jest równy $k = 1 : 81$. Oblicz, w jakiej odległości r_1 od środka Ziemi należałoby umieścić ciało, aby siły przyciągania pochodzące od Ziemi i Księżyca wzajemnie się równoważyły.

6. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

Gdyby promień Ziemi przy zachowanej masie był dwa razy mniejszy, to:

1.	siła ciężkości byłaby mniejsza.	P	F
2.	gęstość Ziemi byłaby dwa razy większa.	P	F
3.	siła ciężkości działająca na ciało o masie 10 kg wyniosłaby około 392 N ($g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$).	P	F

7. Ciało oddalono od powierzchni Ziemi tak, że siła przyciągania ziemskiego zmniejszyła się dziewięć razy. Wtedy odległość tego ciała od powierzchni Ziemi (R_Z – promień Ziemi) wynosiła:

A. R B. $2R$ C. $3R$ D. $9R$

8. Wymiarem stałej grawitacji jest:

A. $\text{m}^{-3} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^2$ B. $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ C. $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \text{s}^2$ D. $\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^2 \cdot \text{s}^2$

5.2. Stan nieważkości

Mówiąc o lotach kosmicznych, często się wspomina, że astronauta znajdują się w stanie przeciążenia lub w stanie nieważkości. O tych intrygujących zjawiskach była już mowa, gdy analizowaliśmy siły działające na skrzynię umieszczoną na wadze sprężynowej w poruszającej się windzie (rozdział 3.4.).



Chcesz wiedzieć więcej?

Wiemy już, że stan przeciążenia występuje w windzie poruszającej się z przyspieszeniem zwróconym do góry. Wówczas siła nacisku, jaką ciało wywiera na podłoże, jest większa od siły ciężkości. Analogiczna sytuacja występuje podczas startu rakiety kosmicznej. Rakieta startuje z rosnącym przyspieszeniem zwróconym pionowo w górę. W pierwszych sekundach ruchu jej prędkość i przyspieszenie nie są zbyt duże, w chwili startu przyspieszenie wynosi około $3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ i rośnie do około $40 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, czyli $4g$. W kabinie załogi występuje stan przeciążenia. Różnica między ruchem rakiety a ruchem windy polega głównie na tym, że przyspieszenia, z którymi poruszają się rakiety, są znacznie większe niż przyspieszenie windy. Właśnie dlatego przeciążenia w rakietach są znacznie większe niż w windach.

Znaczne przeciążenie jest szkodliwe dla organizmu, zwłaszcza gdy przyspieszenie $\vec{a}$ (np. startującej rakiety) jest zwrócone wzdłuż tułowia od nóg do głowy. Stan przeciążenia powoduje wówczas odpływ krwi z mózgu i gromadzenie się jej w dolnych częściach tułowia. Gdy przyspieszenie $a = 5g$ (czyli jest pięć razy większe od przyspieszenia ziemskiego), to dochodzi do niedokrwienia siatkówki oka, może nastąpić utrata zdolności widzenia lub nawet utrata przytomności. Przyspieszenia poprzeczne są mniej niebezpieczne dla zdrowia, dlatego podczas startu rakiety astronauta przyjmuje pozycję pólleżącą. Negatywne skutki przeciążeń zależą nie tylko od przyspieszenia rakiety, ale także od szybkości jego wzrostu – powolny wzrost jest mniej groźny. Na duże przeciążenia narażeni są nie tylko astronauta, lecz także piloci samolotów wojskowych. Przechodzą oni uciążliwe treningi w wirówkach przeciążeniowych, aby zwiększyć odporność organizmu na duże przeciążenia. Badaniem skutków przeciążeń i sposobów ich zmniejszania zajmuje się medycyna kosmiczna.



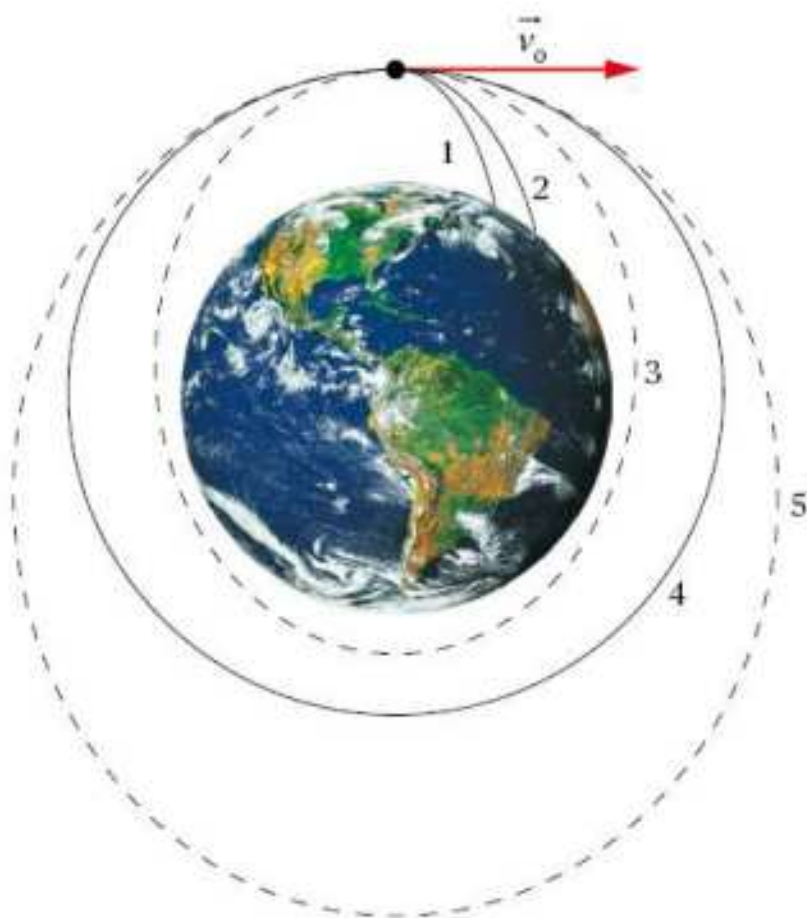
Rys. 5.5. W wirówce znajdującej się w Wojskowym Instytucie Medycyny Lotniczej w Warszawie można uzyskać przeciążenia do $16g$.

Po osiągnięciu odpowiedniej wysokości (około 185 km) statek kosmiczny ustawiany jest równolegle do powierzchni Ziemi i rozpędzany do prędkości, jaką musi mieć na danej orbicie. Następnie wyłączane są wszystkie silniki i pojazd kosmiczny staje się **sztucznym satelitą** Ziemi.

Satelita to ciało krążące wokół Ziemi (lub innej planety).

Sztuczny satelita krąży wokół Ziemi bez napędu, tak jak Księżyc, jedynie pod działaniem sił grawitacji. Wówczas nie tylko znika przeciążenie, ale w ogóle nie występuje ważkość; ciała nie wywierają na siebie wzajemnie nacisku. Astronauta nic nie waży – są w **stanie nieważkości**. Jest to taki sam stan, jak w spadającej swobodnie windzie. Na satelitę działa siła grawitacji, dzięki której porusza się po torze kołowym. Trudno jest uwierzyć, że faktycznie spada on na Ziemię.

Przeanalizujmy tory, po których porusza się kula wyrzucona z dużej wysokości poziomo z coraz większymi prędkościami. Ruch, jaki wykonuje, nazywamy **rzutem poziomym** (tor 1). Z obserwacji wiadomo, że im większą prędkość początkową $\vec{v}_0$ nadamy kuli, tym dalej ona upadnie (tor 2).



Rys. 5.6. Tory, po których porusza się ciało wyrzucone z dużej wysokości nad Ziemią w kierunku poziomym.

Jeśli prędkość ciała nie jest zbyt duża, to spadnie ono na Ziemię, poruszając się po torze parabolicznym. Ale gdy jego prędkość rośnie, ciało spada coraz dalej, aż tor osiągnie kształt orbity, która nie będzie dotykać powierzchni Ziemi (tor 3, 4 i 5). Sytuacja jest jednak taka sama, jak wtedy, gdy ciało ma małą prędkość i spada na Ziemię. Można więc powiedzieć, że satelita nieustannie spada „wokół” Ziemi. Spadając swobodnie, jest w stanie nieważkości.



Rys. 5.7. Stan nieważkości.

Ciało niekoniecznie musi spadać pionowo, by być w stanie nieważkości. Można się o tym przekonać, wykonując doświadczenie.

Doświadczenie 1

Weź do ręki pęk kluczy na kółeczku. Na skutek przyciągania ziemskiego wszystkie klucze wiszą pionowo poniżej kółka. Następnie upuść te same klucze z pierwszego piętra i obserwuj je w locie. Podczas spadania przyjmują dowolne położenia, bo są w stanie nieważkości. Nie naciskają na kółko, które spada razem z nimi.

Rzuć pęk kluczy poziomo lub ukośnie w dowolnym kierunku. Zauważysz, że klucze znów przyjmują dowolne położenia. Gdy na klucze działa tylko siła grawitacji, to – niezależnie od kształtu toru ruchu – są w stanie nieważkości.

Podobna sytuacja zachodzi w samolocie podczas lotu parabolicznego. Polega on na tym, że samolot początkowo się wznosi, a następnie zmienia kierunek lotu tak, aby lecieć jak pęk kluczy wyrzuconych ukośnie względem Ziemi. Przy odpowiednim sterowaniu lotem samolotu można uzyskać stan nieważkości. Czas takiego lotu jest ograniczony z powodu niezbyt dużej odległości samolotu od powierzchni Ziemi. W praktyce trwa krócej niż minutę. Po nim następuje faza zmiany kierunku prędkości, podczas której w samolocie występuje stan przeciążenia. Takie loty odbywają podczas treningów kandydaci na astronautów.



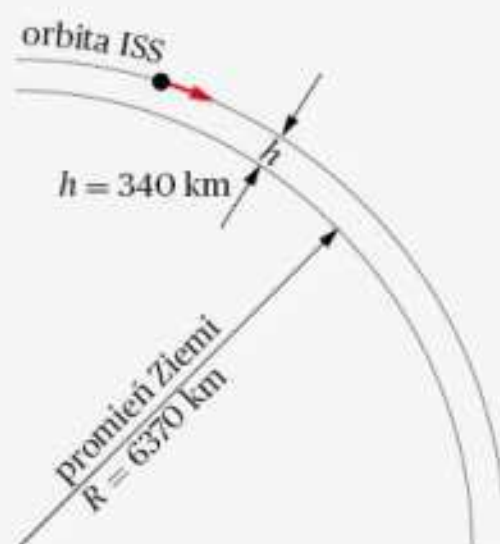
Rys. 5.8. Uczestnicy lotu parabolicznego w samolocie w stanie nieważkości.

Zapamiętaj

Stan nieważkości jest w każdym statku kosmicznym, który porusza się wyłącznie pod wpływem sił grawitacji (tak jak spadająca swobodnie winda).

Chcesz wiedzieć więcej?

Na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS), która krąży wokół Ziemi bez włączonych silników, również występuje stan nieważkości. W tym stanie ciała nie wywierają żadnego nacisku na podłogę, nie występuje siła ciężkości. Astronauta może zawisnąć między podłogą i sufitem, a upuszczona przez niego kulka nie spadnie na podłogę, lecz będzie utrzymywać się w powietrzu. Stacja ISS krąży na wysokości około 340 km nad powierzchnią naszej planety. To bardzo niewielka odległość w porównaniu z promieniem Ziemi. Tak blisko Ziemi siła grawitacji oczywiście nie może być równa zero, jest tylko około 10% mniejsza niż przy jej powierzchni. Wbrew rozpowszechnionym opiniom, przyczyną stanu nieważkości na ISS nie jest więc brak grawitacji, wręcz przeciwnie – stan nieważkości utrzymuje się w wyniku działania przyciągania grawitacyjnego, dzięki któremu stacja porusza się po orbicie.



Rys. 5.9. Porównanie wysokości, na której krąży Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (ISS), z promieniem Ziemi.



Przykład 1

Oblicz, ile razy siła grawitacji działająca na Międzynarodową Stację Kosmiczną, krążącą w odległości $h = 340$ km od powierzchni Ziemi, jest mniejsza od siły, która działałaby na stację na powierzchni Ziemi. Promień Ziemi wynosi $R = 6370$ km.

Rozwiązanie:

$$h = 340 \text{ km},$$

$$R = 6370 \text{ km}$$

Obliczamy odległość stacji krążącej po orbicie od środka Ziemi.

$$r = R + h = 6370 \text{ km} + 340 \text{ km} = 6710 \text{ km}$$

Siła grawitacji działająca na stację krążącą po orbicie wyrażona jest wzorem:

$$F_{g, \text{ na orbicie}} = G \frac{mM}{r^2},$$

gdzie G oznacza stałą grawitacji, m – masę stacji, a M – masę Ziemi.

Siła grawitacji działająca na stację na powierzchni Ziemi wynosi:

$$F_{g, \text{ na powierzchni Ziemi}} = G \frac{mM}{R^2}$$

Porównujemy wartości obu sił, obliczając ich stosunek.

$$\frac{F_{g, \text{ na orbicie}}}{F_{g, \text{ na powierzchni Ziemi}}} = \left(\frac{R}{r}\right)^2 = \left(\frac{6370 \text{ km}}{6710 \text{ km}}\right)^2 \approx 0,9 = 90\%$$

Wartość siły grawitacji działającej na stację krążącą po orbicie stanowi około 90% siły grawitacji działającej na stację znajdującą się na powierzchni Ziemi.



PYTANIA I ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego miejsca do spania na pokładzie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej nie są wyścielone materacami.
2. Czy stary zegar wahadłowy będzie działał na pokładzie promu kosmicznego, który porusza się z wyłączonymi silnikami?
- 3*. Jakie będzie wskazanie siłomierza, na którym zawieszono kulkę o masie m w kabinie promu kosmicznego startującego z przyspieszeniem o wartości $a = 2g$?
- 4*. Oblicz prędkość satelity krążącego wokół Ziemi po orbicie o promieniu r . Oprócz promienia orbity znamy stałą grawitacji G i masę Ziemi M . Wskazówka: satelita porusza się ruchem po okręgu, musi więc na niego działać siła dośrodkowa. Funkcję tej siły pełni siła grawitacji, jaką Ziemia przyciąga satelitę.
5. Stan nieważkości w rakiecie lecącej na Księżyc pojawi się w chwili, gdy:
 - A. przestanie na nią działać siła przyciągania Ziemi,
 - B. ustanie praca silników,
 - C. osiągnie ona wysokość ponad 185 km nad Ziemią,
 - D. osiągnie punkt równowagi przyciągania Ziemi i Księżyca.

- 6*. Samolot porusza się z prędkością o stałej wartości po jednym z torów pokazanych na rysunkach.

A.



B.



C.



D.



Rys. 5.10. Tory samolotu.

Wybierz właściwe uzupełnienie zdań 1 i 2 spośród A–D. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

1. Pilot doznaje stanu przeciążenia,	gdy porusza się tak, jak pokazuje rysunek	A.
2. Pilot może być w stanie nieważkości,		B.
		C.
		D.

7. W tabeli podano informacje dotyczące stanu nieważkości. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, albo F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

1.	Jest to stan, w którym na ciało nie działają żadne siły.	P	F
2.	Jest to stan, w którym wypadkowa działających sił jest równa zero.	P	F
3.	Występuje w statku kosmicznym po wyłączeniu silników.	P	F

5.3. Budowa Układu Słonecznego

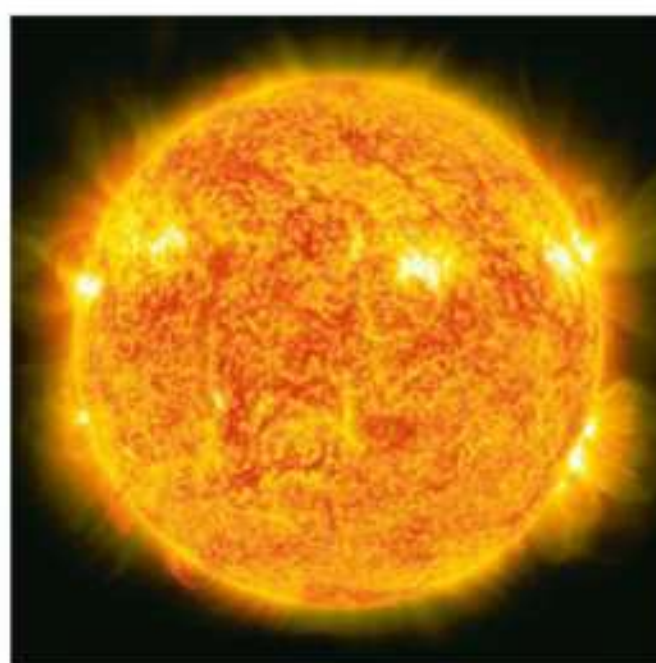
Układ Słoneczny to układ planetarny składający się ze Słońca oraz związanych z nim silami grawitacji **ciał niebieskich**:

- ośmiu planet,
- pięciu planet karłowatych,
- ponad 170 znanych księżyców (naturalnych satelitów planet),
- miliardów małych ciał niebieskich, do których zalicza się planetoidy, komety, meteoroidy i pył międzyplanetarny.

Ciała niebieskie to wszystkie obiekty występujące w przestrzeni kosmicznej poza granicą atmosfery ziemskiej.

Słońce

Słońce jest centralną gwiazdą w Układzie Słonecznym. Jest to kula zjonizowanego gazu (z jego atomów wyrwane są elektrony) o średnicy około 109 razy większej od średnicy Ziemi. Ma masę około 333 tysięcy razy większą niż masa Ziemi, co stanowi 99,86% całkowitej masy Układu Słonecznego. Około 74% tej masy to wodór, 25% – hel i niecały 1% to cięższe pierwiastki. We wnętrzu Słońca w temperaturze przekraczającej 13,5 mln stopni Celsjusza zachodzi **reakcja syntezy termojądrowej**. Reakcja ta polega na połączeniu protonów (jąder wodoru) i utworzeniu jądra helu z wydzielaniem bardzo dużej ilości energii. Część tej energii dociera do Ziemi, dzięki temu możliwe jest życie na naszej planecie.



Rys. 5.11. Przy obserwacji Słońca przez odpowiednie filtry zauważalne stają się plamy na jego powierzchni (obszary ciemniejsze niż ich otoczenie) oraz rozbłyski słoneczne (obszary jaśniejsze).

Planety

Uważne obserwacje nocnego nieba, prowadzone systematycznie przez co najmniej kilka miesięcy, pokazują, że pięć jasnych punktów zmienia nieustannie swoje położenie względem gwiazd stałych, czyli gwiazd zachowujących stałe wzajemne położenia. Ich tory zakreślane na niebie wśród gwiazd mają kształt charakterystycznych pętli. Starożytni nazwali te obiekty **planetami** (od greckiego słowa *planetes* – ‘blukający się’) i nazwali imionami bogów z mitologii rzymskiej: Merkury (bóg handlu), Wenus (bogini miłości), Mars (bóg wojny), Jowisz (bóg nieba, burzy i deszczu) oraz Saturn (bóg rolnictwa).

Planety leżące najbliżej Ziemi można zobaczyć gołym okiem jako jasne punkty na nocnym niebie. Nie świecą one własnym światłem, lecz odbitym od ich powierzchni światłem słonecznym.

Najlepiej widoczną planetą jest Wenus, nazywana też Gwiazdą Poranną lub Jutrzenką, którą można obserwować przed wschodem Słońca. Mars, Jowisz i Saturn mogą być widoczne nawet przez całą noc. Przez lornetkę planety widać w postaci jasnych tarczek, natomiast gwiazdy, obserwowane przez lornetkę, a nawet przez najlepsze lunety, są widoczne jako punkty.



Rys. 5.12. Zmiany położenia Marsa w drugiej połowie 2004 roku. Obraz uzyskano przez komputerowe nałożenie 29 zdjęć. Powyżej toru Marsa widoczne są zmiany położenia planety Uran.

Chcesz wiedzieć więcej?

Próby wyjaśnienia obserwowanych ruchów planet podejmowało wielu starożytnych uczonych. Jedną z najważniejszych teorii stworzył Ptolemeusz (100–178 n.e.). Jest ona nazywana **teorią geocentryczną** (z greckiego: *geos* – ‘Ziemia’), gdyż według niej Ziemia znajdowała się w centrum Wszechświata. Nieruchomą, kulistą Ziemię obiegały po okręgach ze stałą szybkością Księżyc, Słońce i planety, a także sfera z gwiazdami. Planety krążyły po mniejszych okręgach, a te z kolei obiegały Ziemię po dużym okręgu. Dobierając odpowiednio promienie wszystkich okręgów oraz okresy obiegu, można było dokładnie wykreślić tory planet, tak aby zgadzały się one z obserwacjami. Można było również przewidywać położenie planet w przyszłości.



Rys. 5.13. Układ geocentryczny Ptolemeusza.



Epokowym momentem w rozwoju poglądów na budowę Wszechświata było stworzenie przez Mikołaja Kopernika **teorii heliocentrycznej** (z greckiego: *helios* – ‘Słońce’). Według niej Słońce jest centralnym ciałem układu planetarnego, natomiast Ziemia i inne planety obiegają Słońce po okręgach. Pozorny ruch dzienny Słońca na niebie wynika z ruchu obrotowego Ziemi wokół własnej osi. W ten sposób powstał bardzo prosty opis ruchu planet.



Rys. 5.14. Mikołaj Kopernik (1473–1543)



Rys. 5.15. Układ heliocentryczny Mikołaja Kopernika.

Teorię Kopernika rozwinął Johannes Kepler (1571–1630), który na podstawie wieloletnich obserwacji sformułował prawa ruchu planet. Kepler odkrył, że planety poruszają się nie po okręgach, lecz elipsach, i dlatego zmienia się odległość planety od Słońca. Jednakże elipsy, po których planety obiegają Słońce, są w niewielkim stopniu spłaszczone i niewiele różnią się od okręgów. Na przykład najmniejsza odległość Ziemi od Słońca wynosi 147,1 mln kilometrów, a największa odległość – 151,1 mln kilometrów. Różnica jest niewielka – wyrażona w procentach wynosi około 2,7%. Z praw Keplera wynika, że prędkość planety się zmienia: najszybciej porusza się wtedy, gdy jest najbliżej Słońca, a najwolniej – gdy znajduje się najdalej od niego. Jednak różnice między tymi prędkościami nie są duże i nie przekraczają kilku procent. Na przykład największa prędkość Ziemi wynosi $30,3 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, a najmniejsza $29,3 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Wnioski wynikające z praw Keplera niewiele się różnią od założeń teorii Kopernika – ruch planet wokół Słońca można traktować jako ruch jednostajny po okręgu.

Przykład 1

Odległość Ziemi od Słońca wynosi w przybliżeniu 150 mln km. Oblicz prędkość, z jaką Ziemia obiega Słońce. Wynik podaj w km/h.

Rozwiązanie:

$$r = 150 \text{ mln km}, \quad T = 365 \text{ d} = 365 \cdot 24 \text{ h} = 8760 \text{ h}$$

$$v = ?$$

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

$$v = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 150\,000\,000 \text{ km}}{8760 \text{ h}}$$

$$v = 107534 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Od czasów starożytnych aż do końca XVIII wieku znanych było łącznie z Ziemią tylko 6 planet. Kolejną planetę odkryto w 1781 roku i nazwano ją Uranem, nawiązując do zaczerpniętych z mitologii nazw pozostałych planet (Uran to w mitologii greckiej bóg nieba). Ósmą planetę odkryto w 1846 roku i nadano jej nazwę Neptun, od imienia mitologicznego boga mórz. Wszystkie planety poruszają się po swych orbitach w tę samą stronę, wirując równocześnie wokół własnej osi.

Tabela 5.1. Podstawowe dane charakteryzujące planety. Masy planet wyrażono w stosunku do masy Ziemi M_Z . Odległości planet wyrażono w stosunku do odległości Ziemi od Słońca r_{SZ} .

Planeta	Rodzaj	Odległość od Słońca, r_{SZ}	Okres obiegu, rok	Średnica, km	Masa, M_Z	Temperatura powierzchni, °C	Skład atmosfery	Znane księżyce
Merkury	skalista	0,39	0,24	4 878	0,056	od -200 do +430	praktycznie brak	brak
Wenus	skalista	0,72	0,62	12 104	0,815	+450	CO ₂ (97%)	brak
Ziemia	skalista	1	1	12 756	1	od -88 do +58	N ₂ (78%) O ₂ (21%)	1
Mars	skalista	1,52	1,88	6 778	0,107	od -140 do +20	CO ₂ (95%)	2
Jowisz	gazowa	5,2	11,86	142 800	317,9	ok. -120	H ₂ (75%) He (24%)	79
Saturn	gazowa	9,56	29,5	120 000	95,15	od -130 do -180	H ₂ (93%) He (6%)	62
Uran	gazowo-lodowa	19,2	84	51 120	14,54	ok. -200	H ₂ (83%) He (15%)	27
Neptun	gazowo-lodowa	30,1	165	49 200	17,23	ok. -220	H ₂ (80%) He (19%)	14

Chcesz wiedzieć więcej?

Planety znajdują się w bardzo dużych odległościach od Słońca. Podawanie tych odległości w metrach czy nawet kilometrach wymaga stosowania wielkich liczb (odległość Ziemi od Słońca wynosi ponad sto milionów kilometrów). Dlatego w astronomii zamiast jednostki metr czy kilometr często używa się jednostek miliardy razy większych, takich jak:

– **jednostka astronomiczna**, oznaczana AU (z ang. *astronomical unit*), jest równa średniej odległości między Ziemią i Słońcem i wynosi: $1 \text{ AU} = 149\,600\,000 \text{ km} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$;

– **rok świetlny**, oznaczany ly (z ang. *light year*), to odległość, jaką w ciągu jednego roku przebywa światło biegnące z prędkością $300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, i wynosi:

$$1 \text{ ly} = 63241 \text{ AU} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}.$$





Przykład 2

Oblicz czas, w którym światło dociera ze Słońca na Ziemię.

Rozwiązanie:

Znasz już prędkość światła: $v = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ oraz odległość między Słońcem i Ziemią: $s = 149\,600\,000 \text{ km}$.

Korzystamy ze wzoru na drogę w ruchu jednostajnym prostoliniowym:

$$s = v \cdot t$$

$$t = \frac{s}{v}, \quad t = \frac{149\,600\,000 \text{ km}}{300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}} = 498,67 \text{ s} \approx 8,3 \text{ min}$$

Ze względu na budowę planety można podzielić na dwie grupy:

- a) planety typu ziemskiego (wewnętrzne) – małe skalne planety, do których należą Merkury, Wenus, Ziemia i Mars;
- b) planety gazowe olbrzymy (zewnętrzne) – planety o dużych rozmiarach i masach, ale o małych gęstościach: Jowisz, Saturn, Uran i Neptun.

Do 2006 roku do grona planet zaliczano również odkrytego w 1930 roku Plutona. Okazało się jednak, że Pluton ma bardzo niewielką masę, wynoszącą zaledwie 0,22% masy Ziemi, i pod wieloma względami różni się od pozostałych planet obiegających Słońce. Dlatego 24 sierpnia 2006 roku Międzynarodowa Unia Astronomiczna przyjęła nową definicję planety, zgodnie z którą Plutona nie uważa się już za planetę.

Planeta jest to ciało niebieskie obiegające gwiazdę, które ma wystarczającą masę, aby uzyskać prawie kulisty kształt, a sąsiedztwo jej orbity jest wolne od innych obiektów.

Planety karłowate

Planety karłowate to osobna kategoria ciał Układu Słonecznego wprowadzona w 2006 roku, do której zaliczono Plutona.



Rys. 5.16. Słońce, planety i planety karłowate Układu Słonecznego (rysunek przedstawia rozmiary obiektów w odpowiednich proporcjach, natomiast nie zachowuje właściwej odległości).

Planeta karłowata jest to obiekt astronomiczny pośredni między planetami a małymi ciałami niebieskimi. Obiega gwiazdę i ma wystarczającą masę, aby uzyskać prawie kulisty kształt, ale sąsiedztwo jego orbity nie jest wolne od innych obiektów.

Jak dotąd za planety karłowate Międzynarodowa Unia Astronomiczna oficjalnie uznała pięć ciał niebieskich. Są to: Ceres, Pluton, Haumea, Makemake i Eris.

Księżyc

Księżyc (naturalny satelita) jest ciałem niebieskim obiegającym planetę, planetę karłowatą lub planetoidę.

W Układzie Słonecznym odkryto do tej pory 176 naturalnych satelitów planet i około 230 naturalnych satelitów planetoid. Ziemia ma tylko jeden Księżyc; wyraz „Księżyc” pisany wielką literą oznacza naturalnego satelitę Ziemi. Mars ma dwa księżycy: Phobos i Deimos. Planety zewnętrzne posiadają całe systemy naturalnych satelitów – najwięcej ma ich Jowisz – aż 79 (stan na październik 2018). Tylko Merkury i Wenus nie mają księżyców. Również trzy spośród planet karłowatych mają księżycy – najwięcej Pluton: 5.

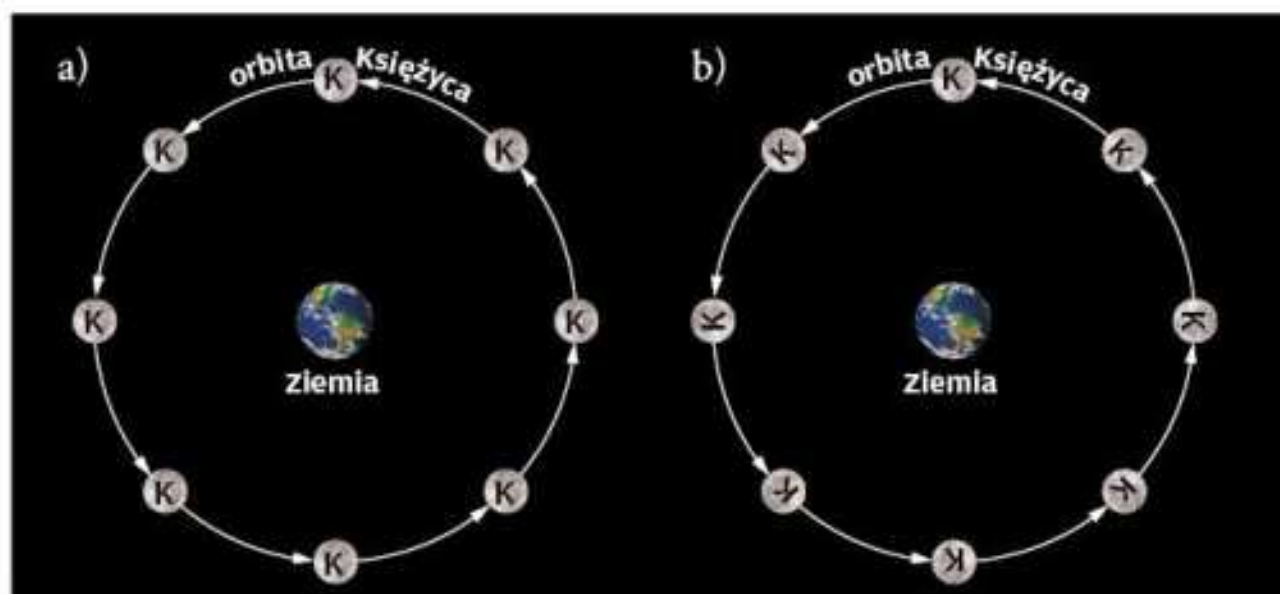
Nasz Księżyc jest po Słońcu najjaśniejszym, a zarazem najbliższym Ziemi dużym ciałem niebieskim. Nie świeci własnym światłem, ale widać go dzięki temu, że światło słoneczne odbija się od jego powierzchni. Możemy go oglądać przy bezchmurnej pogodzie i w nocy, i w dzień.

Ponieważ Księżyc nie ma atmosfery, nawet bez żadnych przyrządów astronomicznych można obserwować jego powierzchnię. Występują na niej ciemniejsze obszary, które są rozległymi równinami o nieco mniejszej zdolności odbijania światła niż pozostałe rejony. Przez lornetkę na powierzchni Księżyca widać kraterzy powstale wskutek uderzeń odłamków skalnych docierających z kosmosu.



Już bardzo dawno zauważono, że Księżyc jest zwrócony ku Ziemi ciągle tą samą stroną, a pozostała jego część nigdy nie jest widoczna z naszej planety. Można się łatwo o tym przekonać, obserwując Księżyc przez kilka dni – szczegóły na jego tarczy pozostają ciągle w tym samym miejscu. Dzieje się tak dlatego, że oprócz ruchu obiegowego wokół Ziemi Księżyc równocześnie wiruje wokół własnej osi, a przy tym okres ruchu wirowego jest taki sam, jak okres ruchu obiegowego (wynosi 27,322 dni).

Rys. 5.17. Zdjęcie Księżyca wykonane z pokładu Apollo 17, podczas ostatniej misji na Księżyc, kiedy załoga wracała na Ziemię. Prawie jedna trzecia zdjęcia obejmuje część ciemnej strony Księżyca, która nigdy nie jest widoczna z Ziemi.



Rys. 5.18. a) Gdyby Księżyc nie dokonywał obrotu wokół własnej osi, moglibyśmy go obserwować ze wszystkich stron. b) Ponieważ Księżyc dokonuje jednego obrotu wokół własnej osi w czasie jednego obiegu Ziemi, widzimy zawsze tylko jego jasną stronę.

Masa Księżycy jest 81 razy mniejsza od masy Ziemi, a jego średnica jest czterokrotnie mniejsza niż średnica kuli ziemskiej. Dlatego ciała spadają na jego powierzchnię z przyspieszeniem około sześć razy mniejszym niż na Ziemi, a ciężar ciała po przeniesieniu na Księżyc jest około sześć razy mniejszy.



Rys. 5.19. Neil Armstrong (z lewej) i Edwin Aldrin – pierwsi ludzie na Księżycu, 20 lipca 1969 r.

Małe ciała Układu Słonecznego

Małe ciało Układu Słonecznego – obiekt astronomiczny krążący wokół Słońca, który nie jest ani planetą, ani planetą karłowatą.

Do małych ciał Układu Słonecznego należą między innymi: planetoidy, komety i meteoroidy.

Planetoidy (asteroidy) są to małe ciała niebieskie o średnicach większych od umownej granicy 50 metrów i mniejszych niż 1000 kilometrów. Krążą wokół Słońca, głównie między orbitami Marsa i Jowisza. Mają stałą powierzchnię skalną lub lodową o nieregularnym kształcie, noszącą ślady zderzeń z innymi podobnymi obiektami. W maju 2018 roku znanych było ponad 770 000 planetoid, ale ocenia się, że jest ich znacznie więcej.

Od czasu do czasu pojawiają się na niebie obiekty z jasną smugą – komety. Najjaśniejszą zaobserwowano w 1882 roku. Jej blask był większy niż Księżycy w pełni i widać ją było nawet w ciągu dnia.

Komety są nieregularnymi bryłami materii, składającymi się ze skalnego rdzenia, pyłu kosmicznego oraz zestalonych gazów. Gdy kometa zbliża się do Słońca, jego ciepło powoduje uwolnienie gazów, które wraz z pyłem kosmicznym tworzą jasną głowę oraz wychodzącą z niej świecąca smugę, nazywaną warkoczem.

Komety poruszają się najczęściej po bardzo wydłużonych elipsach – pojawiają się wówczas w pobliżu Ziemi w równych odstępach czasu. Są też komety krążące po torach parabolicznych lub hiperbolicznych – można je dostrzec tylko raz w pobliżu Ziemi.

Najmniejsze okruchy materii zaobserwowane w kosmosie nazywane są meteoroidami.

Meteoroidy są okruchami skalnymi (mniejszymi od planetoid), które poruszają się po orbitach wokół Słońca. Masa meteoroidu to zwykle od 10^{-9} kg do 10^3 kg (najczęściej poniżej 10^{-6} kg), a jego rozmiar wynosi od 0,1 mm do 10 m. Obiekty jeszcze mniejsze to **pył kosmiczny**.

Meteoroidy powstały podczas formowania się Układu Słonecznego. Najwięcej ich krąży między orbitami Marsa i Jowisza. W przestrzeni kosmicznej meteoroidy zderzają się ze sobą, przez co wypadają ze swoich orbit i niekiedy wchodzą na kurs kolizyjny z Ziemią. Te, które wpadną w atmosferę ziemską, przelatują przez nią z początkową prędkością około $20 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, a na skutek oporu powietrza wyhamowują na wysokości 20–40 km, rozgrzewając się i świecąc. Świeące ślady, jakie zostawiają po sobie meteoroidy spalające się w górnych warstwach atmosfery ziemskiej, to **meteory**, nazywane także (błędnie) „spadającymi gwiazdami”. Meteory pojawiają się najczęściej w połowie sierpnia.

Niektórzy ludzie, widząc „spadające gwiazdy”, wymawiają życzenia. Często nie zdają sobie sprawy z tego, że są to tylko okruchy materii docierające z kosmosu, o rozmiarach nie większych niż kilka centymetrów.

Większość meteoroidów w trakcie hamowania, na skutek wzrostu temperatury, spala się w atmosferze. Jednak czasami, w przypadku większych obiektów, zdarza się, że ich obtopione i opalone fragmenty docierają do powierzchni Ziemi – są one nazywane są **meteorytami**. Badania meteorytów pozwoliły na określenie wieku Układu Słonecznego, który szacuje się na 4,55 miliarda lat.

PYTANIA I ZADANIA

1. Oblicz prędkość, z jaką obraca się wraz z Ziemią punkt na równiku. Promień Ziemi wynosi 6370 km.
2. Oblicz, ile czasu potrzeba (średnio), aby Ziemia w swym ruchu wokół Słońca przebyła fragment toru o długości równej swej własnej średnicy. Promień Ziemi wynosi 6370 km.
3. Narysuj wykres zależności okresów obiegu planet wokół Słońca od ich średnich odległości od Słońca. Przyjmij, że wszystkie planety poruszają się po okręgach. Potrzebne dane liczbowe znajdziesz w tabeli 5.1.
4. Piątą planetą Układu Słonecznego od Słońca jest:
A. Neptun, B. Uran, C. Saturn, D. Jowisz.
5. „Spadające gwiazdy” to w rzeczywistości:
A. sztuczne satelity, B. meteory, C. meteoryty, D. meteoroidy.



5.4. Gwiazdy i galaktyki

Na nocnym niebie obserwujemy głównie gwiazdy. W ciemną, bezchmurną i bezksiężycową noc, z dala od miejskich świateł gołym okiem można dostrzec 2500–3000 gwiazd. Przez dużą lornetkę widać na całym niebie około miliona gwiazd. Na zdjęciach nieba, uzyskanych za pomocą największych teleskopów, dostrzega się dziesiątki miliardów gwiazd.

Gwiazdy tworzą na niebie charakterystyczne figury, w których starożytni Grecy widzieli mitologicznych bohaterów, zwierzęta i różne przedmioty. Grupy gwiazd kojarzyły się Grekom z bohaterskim Perseuszem ratującym od śmierci piękną Andromedę, ze słynnym myśliwym Orionem i jego psami, a także z nimfą Kallisto i jej synem Arkasem zamienionych w Wielką i Małą Niedźwiedzicę. Ślady wydarzeń z mitologii greckiej zachowały się do dziś w nazwach **gwiazdozbiorów** zwanych też **konstelacjami**, np.: Gwiazdozbiór Andromedy, Perseusza, Oriona, Wielkiego i Małego Psa czy Gwiazdozbiór Wielkiej i Małej Niedźwiedzicy (nawiązanie do historii Kallisto i Arkasa).



Gwiazdozbiór (konstelacja) to określony obszar nieba z charakterystyczną grupą jaśniejszych gwiazd.

Dla łatwiejszej orientacji całe niebo podzielono na 88 gwiazdozbiorów. Ostateczną listę konstelacji oraz ich granice zatwierdziła Międzynarodowa Unia Astronomiczna w 1928 roku.



Mała Niedźwiedzica, zwana również **Małym Wozem**, już od dawna ma wyjątkowe znaczenie praktyczne ze względu na swe położenie wśród gwiazdozbiorów nieba północnego. Ostatnia gwiazda w „dyszlu” Małego Wozu to **Gwiazda Polarna**. Dzięki temu, że nie zmienia ona swego położenia na niebie od tysięcy lat, stanowi znakomity punkt orientacyjny, wyznaczający kierunek północny. Niegdyś wskazywała drogę karawanom na pustyni, żeglarzom na morzach i podróżnikom przemierzającym niezamieszkane obszary. Nawet dzisiaj, w czasach nowoczesnych przyrządów nawigacyjnych, Gwiazda Polarna jest nadal wykorzystywana do określania kierunku północnego.

Rys. 5.20. Do najbardziej znanych gwiazdozbiorów na naszej półkuli należą Wielka Niedźwiedzica i Mała Niedźwiedzica.

Gdy spoglądamy na niebo, mamy wrażenie, że wszystkie gwiazdy znajdują się od nas w takiej samej odległości, jakby znajdowały się na powierzchni otaczającej nas przezroczystej kuli – czyli **sfery niebieskiej**. Jest to oczywiście złudzenie, gdyż obserwując świecące punkty na niebie, nie zdajemy sobie sprawy z ogromnych różnic w odległościach tych obiektów od Ziemi.

Obserwując gwiazdy przez kilkadziesiąt minut, można zauważyć, że zmieniają one swoje położenie tak, jakby cała sfera niebieska wykonywała powolny obrót wokół osi, która przechodzi tuż obok Gwiazdy Polarnej. Jest to wynik ruchu wirowego Ziemi wokół własnej osi.



Rys. 5.21. W skład jednego gwiazdozbioru, do którego należą gwiazdy leżące blisko siebie na sferze niebieskiej, mogą wchodzić obiekty znajdujące się bardzo daleko od siebie w przestrzeni.

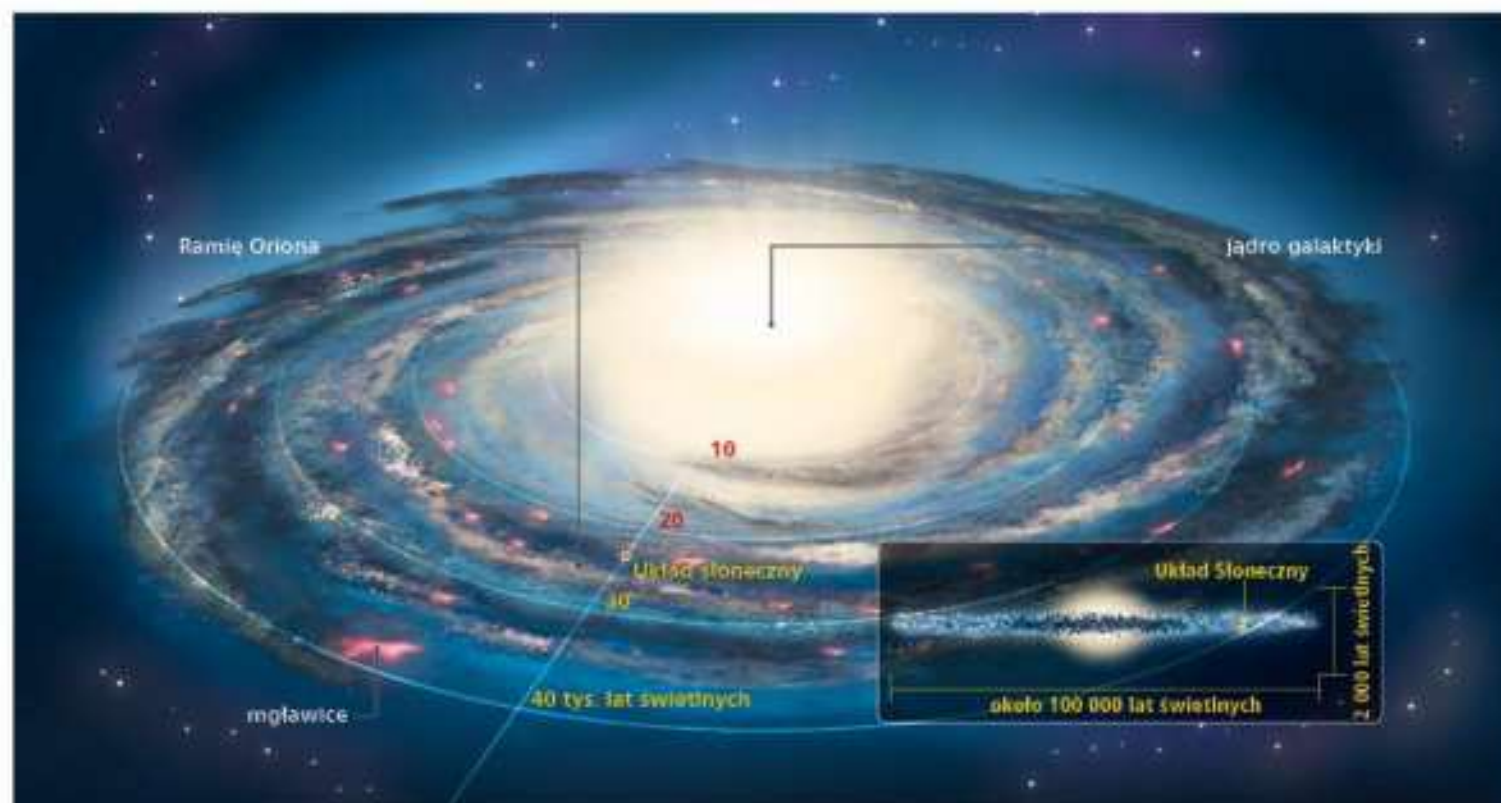


Rys. 5.22. Zdjęcie przedstawia okolice nieba w pobliżu Gwiazdy Polarnej sfotografowane nieruchomym aparatem z obiektywem szerokokątnym w czasie kilkunastuminutowej ekspozycji. Gwiazdy są widoczne w postaci koncentrycznych łuków.

W miarę upływu godzin jedne gwiazdy znikają za horyzontem, a pojawiają się nowe. Nie zmieniają się jednak wzajemne odległości między nimi. Warto też zwrócić uwagę, że w różnych porach roku widać różne gwiazdozbiory. Ich widoczność i położenie na niebie zależą również od szerokości geograficznej, z której obserwujemy niebo.

Kosmos nie jest równomiernie wypełniony gwiazdami. Występują w nim ogromne skupiska gwiazd tworzące w pustce „wyspy” materii nazywane **galaktykami**. Nasza Galaktyka (pisana wielką literą), do której należy Słońce, nosi nazwę **Drogi Mlecznej** (według mitologii greckiej powstała z kropli rozlanego mleka, którym Hera karmiła Heraklesa). Zawiera (według najnowszych szacunków) do czterystu miliardów gwiazd, czyli $4 \cdot 10^{11}$. Z Ziemi możemy zobaczyć jedynie 0,000001% z nich.

Droga Mleczna przypomina kształtem gigantyczny dysk o średnicy blisko $9,5 \cdot 10^{17}$ km.



Rys. 5.23. Układ Słoneczny leży w odległości około 28 tysięcy lat świetlnych od centrum Galaktyki.



Chcesz wiedzieć więcej?

Nasza galaktyka należy do galaktyk spiralnych. Gwiazdy oraz materia międzygwiazdowa nie są rozłożone równomiernie, układają się w wyraźne zagęszczenia nazywane ramionami spiralnymi. Kształt ramion wskazuje na ruch wirowy naszej Galaktyki. Wszystkie gwiazdy poruszają się po orbitach – w przybliżeniu kołowych – wokół jej środka. Słońce znajduje się daleko od centrum Galaktyki w jednym z ramion, zwanym Ramieniem Oriona, a prędkość jego ruchu dookoła centrum Galaktyki to około $220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Okres, w ciągu którego Słońce obiega środek Drogi Mlecznej (rok galaktyczny), trwa około 225–250 milionów lat.

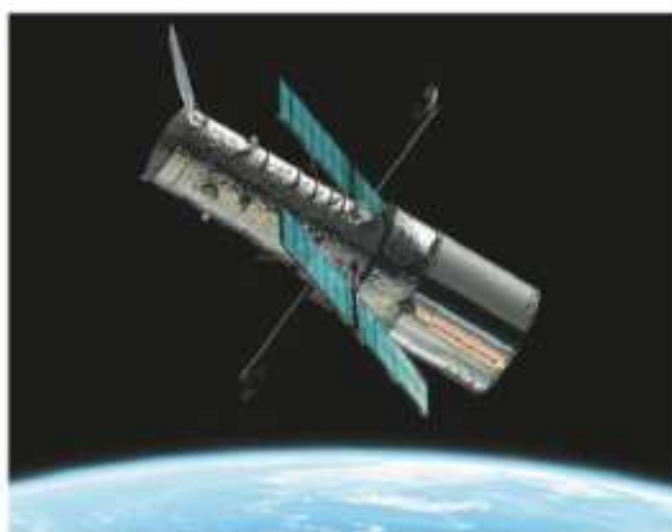
 Słońce leży blisko płaszczyzny Galaktyki, w związku z czym widzimy ją „od wewnątrz”. Gdy patrzymy w kierunku równoległym do płaszczyzny dysku, to kolejne, znajdujące się coraz dalej gwiazdy zlewają się w jasną poświatę widoczną na niebie – czyli Drogę Mleczną.

Odkryto wiele galaktyk podobnych do naszej. W sąsiedztwie Drogi Mlecznej znajdują się dwie niewielkie galaktyki: Wielki Obłok Magellana (w odległości około 170 tysięcy lat świetlnych) i Mały Obłok Magellana (w odległości około 200 tysięcy lat świetlnych).



Rys. 5.24. Drogę Mleczną można obserwować w miejscu oddalonym od światel miejskich, najlepiej późnym sierpniowym wieczorem, na południowej stronie nieba.

Amerykański uczony Edwin Hubble (czyt. habl) odkrył, że Wszechświat się rozszerza. Prowadził on obserwacje odległych galaktyk i stwierdził, że wszystkie one oddalają się od naszej Galaktyki. Proces ten zachodzi bez względu na to, w którym miejscu na niebie się znajdują. Najbardziej zdumiewające było stwierdzenie, że im dalej znajduje się obserwowana galaktyka, tym większa jest jej prędkość oddalania (nazywana też prędkością ucieczki).



Rys. 5.25. Edwin Powell Hubble (1889–1953) i teleskop kosmiczny nazwany jego nazwiskiem.

Jeżeli weźmiemy pod uwagę odkrycie Hubble'a, możemy dojść do wniosku, że Ziemia znajduje się w jakimś szczególnie wyróżnionym punkcie Wszechświata, którego centrum stanowi nasza Galaktyka, a wszystkie pozostałe oddalają się od niej. Sugestia ta jest jednak fałszywa. Możliwa jest sytuacja, w której każdy obiekt oddala się równocześnie od wszystkich swoich sąsiadów. Prostą analogią jest tu przykład nadmuchiwanego balonika, na którym będą równocześnie rosły odległości między wszystkimi zaznaczonymi na nim punktami.

Jeśli na powierzchni balonika zaznaczymy kilka punktów, a potem nadmuchamy go, zaobserwujemy, że odległości między tymi punktami będą się zwiększać. Żaden z punktów nie będzie wyróżniony, nie będzie można wskazać nieruchomego punktu, od którego oddalają się pozostałe. Im większa będzie odległość pomiędzy punktami na powierzchni balonika, tym większa będzie ich prędkość oddalania się od siebie.



Rys. 5.26. Przy nadmuchiwaniu balonika odległości między wszystkimi zaznaczonymi punktami rosną równocześnie.

Stwierdzenie, że żadne miejsce we Wszechświecie nie jest wyróżnione i że wygląda on tak samo z punktu widzenia każdego obserwatora, nosi nazwę **zasady kopernikańskiej**.

Nasza Galaktyka nie jest zatem we Wszechświecie wyjątkowym miejscem, od którego oddalają się pozostałe galaktyki. Każdy obserwator znajdujący się w dowolnej galaktyce stwierdzi, że wszystkie galaktyki oddalają się od niego. Jesliby ktoś mógłby się znaleźć w bardzo odległym miejscu Wszechświata, to stwierdziłby, że bliska galaktyka oddala się od niego wolniej, a odległa galaktyka ucieka z olbrzymią prędkością.

Gdyby powierzchnia opisanego balonika była idealnie rozciągliwa, mógłby się on powiększać bez końca. Teoretycznie przestrzeń kosmosu może się również rozszerzać w sposób nieograniczony.

Jeśli obecnie wszystkie galaktyki oddalają się od nas, można wnioskować, że dawniej Wszechświat musiał być mniejszy. Kiedy więc cofniemy się w czasie odpowiednio daleko, możemy wyobrazić sobie Wszechświat o rozmiarach bliskich zero. W odległej przeszłości cała materia Wszechświata była skupiona niemal w jednym punkcie. Czas, jaki upłynął od tej chwili, to **wiek Wszechświata**. Według obecnych badań wynosi on około 13,8 miliardów lat.

Za najbardziej prawdopodobny model ewolucji Wszechświata uważa się obecnie **model Wielkiego Wybuchu** (ang. *Big Bang*). Zakłada on, że rozszerzanie się Wszechświata jest wynikiem gigantycznej eksplozji.

Wielki Wybuch to nazwa nieco myląca. Rozszerzanie się Wszechświata nie ma nic wspólnego z wybuchem, np. bomby. Odlamki są wyrzucone siłą wywieraną przez materiał wybuchowy i poruszają się w nieruchomej przestrzeni. Natomiast ucieczka galaktyk związana jest z tym, że są one unoszone przez rozszerzającą się przestrzeń.

Współczesna fizyka potrafi opisać stan materii po upływie zaledwie 10^{-44} s od Wielkiego Wybuchu. W tym momencie materia znajdowała się w ekstremalnych warunkach: jej gęstość była 10^{39} razy większa od gęstości wody, a jej temperatura wynosiła 10^{33} K. Są to wartości niewyobrażalnie duże, niemożliwe do osiągnięcia w jakimkolwiek laboratorium. Gęstość Wszechświata bardzo szybko malała, obniżała się również temperatura. Po upływie około 300 000 lat od Wielkiego Wybuchu (co w porównaniu z wiekiem Wszechświata jest bardzo krótkim czasem) temperatura obniżyła się do około 3000 stopni i zaczęły powstawać atomy wodoru i helu.

Atomy łączyły się następnie w obłoki, z których uformowały się pierwsze gwiazdy i galaktyki.

Teorię mówiącą o tym, że Wszechświat narodził się jako niewyobrażalnie gorący obiekt, z którego najpierw powstały składniki atomów, a potem najlżejsze atomy, opracował amerykański fizyk jądrowy i kosmolog rosyjskiego pochodzenia – George Gamow. Obliczony według tej teorii skład procentowy lekkich pierwiastków w kosmosie idealnie pokrywa się z wynikami obserwacji i potwierdza tę teorię.

Pojawia się pytanie, co było przyczyną Wielkiego Wybuchu. Ani fizyka, ani astronomia nie udzielają na nie odpowiedzi. Szukają jej filozofowie przyrody, spośród których jedni odwołują się do teologii, a inni reprezentują pogląd o wiecznym trwaniu materii przechodzącej przez różne formy istnienia.

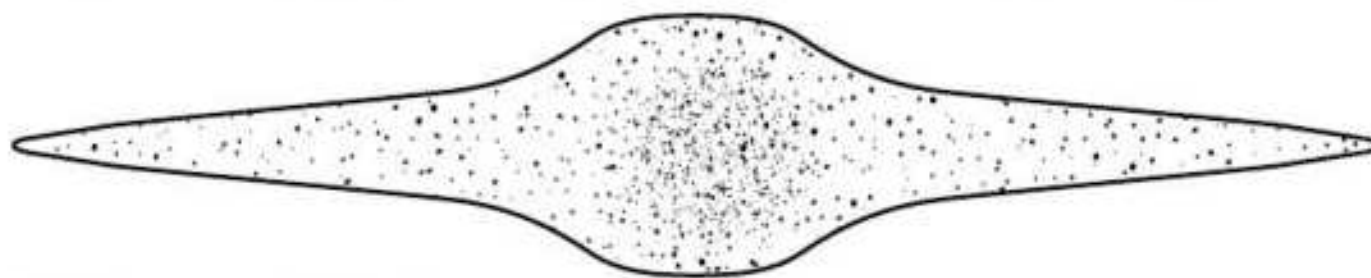
PYTANIA I ZADANIA

1. Przedstaw teorię Wielkiego Wybuchu. Omów ucieczkę galaktyk.
2. Czy obserwowane oddalanie się od nas galaktyk oznacza, że znajdujemy się w środku Wszechświata?
3. Słońce krąży dookoła centrum Galaktyki z prędkością około $220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Zakładając, że orbita ta jest kołowa i ma promień równy $265 \cdot 10^{15} \text{ km}$, oblicz okres, w ciągu którego Słońce obiega środek Drogi Mlecznej.
- 4*. Wskaż zdanie prawdziwe.
 - A. Wiek Wszechświata wynosi $14 \cdot 10^9$ lat świetlnych.
 - B. Im Wszechświat jest starszy, tym jest mniejszy.
 - C. Im Wszechświat jest starszy, tym jest większy.
 - D. W obecnej chwili Wszechświat zachowuje stałe rozmiary.
5. Droga Mleczna to:
 - A. jeden z gwiazdozbiorów widocznych na niebie,
 - B. galaktyka, w której znajduje Słońce,
 - C. największa galaktyka we Wszechświecie,
 - D. nazwa orbity, po której porusza się Słońce.
6. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

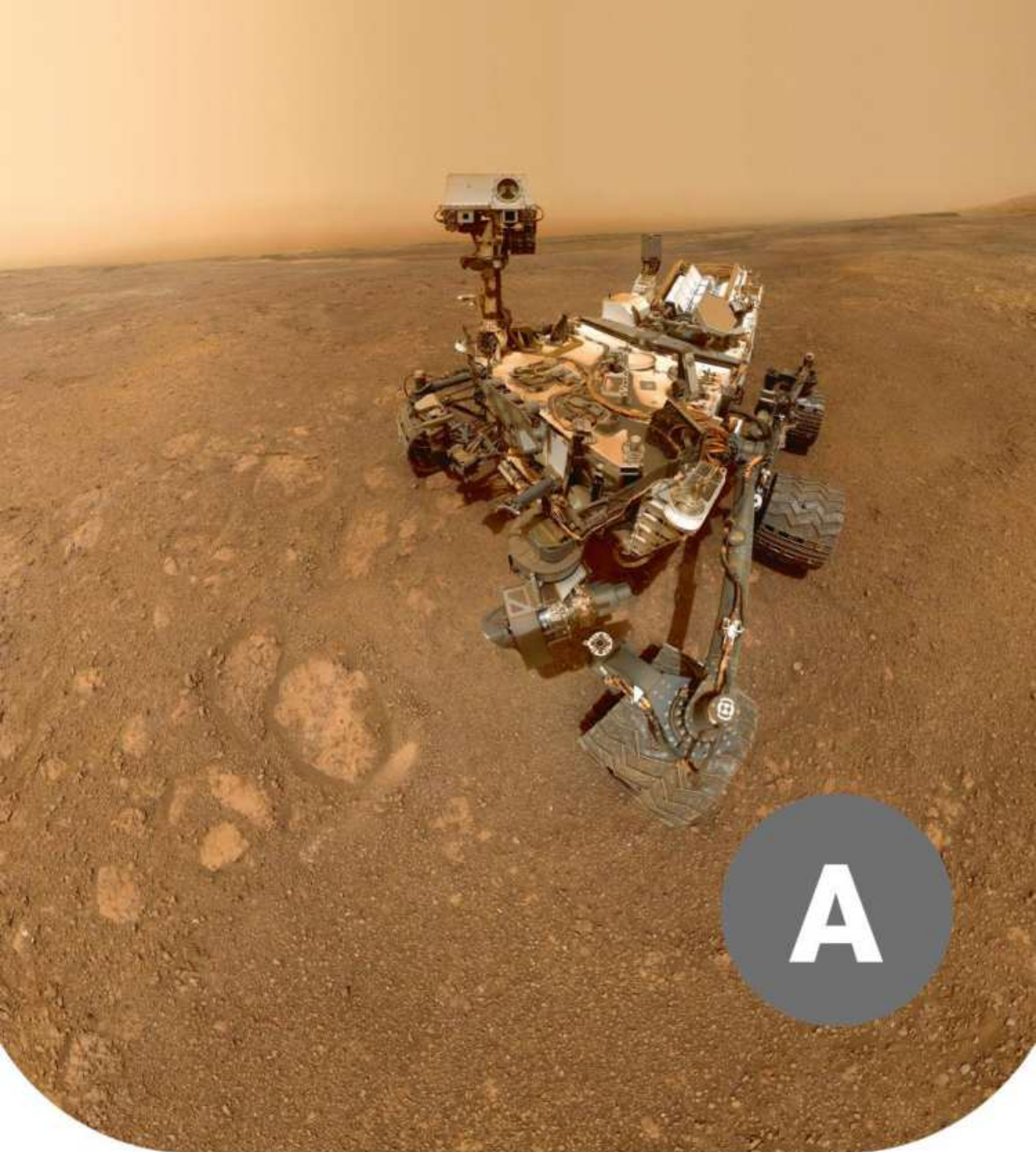
1.	Galaktyki, jako masywne obiekty, działają na siebie siłami przyciągania grawitacyjnego.	P	F
2.	Wszystkie galaktyki oddalają się od Ziemi z taką samą prędkością.	P	F
3.	Oddalanie się galaktyk jest jednym z faktów obserwacyjnych potwierdzających teorię Wielkiego Wybuchu.	P	F



7. Uczeń narysował kontur naszej Galaktyki i kropkami zaczął zaznaczać należące do niej gwiazdy. Oblicz, jak długo musiałby kropkować rysunek, aby liczba kropek była równa liczbie gwiazd. Przyjmujemy, że uczeń pracuje bez przerwy, stawiając sześć kropek na sekundę.



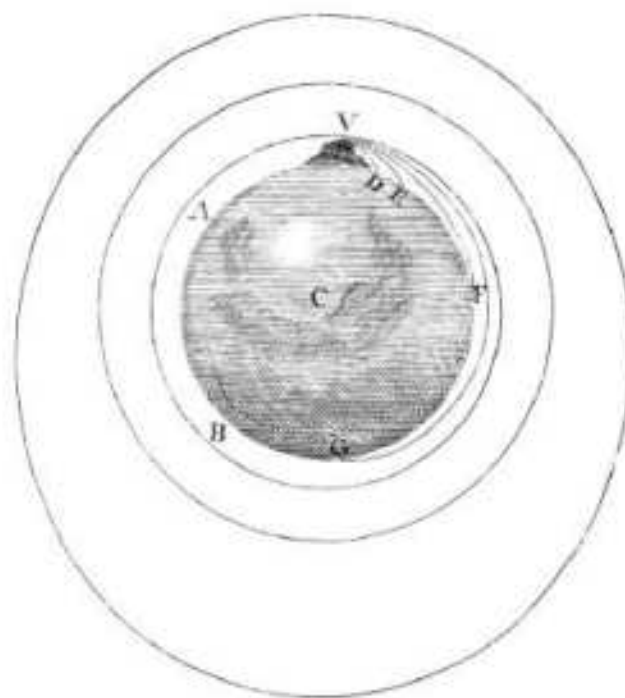
Rys. 5.27. Kontur naszej Galaktyki.



MODUŁ FAKULTATYWNY A

A.1. Eksploracja Kosmosu

Pierwszym człowiekiem, który rozważał możliwość lotów kosmicznych, był Izaak Newton. W swoim słynnym dziele *Matematyczne zasady filozofii naturalnej* przedstawił eksperyment myślowy z ruchem satelitów wokół Ziemi. Jego tok rozumowania przedstawia rysunek A.1.



Rys. A.1. Rysunek z *Matematycznych zasad filozofii naturalnej* Newtona z 1686 roku. Zwróć uwagę na zarys kontynentów – za czasów Newtona nie było jeszcze dokładnych map.

Wyobraźmy sobie, że stojące na wysokiej górze działo strzela w kierunku poziomym pociskami z coraz większymi prędkościami. Wiemy już, że przy odpowiednio dużej prędkości pocisk nie dotrze do Ziemi, lecz będzie ją obiegać po torze kołowym, stając się **sztucznym satelitą** Ziemi.

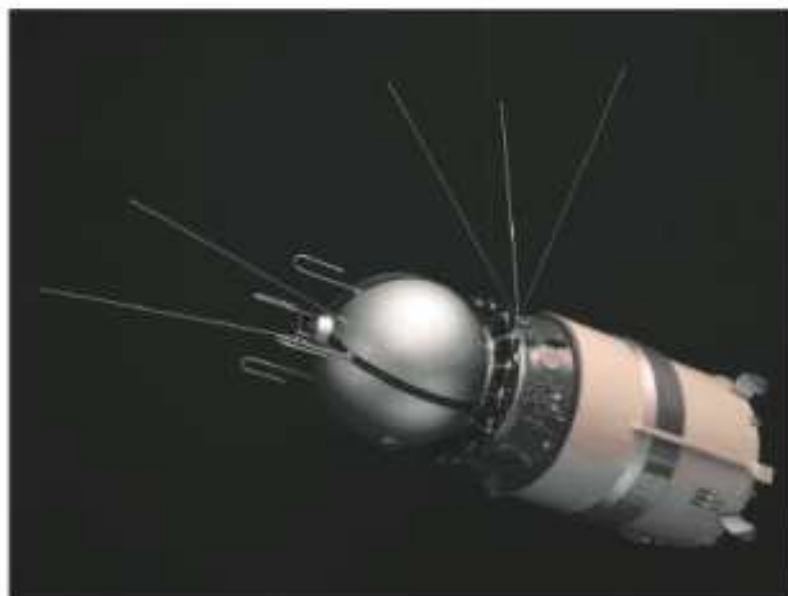


Rys. A.2. Replika Sputnika 1, pierwszego sztucznego satelity Ziemi.

a)

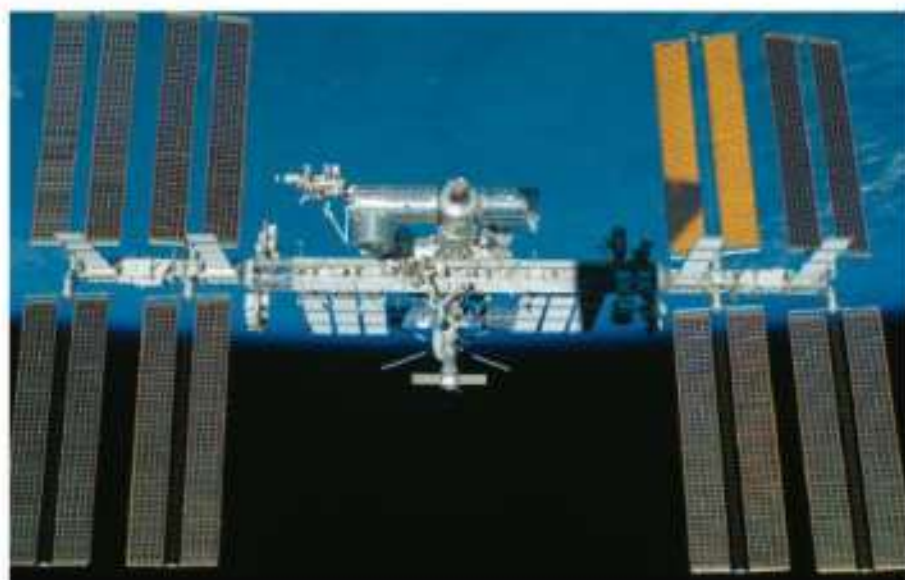


b)



Rys. A.3. a) Jurij Gagarin (1934–1968) – pierwszy człowiek w kosmosie, b) Model statku kosmicznego Wostok 1.

Jedynym sztucznym satelitą widocznym z Ziemi gołym okiem jest **Międzynarodowa Stacja Kosmiczna** (*International Space Station, ISS*), pierwsza stacja kosmiczna wybudowana przy współudziale wielu krajów. Umożliwia jednocześnie przebywanie sześciu członków stałej załogi. Pierwsze moduły stacji zostały wyniesione na orbitę i połączone ze sobą w 1998 roku.

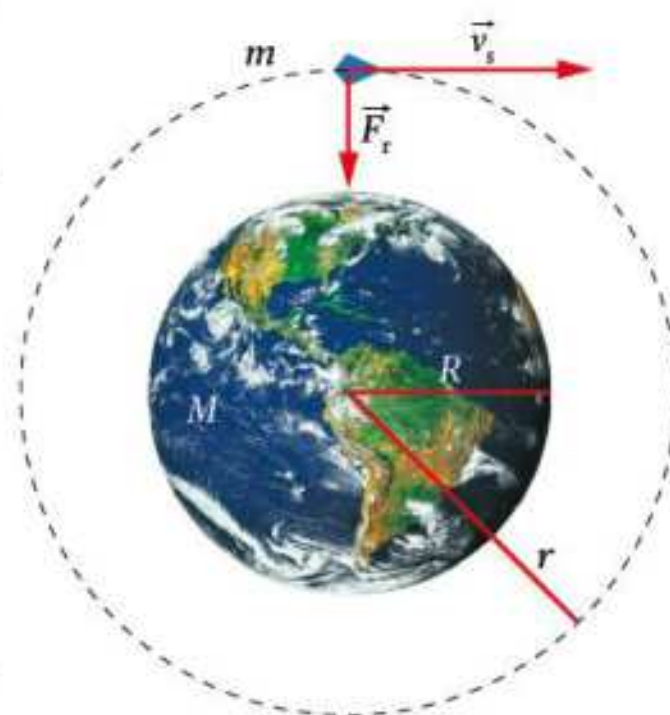


Rys. A.4. Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (ISS).

Satelita, obiegając Ziemię, wykonuje ruch po okręgu, musi więc działać na niego siła dośrodkowa $\vec{F}_r$. Rolę siły dośrodkowej odgrywa siła grawitacji $\vec{F}_g$, jaką Ziemia przyciąga satelitę. Porównując te siły, otrzymujemy wzór na prędkość satelity krążącego po orbicie o dowolnym promieniu:

$$\begin{aligned} F_r &= F_g, \\ \frac{mv_s^2}{r} &= G \frac{m \cdot M}{r^2}, \\ v_s &= \sqrt{\frac{GM}{r}}, \end{aligned}$$

gdzie M oznacza masę Ziemi, a r – promień orbity.



Rys. A.5. Wektor prędkości satelity $\vec{v}_s$ jest skierowany równoległe do powierzchni Ziemi.

Z otrzymanego wzoru wynika, że wartość prędkości satelity nie zależy od jego masy m , a tylko od promienia orbity r , po której się porusza. Im promień orbity jest mniejszy, tym prędkość satelity jest większa. Największą prędkość miałby więc satelita krążący przy samej powierzchni Ziemi – prędkość tę nazwano **pierwszą prędkością kosmiczną** i oznaczono v_1 .

Pierwsza prędkość kosmiczna v_1 jest to prędkość satelity krążącego po orbicie o promieniu równym promieniowi Ziemi.

Podstawiając do wzorów na prędkość dowolnego satelity za promień orbity r promień Ziemi R , otrzymujemy wzór na pierwszą prędkość kosmiczną v_1 .

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

Po prawej stronie wzorów występują tylko wielkości stałe: stała grawitacji $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$, masa Ziemi $M \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, promień Ziemi $R \approx 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$. Możemy więc obliczyć ściśle

określoną wartość pierwszej prędkości kosmicznej.

$$v_1 = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6,37 \cdot 10^6 \text{ m}}} \approx 7,9 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7,9 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Pojęcie pierwszej prędkości kosmicznej jest czysto teoretyczne, gdyż satelitów poruszających się z tą prędkością nie ma. Satelity nie mogą przecież poruszać się po orbicie o promieniu równym promieniowi Ziemi, bezpośrednio nad naszymi głowami. Przy samej powierzchni Ziemi satelita byłby silnie hamowany wskutek oporu powietrza. Jego prędkość zmniejszałaby się i po pewnym czasie spadłby z orbity na Ziemię. Rzeczywiste satelity mogą poruszać się na takiej wysokości $h_{\min}$ nad Ziemią, na której nie ma już powietrza. Przyjmuje się, że minimalna wysokość, na której mogą krążyć satelity, wynosi 160 km nad powierzchnią Ziemi. Minimalny promień orbity satelity wynosi więc:

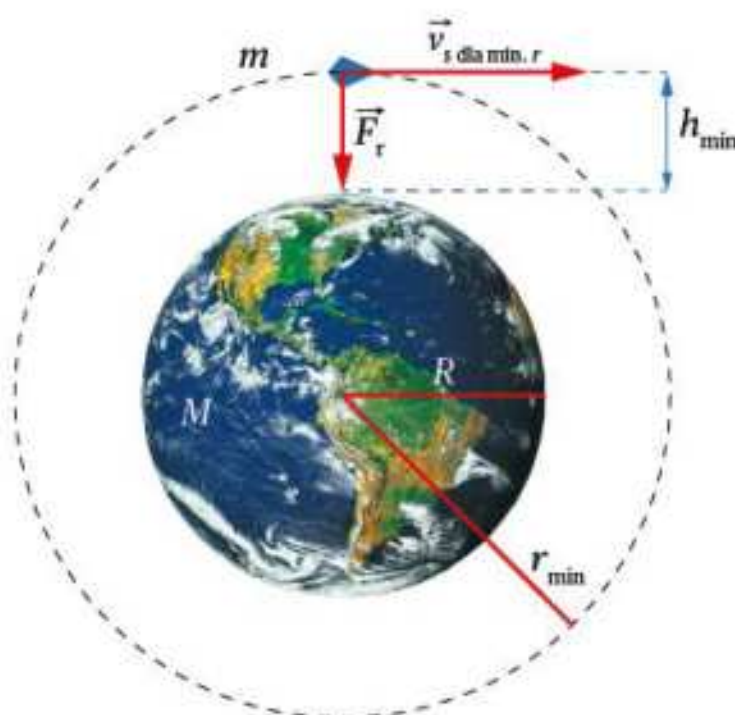
$$r_{\min} = R + h_{\min},$$

a prędkość satelity krążącego po orbicie o minimalnym promieniu:

$$v_{s \text{ dla min. } r} = \sqrt{\frac{GM}{R + h_{\min}}}, \quad v_{s \text{ dla min. } r} \approx 7,8 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Prędkość satelity na wysokości 160 km jest mniejsza tylko o 1,2% od pierwszej prędkości kosmicznej v_1 .

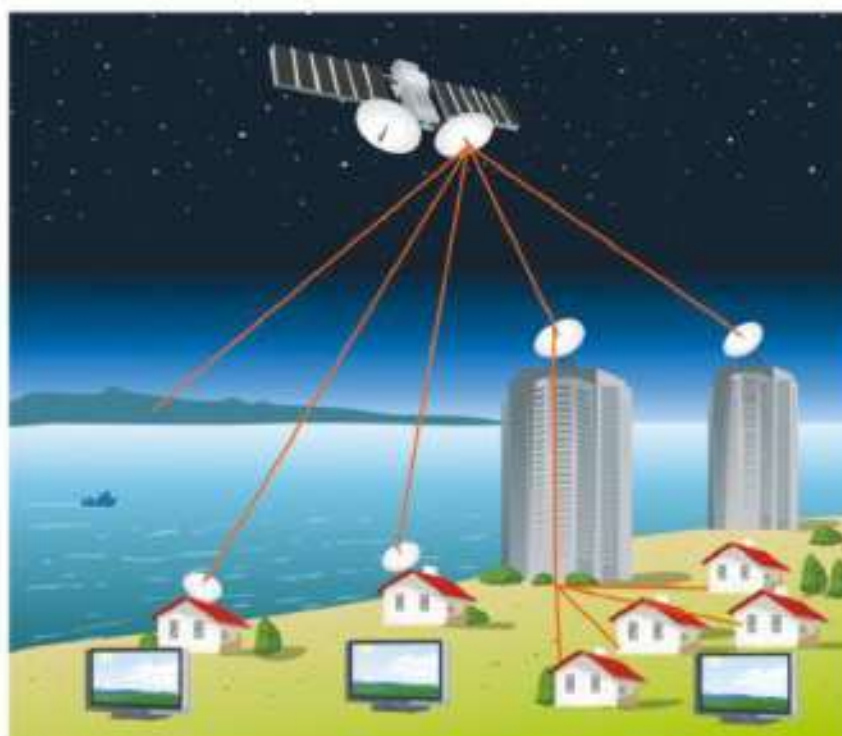
Rys. A.6. Satelity mogą krążyć wokół Ziemi na wysokości co najmniej 160 km nad powierzchnią Ziemi. Na rysunku nie zachowano skali odległości.



W praktyce satelity krążą po orbitach o znacznie większych promieniach niż $r_{\min}$, więc ich prędkości są mniejsze. Na uwagę zasługuje **satelita geostacjonarny** (lub **stacjonarny**), który znajduje się ciągle nad tym samym punktem na powierzchni Ziemi.

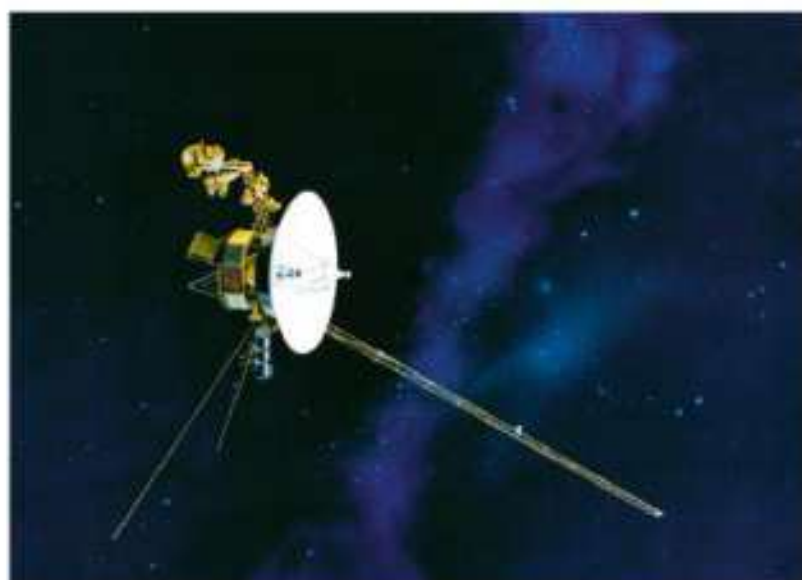
Satelita stacjonarny jest to satelita krążący po orbicie leżącej w płaszczyźnie równika, o tak dobranym promieniu, aby okres obiegu satelity był równy okresowi ruchu wirowego Ziemi $T = 24 \text{ h}$. Wówczas jest on nieruchomy względem Ziemi.

Rys. A.7. Stacjonarne satelity telewizyjne pozwalają na łączność telewizyjną między kontynentami.





Sonda kosmiczna to bezzalogowy statek kosmiczny, oddalający się od Ziemi, podążający w stronę innych planet, a nawet poza Układ Słoneczny. Jest on wyposażony w urządzenia badawcze zbierające informacje o ciałach niebieskich i przestrzeni kosmicznej, które drogą radiową są przesyłane na Ziemię.



Rys. A.10. Sonda kosmiczna Voyager 2 i przesyłka dla innych cywilizacji znajdująca się na jej pokładzie.

Aby ciało mogło się oddalić od Ziemi i podążać w stronę innych planet, najpierw umieszcza się je na orbicie kołowej, a następnie zwiększa się jego prędkość. Kołowy tor orbity zamienia się początkowo w elipsę, a później w parabolę i ciało oddala się od Ziemi.

Minimalna prędkość, jaką trzeba nadać ciału startującemu z orbity okołozemskiej, aby oddaliło się do nieskończoności, jest $\sqrt{2}$ razy większa od tej, z jaką poruszało się po orbicie.

$$v_0 = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Gdyby zamiast z orbity ciało startowało z powierzchni Ziemi, trzeba byłoby mu nadać znacznie większą prędkość – jest ona nazywana **drugą prędkością kosmiczną** (lub prędkością ucieczki).



Druga prędkość kosmiczna jest to minimalna prędkość, jaką trzeba nadać ciału startującemu z powierzchni Ziemi, aby mogło ono opuścić pole grawitacyjne Ziemi i dotrzeć do nieskończoności.

Wzór na drugą prędkość kosmiczną v_{II} otrzymamy, podstawiając do powyższego wzoru zamiast promienia orbity r promień Ziemi R :

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

Druga prędkość kosmiczna jest $\sqrt{2}$ razy większa od pierwszej prędkości kosmicznej. Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymamy wartość drugiej prędkości kosmicznej:

$$v_{II} = \sqrt{2}v_I = \sqrt{2} \cdot 7,9 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 11,2 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

W naszych rozważaniach nie uwzględnialiśmy siły grawitacji Słońca. Dlatego – po osiągnięciu drugiej prędkości kosmicznej – ciało może oddalić się od Ziemi, ale nie oddali się od Słońca. Nie może się więc wydostać poza Układ Słoneczny. Jeżeli nie zostanie wychwycone przez siłę grawitacji jakiejś planety, będzie obiegać Słońce, stając się sztuczną **planetoidą**.

A.2. Narzędzia obserwacyjne w astronomii

Nasze codzienne życie rozgrywa się wśród ciał o niewielkich rozmiarach, rzędu centymetrów, metrów czy kilometrów. Istnieje jednak inny, tajemniczy świat o rozmiarach miliardy razy większych – to makroświat, którym zajmuje się astronomia. Natężenie światła docierającego do obserwatora od odległych ciał niebieskich jest na ogół zbyt słabe, aby można było je obserwować gołym okiem. Dlatego do obserwacji planet, gwiazd czy galaktyk stosujemy **teleskopy**, których zadaniem jest skupienie możliwie dużej ilości światła dochodzącego do oka. Podstawowym elementem skupiającym światło w teleskopie jest soczewka skupiająca lub zwierciadło wklęsłe. Teleskopy, w których skupienie światła następuje dzięki soczewce, nazywamy **teleskopami soczewkowymi**, **lunetami** lub **refraktorami**. Teleskopy, w których skupienie światła następuje dzięki zwierciadłu, nazywamy **teleskopami zwierciadlanymi** lub **reflektorami**.

Pierwsze próby regularnych obserwacji ciał niebieskich podejmowano już w starożytności. Jedynym „przyrządem” obserwacyjnym było wtedy ludzkie oko. Dopiero w 1609 roku Galileusz do obserwacji nieba zaczął stosować zbudowaną przez siebie lunetę. Dzięki niej po raz pierwszy zaobserwował kraterzyki na Księżycu, księżycy Jowisza i plamy na Słońcu oraz stwierdził, że Droga Mleczna składa się z milionów gwiazd. Obserwując planetę Wenus, odkrył, że przechodzi ona przez fazy, podobnie jak Księżyc, od nowiu do pełni. Odkrycie to dowiodło, że Wenus nie krąży wokół Ziemi, ale wokół Słońca – zgodnie z układem heliocentrycznym Mikołaja Kopernika.

Istnieje wiele konstrukcji lunet. Omówimy powstawanie obrazu w jednej z nich, nazywanej lunetą Keplera.

Promienie biegnące od przedmiotu, którego odległość od obiektywu jest dużo większa od podwojonej ogniskowej ($x \gg 2f_{ob}$), przechodzą przez soczewkę, tworząc między okulem a obiektywem obraz AB rzeczywisty, pomniejszony i odwrócony. Odległość tego obrazu od soczewki obiektywu jest w przybliżeniu równa ogniskowej obiektywu f_{ob} . Dzieje się tak, gdyż przedmiot znajduje się w bardzo dużej odległości od obiektywu, a wówczas padają na niego promienie prawie równoległe. Obraz AB stanowi przedmiot dla soczewki okularu, który działa jak lupa, dając obraz $A'B'$ powiększony

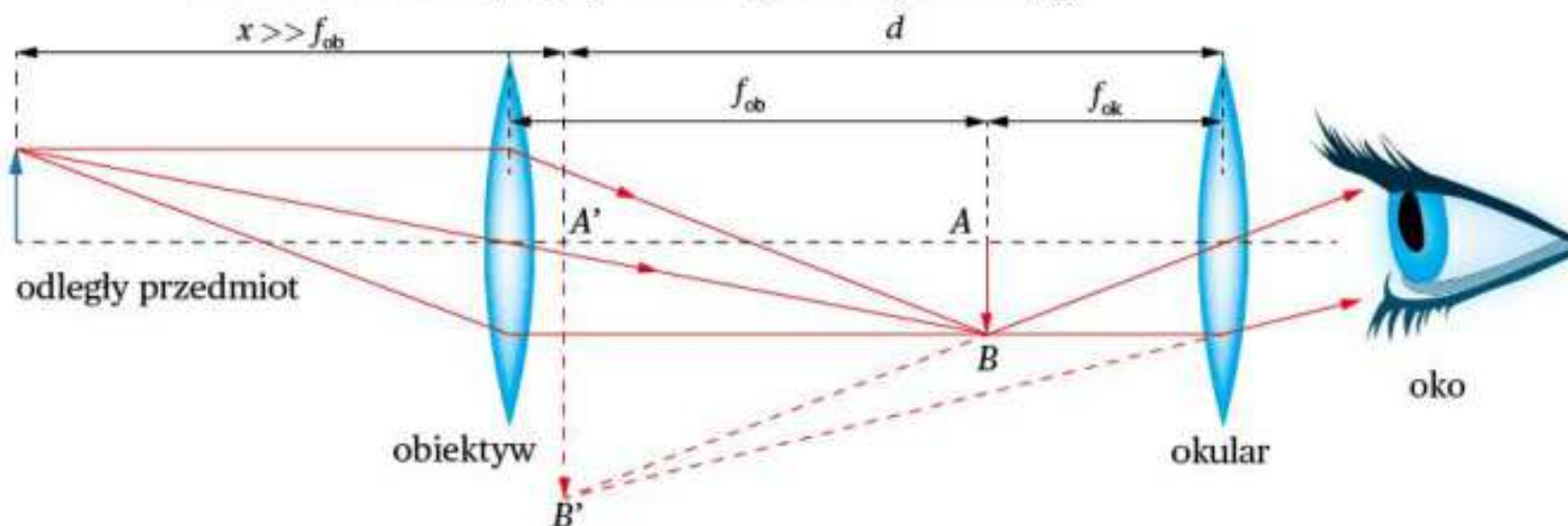


Rys. A.11. Luneta Galileusza.



Rys. A.12. Teleskop soczewkowy, inaczej luneta lub refraktor.

i pozorny. Obserwator widzi przez okular obraz AB' w odległości dobrego widzenia d (jest to odległość pomiędzy okiem i przedmiotem, przy której oko nie ulega zmęczeniu mimo długotrwałej obserwacji). Aby w okularze uzyskać duże powiększenie, należy ustawić go w odległości od obrazu AB równej w przybliżeniu ogniskowej okularu f_{ok} .

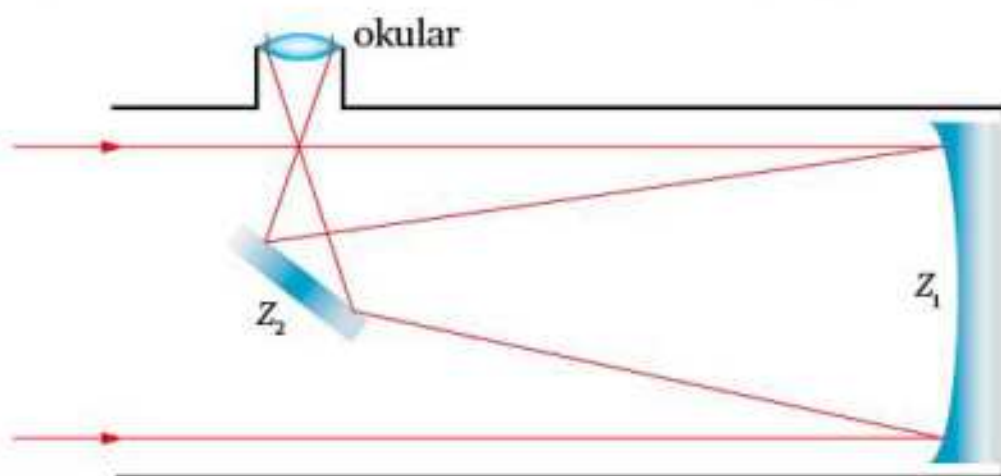


Rys. A.13. Konstrukcja obrazu wytwarzanego przez lunetę. Rysunek nie zachowuje skali odległości, w rzeczywistości obserwowany przedmiot jest bardzo daleko od obiektywu lunety.



Rys. A.14. Teleskop zwierciadlany, nazywany reflektorem.

Luneta, oprócz powiększenia obrazu, pełni jeszcze jedną funkcję – zbiera energię świetlną pochodzącą od oglądanego przedmiotu z większej powierzchni – z powierzchni obiektywu. Efekt jest taki, jak gdyby źrenica naszego oka zwiększyła się do wielkości obiektywu lunety. Chcąc obserwować słabo świecące obiekty, w budowanych teleskopach soczewkowych stosowano obiektywy o coraz większej średnicy, aby można było z ich powierzchni zbierać coraz więcej światła. Największy refraktor zbudowany pod koniec XIX wieku ma obiektyw o średnicy 102 cm. Znajduje się on w Obserwatorium Yerkesa w USA. Z czasem produkcja obiektywów o coraz większych średnicach zaczęła napotykać trudności techniczne. W efekcie wykorzystanie teleskopów soczewkowych zaczęło powoli maleć. Obecnie wszystkie największe teleskopy optyczne świata są teleskopami zwierciadlanymi. W tego typu urządzeniach nie ma problemu z pochłanianiem światła, zwierciadło ma znacznie mniejszy ciężar niż podobnej średnicy obiektyw soczewkowy i może być podparte w wielu miejscach. Ponadto wymaga ono szlifowania tylko jednej powierzchni.



Teleskop zwierciadlany jest również zbudowany z obiektywu i okularu ale – w odróżnieniu od lunety – jego obiektywem jest zwierciadło wklęsłe. Pierwszy teleskop tego typu został skonstruowany przez Newtona w 1668 roku. Bieg promieni świetlnych w teleskopie Newtona przedstawiono na rysunku A.15.

Rys. A.15. Bieg promieni świetlnych w teleskopie.

Wpadająca równoległa wiązka promieni świetlnych odbija się od głównego zwierciadła wklęsłego Z_1 i skupia się w ognisku. Na drodze promieni, przed ogniskiem, ustawione jest pod kątem niewielkie zwierciadło płaskie Z_2 . Po odbiciu wiązka światła wydostaje się na zewnątrz, gdzie jest okular.

Największym teleskopem świata jest uruchomiony w 2008 roku na Wyspach Kanaryjskich Gran Telescopio Canarias, którego średnica zwierciadła wynosi 10,4 m.

Z kosmosu do powierzchni Ziemi oprócz promieniowania widzialnego dociera również promieniowanie radiowe. Do odbioru tego promieniowania służą **radioteleskopy**.

Główną częścią radioteleskopu jest metalowa antena pełniąca taką samą funkcję, jak zwierciadło w teleskopach optycznych. Dochodzące promieniowanie radiowe odbija się od wklęsłej czaszy anteny i skupia w jej ognisku, gdzie jest umieszczony detektor odbierający promieniowanie o określonej długości fali.

Rys. A.16. Największy polski radioteleskop zbudowany pod Toruniem ma antenę o średnicy 32 m.



Największy na świecie radioteleskop zbudowano w Chinach. Wielka czasza radioteleskopu umiejscowiona jest w naturalnym zagłębieniu terenu w prowincji Kuejczou w południowej części kraju. Nazwano go FAST – to skrót od *Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope*, czyli „teleskop sferyczny o średnicy 500 metrów”. Nieoficjalna nazwa to Tianyan, co znaczy „niebiańskie oko”. Radioteleskop składa się z 4450 trójkątnych paneli wykonanych z aluminium. Czasza zajmuje powierzchnię mniej więcej 30 boisk piłkarskich. FAST potrzebuje kompletnej ciszy radiowej w promieniu pięciu kilometrów. Dlatego turyści, którzy chcą zobaczyć radioteleskop, nie mogą korzystać z telefonów komórkowych, kamer ani cyfrowych aparatów fotograficznych. Sygnały z kosmosu FAST zaczął odbierać w 2016 roku, ale kolejne trzy lata były poświęcone na regulację i wstępne badania. Później rozpoczęły się prawdziwe obserwacje astronomiczne i poszukiwania życia pozaziemskiego.



Rys. A.17. Model radioteleskopu FAST.



Rys. A.18. Rozmiary radioteleskopu Arecibo sprawiają, że jest on łatwo rozpoznawalny. Akcja filmu *Golden Eye* z Jamesem Bondem dzieje się we wnętrzu jego anteny.

Do 2016 roku największą na świecie antenę – o średnicy 305 metrów – miał radioteleskop zbudowany w Arecibo w Puerto Rico. Jest to nieruchoma antena umieszczona w zagłębieniu terenu. Przy pomocy tego radioteleskopu dokonano wielu istotnych odkryć naukowych. Między innymi w 1990 roku polski astronom **Aleksander Wolszczan** odkrył pierwszy pozasłoneczny układ planetarny. Obecnie radioteleskop Arecibo jest głównym źródłem danych dla projektu poszukiwania cywilizacji pozaziemskich.

Obserwacje astronomiczne z powierzchni Ziemi w znacznym stopniu utrudnia lub wręcz uniemożliwia atmosfera ziemska. Niektóre rodzaje promieniowania docierającego z kosmosu mogą być odbierane wyłącznie z pokładów sztucznych satelitów oraz sond kosmicznych, gdyż są pochłaniane w atmosferze. Poza tym obserwacje z Ziemi mogą być prowadzone tylko w określonej porze doby.

Z powodu tych ograniczeń marzeniem wielu pokoleń astronomów było umieszczenie teleskopu poza atmosferą Ziemi. Pierwszym wystrzelonym z Ziemi **teleskopem kosmicznym** jest teleskop Hubble'a umieszczony na orbicie przez prom kosmiczny Discovery w 1990 roku. Miał on pracować przez 15 lat, ale jego misję sukcesywnie przedłużano. Po serwisowaniu w 2009



Rys. A.19. Kosmiczny Teleskop Hubble'a, nazwany na cześć amerykańskiego astronoma Edwina Hubble'a, który odkrył zjawisko rozszerzania się Wszechświata.

roku miał zakończyć pracę po 2018 roku, gdy został wystrzelony Kosmiczny Teleskop Jamesa Webba. Jednak NASA ogłosiła, że teleskop Hubble'a będzie pracować co najmniej do 30 czerwca 2021 roku.

Główne zwierciadło teleskopu Hubble'a ma średnicę 2,4 m. Obiega on Ziemię na wysokości około 600 km. Prowadzi obserwacje zarówno w zakresie optycznym, jak też w zakresach bliskiej podczerwieni i części promieniowania ultrafioletowego.

W czasie 30 lat przekazał na Ziemię setki tysięcy znakomitych obrazów ciał Układu Słonecznego oraz gwiazd i galaktyk, przyczyniając się do wielu ważnych odkryć w astronomii.

Oprócz teleskopu Hubble'a na orbitach wokół Ziemi umieszczano inne teleskopy. Na przykład w latach 1991–2000 obserwacje w zakresie promieniowania gamma prowadził teleskop Comptona. Do poszukiwania planet pozasłonecznych od 2009 roku używany jest kosmiczny teleskop Keplera.

Do pozaatmosferycznych obserwacji astronomicznych wykorzystuje się również przyrządy umieszczone na satelitach. Prowadzą one obserwacje zarówno w zakresie optycznym, jak też w tych zakresach promieniowania elektromagnetycznego, które nie docierają do powierzchni Ziemi. Na przykład głównym celem obserwacji prowadzonych w latach 1989–1993 przez satelitę Hipparcos były niezwykle precyzyjne pomiary położenia milionów gwiazd. Dzięki temu, że obserwacje były prowadzone poza atmosferą, ich dokładność była nawet 100 razy większa niż pomiarów prowadzonych z powierzchni naszej planety. Uruchomiony w 1989 roku satelita COBE prowadził badania w zakresie dalekiej podczerwieni. W wyniku analizy zebranych przez niego danych zbadano szczegółowo promieniowanie reliktowe (mikrofalowe promieniowanie tła) dochodzące do nas z całego obszaru nieba. Odkrycie tego promieniowania jest jednym z podstawowych faktów obserwacyjnych dla teorii kosmologicznych.

W wyniku obserwacji astronomicznych prowadzonych z wykorzystaniem teleskopów i satelitów odkryto istnienie w kosmosie obiektów o ogromnych rozmiarach znajdujących się w niewyobrażalnie dużych odległościach od Ziemi.

A.3. Elementy kosmologii

Kosmologia jest nauką, która zajmuje się budową i ewolucją Wszechświata, bada zarówno jego przeszłość, jak i opracowuje naukowe prognozy dotyczące przyszłych wydarzeń. U podstaw kosmologii tkwi fundamentalne przekonanie, poparte wielką liczbą eksperymentów i obserwacji, że w całym Kosmosie obowiązują jednakowe prawa fizyki. Dzięki temu wnioski uzyskane na podstawie badań ograniczonych obszarów można uogólniać na cały Wszechświat.

Kosmologia bierze pod uwagę przede wszystkim wyniki obserwacji astronomicznych, ale korzysta również z osiągnięć fizyki cząstek elementarnych, z teorii względności, a nawet respektuje poglądy filozofów.

Do współczesnych technik obserwacyjnych astronomii należą:

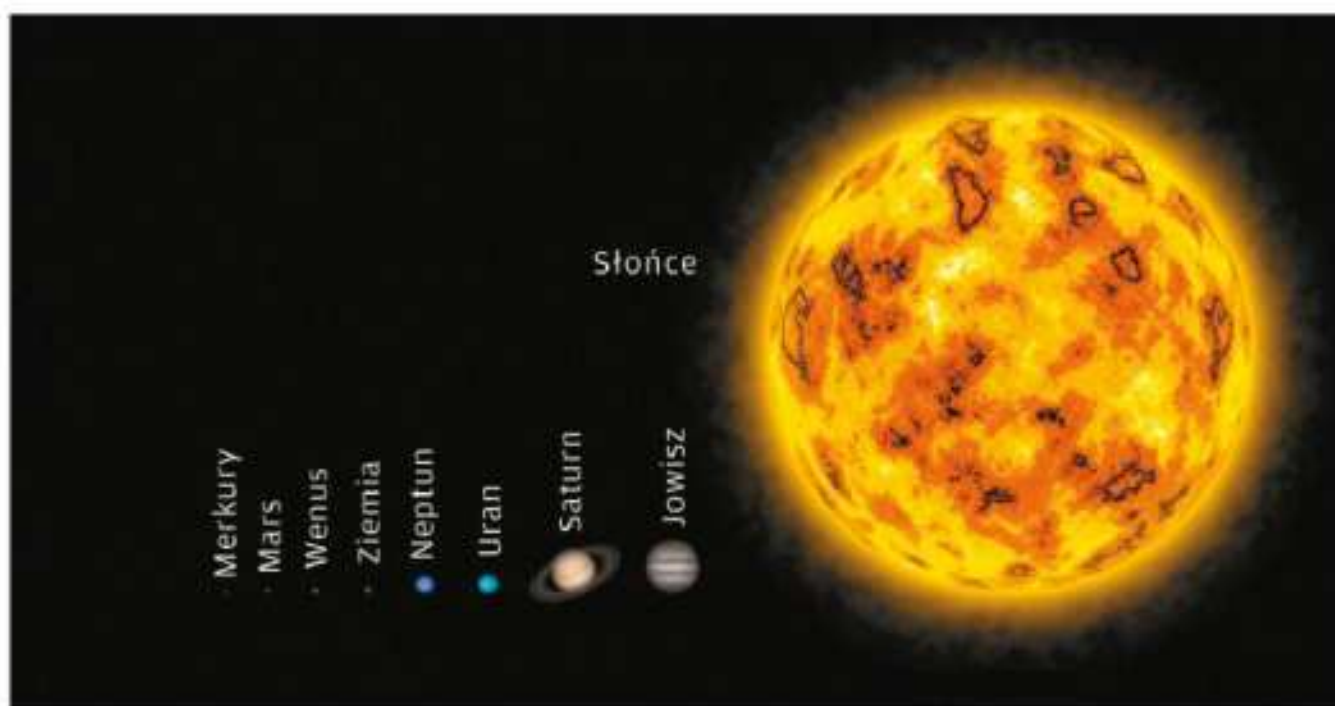
- obserwacje za pomocą teleskopów i radioteleskopów,
- obserwacje i badania za pomocą teleskopów kosmicznych i satelitów badawczych,
- badania za pomocą sond kosmicznych,
- bezpośrednie badania obiektów kosmicznych przez człowieka (po wylądowaniu na Księżycu i podczas planowanej wyprawy na Marsa).

Najważniejszymi obiektami badań astronomii są gwiazdy. Widzimy je jako małe jasne punkty na niebie, gdyż są od nas bardzo odległe. Najbliższą Ziemi gwiazdą jest Słońce. Możemy ją badać i przez to poznać budowę i procesy zachodzące w miliardach innych podobnych gwiazd.

Słońce jest obracającą się kulą gazu – ale nie obraca się tak, jak ciało sztywne. Na równiku obrót jest najszybszy – jeden trwa około 25 dni. W miarę oddalania się od równika obraca się coraz

wolniej. W okolicach biegunowych pełny obrót trwa około 35 dni. Średnica Słońca jest 109 razy większa od średnicy Ziemi. Jego objętość jest zatem ponad milion razy większa od objętości Ziemi. Nasza planeta w porównaniu z tarczą słoneczną wygląda jak mała kropka.

Chociaż Słońce jest zbudowane z lekkich gazów, to jego masa jest olbrzymia – ponad 333 000 razy większa niż masa Ziemi. Wodór stanowi około 74% tej masy, hel – 25%, a resztę – cięższe pierwiastki (niecały 1%).



Rys. A.20. Porównanie rozmiarów Słońca i planet Układu Słonecznego.

Skład chemiczny Słońca poznano, obserwując **widmo** wysyłanego przez nie światła.

Widmo jest to otrzymany na ekranie obraz światła rozłożonego na poszczególne długości fal, jaki powstaje w wyniku rozszczepienia światła (np. w pryzmacie).



Rys. A.21. Rozszczepienie światła białego w pryzmacie.

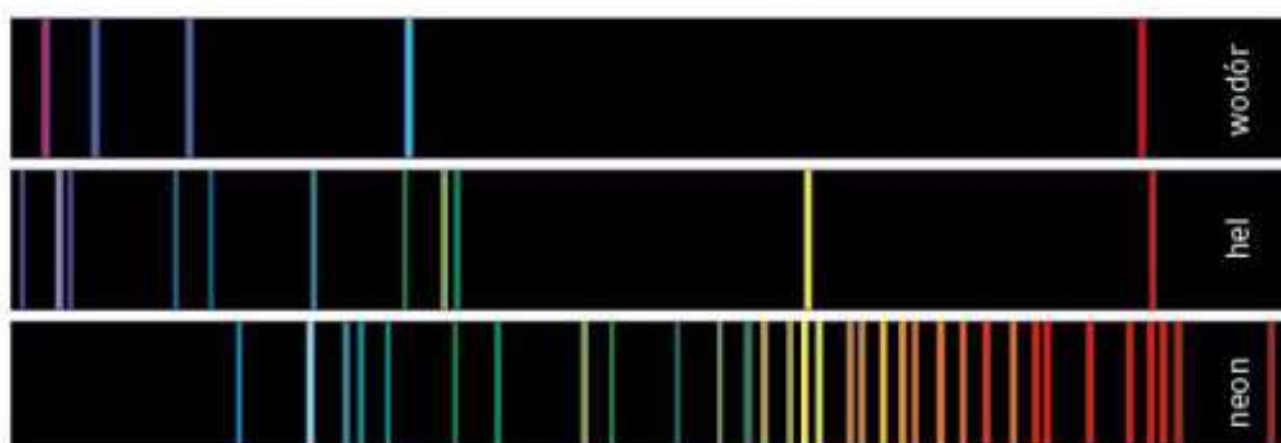
Światło białe (wysyłane np. przez zwykłą żarówkę z wolframowym włóknem w środku), przechodząc przez pryzmat, ulega rozszczepieniu. Z pojedynczego promienia światła białego powstaje rozbieżna wiązka kolorowych promieni. Na ekranie umieszczonym za pryzmatem otrzymujemy „tęczę” złożoną z wielu barw przechodzących w sposób ciągły jedna w drugą. Od czerwonej, poprzez pomarańczową, żółtą, zieloną, niebieską, aż do fioletowej. Obraz ten jest nazywany **widmem ciągłym** światła białego.

Doświadczenie takie po raz pierwszy wykonał Izaak Newton w 1666 roku. To, że obraz na ekranie ma kolory tęczy, nie jest przypadkiem, gdyż tęcza powstaje na niebie wskutek rozszczepienia światła słonecznego na kropelkach wody, które po deszczu znajdują się w powietrzu.



Rys. A.22. Widmo ciągłe, w postaci kolorowej wstęgi o barwach tęczy, powstaje po rozszczepieniu światła białego wysyłanego przez ciała stałe i ciecze o bardzo wysokich temperaturach.

Gdy przed pryzmatem zostanie umieszczona szklana rurka z parą lub gazem jednoatomowym pobudzonym do świecenia, wówczas zaobserwujemy widmo, w którym na czarnym tle pojawią się kolorowe pojedyncze prążki nazywane **liniami widmowymi**. Każdy prążek o określonej barwie odpowiada innej długości fali. Takie widmo nazywamy **widmem liniowym**.



Rys. A.23. Widma liniowe w postaci kolorowych prążków na czarnym tle powstają po rozszczepieniu światła wysyłanego przez pary i gazy jednoatomowe pobudzone do świecenia.

Obserwacje widm wykazały, że każdy pierwiastek pobudzony do świecenia daje w widmie inny układ prążków. Układy te różnią się liczbą prążków i długościami fali. Nie ma dwóch pierwiastków, których widma byłyby identyczne. Dzięki temu na podstawie precyzyjnych pomiarów długości fal linii widmowych dla danej substancji można wyznaczyć jej skład, identyfikując wszystkie pierwiastki. Metoda określania składu substancji na podstawie obserwacji jej widma nazywa się **analizą widmową**.

Mierząc długości fal odpowiadających prążkom w widmie światła słonecznego, odkryto, że Słońce składa się głównie z wodoru.

Chcesz wiedzieć więcej?

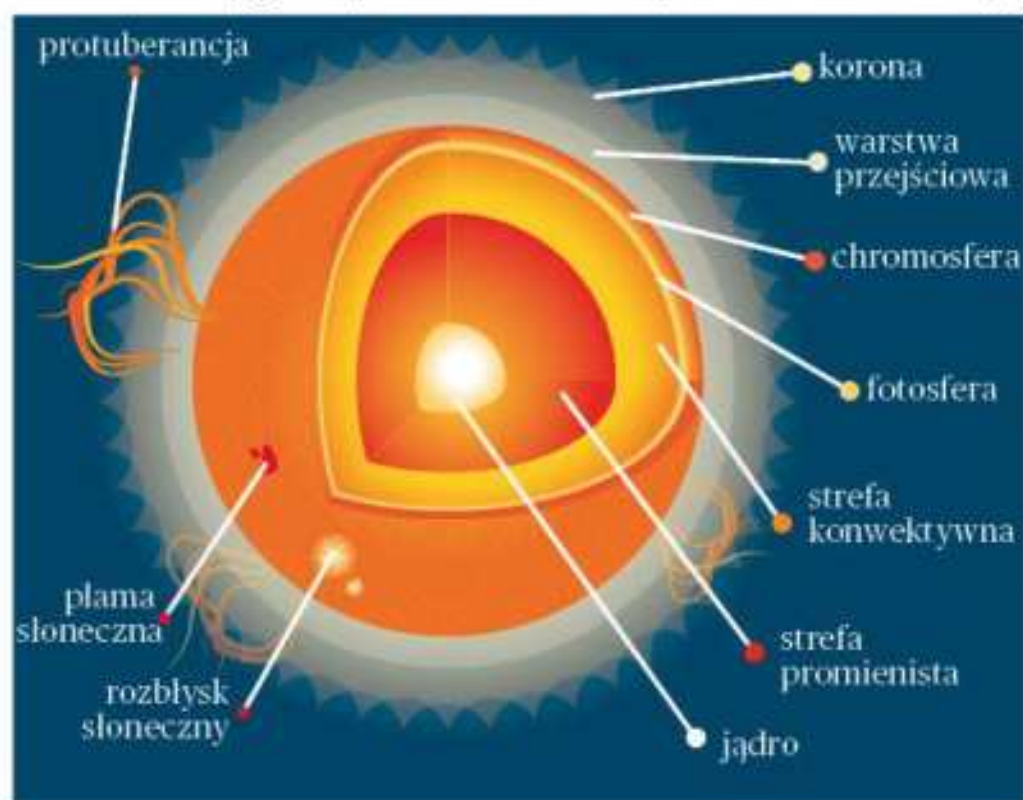
W 1868 roku w widmie światła słonecznego oprócz linii odpowiadających głównie wodorowi zaobserwowano prążek odpowiadający długości fali 587,6 nm (nm to nanometr, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), którego nie można było przypisać do żadnego spośród znanych wówczas pierwiastków. Wywnioskowano, że prążek ten pochodzi od nieznanego pierwiastka, i nazwano go helem – od imienia greckiego boga Słońca Heliosa. Dopiero w 1895 roku hel otrzymano na Ziemi w warunkach laboratoryjnych. A zatem hel odkryto najpierw na Słońcu, później na Ziemi.



Dochodzące do nas światło słoneczne pochodzi z **fotosfery** – warstwy powierzchniowej o grubości około 500 km. Poniżej znajduje się wnętrze Słońca, a powyżej zewnętrzne warstwy atmosfery. Praktycznie cała docierająca do Ziemi energia w postaci światła i ciepła pochodzi z fotosfery, ale jest wytwarzana we wnętrzu Słońca. Temperatura fotosfery wynosi około 6000°C. Powierzchnia Słońca jest ziarnista. Tworzą ją tak zwane **granule** rozdzielone ciemniejszymi granicami. Granule zachowują się podobnie do gotującej się kaszy – wznoszą się i opadają, przenosząc ciepło z niższych warstw Słońca do fotosfery.

Już kilka wieków przed naszą erą na tarczy Słońca zaobserwowano obszary ciemniejsze w porównaniu z jasną fotosferą – są to tzw. **plamy słoneczne**. Średnia temperatura w plamie wynosi 4500°C. Plamy wydają się ciemne, bo widać je na tle gorętszej fotosfery. Liczba plam słonecznych się zmienia. Gdy jest ich bardzo wiele (średnio co 11 lat), mówi się o wzmożonej aktywności słonecznej. Na przełomie lat 2017 i 2018 Słońce znajdowało się w fazie minimum cyklu.

W jądrze Słońca temperatura jest 25 000 razy większa niż na powierzchni – przyjmuje się, że w centrum dochodzi do 15 mln stopni Celsjusza. W tak wysokiej temperaturze atomy wodoru i helu są zjonizowane – elektrony są oderwane od jąder atomowych. Powstaje **plazma**, której głównymi składnikami są swobodne elektrony, protony i jądra atomów helu (zbudowane



Rys. A.24. Przekrój przez Słońce. Helowe jądro ma średnicę około 1/4 słonecznego promienia. Energia wytworzona w jądrze wypływa przez grubą warstwę wodoru i ogrzewa całą materię, w tym widoczną fotosferę.

z dwóch protonów i dwóch neutronów). Cząstki te poruszają się z bardzo dużymi prędkościami i często się zderzają. Gdy dwa protony zderzą się dostatecznie mocno, mogą się zlepić i zmienić w **jądro deuteru** składającego się z protonu i neutronu. Produktem tej reakcji są dwie inne cząstki: **neutrino** – obojętna bardzo przenikliwa cząstka, która unosi energię, oraz **pozyton** – cząstka podobna do elektronu, ale o dodatnim ładunku elektrycznym. Jądro deuteru może się następnie połączyć z kolejnym protonem i utworzyć jądro lekkiego helu, które ma tylko jeden neutron zamiast – jak zazwyczaj – dwóch. Wysyłany jest przy tym **foton** – cząstka światła unosząca energię.

Następnie dwa jądra lekkiego helu mogą się połączyć w jedno stabilne jądro helu (^4He), a dwa uwolnione protony uciekają. Omówione procesy to **reakcje syntezy termojądrowej**.

W jednym cyklu reakcji z czterech protonów powstaje jedno jądro helu, dwa pozytony, dwa neutrino i dwa fotony. Masa czterech protonów jest nieco większa – o około 0,6% – od łącznej masy produktów końcowych. Różnica tych mas przemienia się w energię emitowaną przez Słońce. Część tej energii dociera do Ziemi w postaci światła i ciepła, co podtrzymuje życie na naszej planecie. Takie same albo podobne reakcje jądrowe zachodzą w innych gwiazdach.

Chcesz wiedzieć więcej?



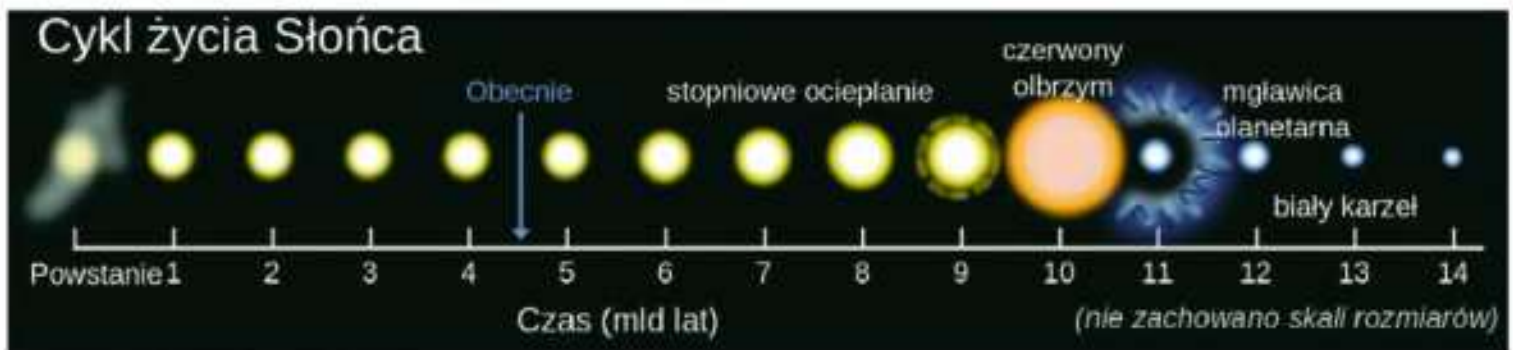
W reakcjach syntezy wydzielają się ogromne ilości energii. Z jednego kilograma wodoru powstaje tyle samo energii, co ze spalenia 27 800 ton węgla. Do jego przewiezienia potrzeba kilkadziesiąt pociągów. W warunkach ziemskich reakcje syntezy termojądrowej zostały wykorzystane w **bombach wodorowych**. Energia wyzwolana podczas wybuchu takiej bomby przewyższa tysiące razy energię wyzwalaną w czasie wybuchu **bomby atomowej** i odpowiada setkom milionów ton trotylu. W trakcie wybuchu bomby atomowej zachodzi reakcja rozszczepienia jąder ciężkich na jądra lekkie – nie należy jej mylić z reakcją syntezy.

Wykorzystanie ogromnych ilości energii, jaka powstaje w reakcjach syntezy, do celów pokojowych, okazało się bardzo trudne. Od wielu lat trwają prace nad zbudowaniem urządzenia, w którym reakcja syntezy zachodziłaby w sposób kontrolowany. Udaje się ją wywołać na niewielką skalę w urządzeniach badawczych. Niestety, do dziś wymagają one dostarczenia większej ilości energii, niż można jej uzyskać. Kontrolowany przebieg reakcji termojądrowych ma ogromne znaczenie w pokojowym wykorzystaniu energii jądrowej. Otrzymana energia byłaby ekologiczna, jej wytwarzanie nie wiązałoby się z powstawaniem dwutlenku węgla, popiołu ani szkodliwych odpadów promieniotwórczych. Paliwem do reakcji termojądrowych jest deuter, którego olbrzymie zapasy znajdują się w wodach jezior i oceanów.

Szacuje się, że w jednym litrze zwykłej wody znajduje się tyle deuteru, że energia uzyskana z reakcji łączenia jąder odpowiadałaby 350 litrom benzyny.

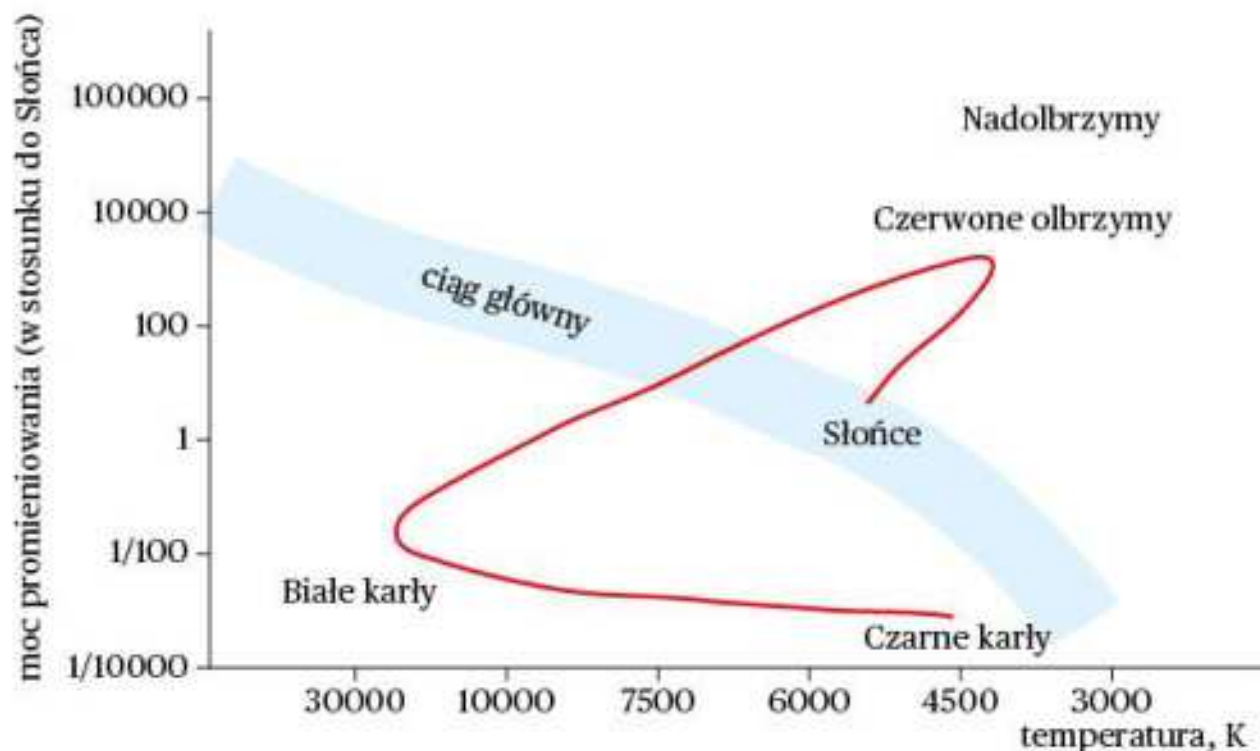
W wyniku reakcji syntezy Słońce stopniowo przekształca wodór w hel. Obecnie ilość wodoru jest o około 40% mniejsza niż na początku jego istnienia, przed około 4,5 miliarda lat. Nieustannie zachodzi proces zaniku wodoru, co powoduje, że Słońce straci swoje główne źródło energii i przestanie istnieć w obecnej postaci. Ma jednak przed sobą niesłychanie długi żywot. Obecnie jest w średnim wieku. Przez następne ok. 5,5 miliarda lat będzie stale przemieniać wodór w energię, co nie oznacza jednak, że przez cały ten czas możemy się czuć bezpiecznie. Choć obecnie Słońce zachowuje się stabilnie, nie pozostaje wciąż takie samo. Jego jasność i temperatura stopniowo wzrastają, co spowoduje, że za mniej więcej miliard lat temperatura na Ziemi będzie tak wysoka, iż wyparuje większość mórz i oceanów. Duże obszary naszej planety zamienią się w pustynię. Ludzkość będzie musiała się przenieść na inne planety.

Gdy wodorowe paliwo się wyczerpie, Słońce straci stabilność. Najpierw jego rozmiary zaczną gwałtownie rosnąć. Zewnętrzne warstwy gorącej atmosfery będą się rozpościerać prawie do orbity Merkurego. Słońce stanie się **czerwonym olbrzymem**. Na Ziemi skały przemienią się w roztopioną lawę. Na naszym globie nie pozostanie już nic żywego – ojczyzna ludzi stanie się jałową planetą. Następnie głęboko w Słońcu atomy helu zaczną się przemieniać w węgiel i cięższe pierwiastki. W końcu zostanie zużyty cały zapas atomowego paliwa. Słońce odrzuci większość swej materii i skurczy się do bardzo małych rozmiarów, przeistaczając się w **białego karła**. Potem przez wiele miliardów lat będzie stygło, stając się brązowym, a później **czarnym karłem**.



Rys. A.25. Cykl życia Słońca.

Wszystkie gwiazdy, które obserwujemy na niebie, można przedstawić na wykresie zależności mocy promieniowania gwiazdy (czyli całkowitej energii wypromieniowanej w czasie jednej sekundy) od jej temperatury. Nosi on nazwę **diagramu Hertzsprunga–Russella** (w skrócie **diagram H–R**). Można na nim również zobrazować kolejne etapy ewolucji gwiazd. Oś odciętych wskazuje malejącą temperaturę powierzchni gwiazdy, a na osi rzędnych zaznacza się, w skali logarytmicznej, stosunek mocy promieniowania gwiazdy do mocy promieniowania Słońca.



Rys. A.26. Diagram Hertzsprunga–Russella. Czerwona linia przedstawia kolejne etapy ewolucji Słońca.

Ewolucja gwiazdy składa się z kilku etapów, podczas których jej wielkość i temperatura ulegają gwałtownym zmianom. Długość życia i przebieg ewolucji gwiazdy zależy głównie od jej masy:

a) gwiazdy o małej masie:

mgławica → protogwiazda → gwiazda ciągu głównego → czerwony olbrzym → mgławica planetarna z białym karłem → czarny karzeł

b) gwiazdy o dużej masie:

mgławica → protogwiazda → gwiazda ciągu głównego → nadolbrzym → supernowa → gwiazda neutronowa lub czarna dziura

Gwiazdy rodzą się w rozległych, ciemnych obłokach gazu i pyłu (zwanymi również obłokami międzygwiazdowymi). Cząsteczki materii poruszają się szybko i chaotycznie. Jak wiemy, ciała posiadające masę przyciągają się siłami grawitacji. Może dojść do zderzenia kilku takich cząste-

czek. Zwiększy się masa, a więc zwiększy się i siła grawitacji. W ten sposób powstaje **protogwiazda**, która zaczyna wychwytywać i przylączać do siebie cząsteczki z sąsiedztwa, zwiększając swoją masę. Całość jest utrzymywana przez siłę grawitacji.

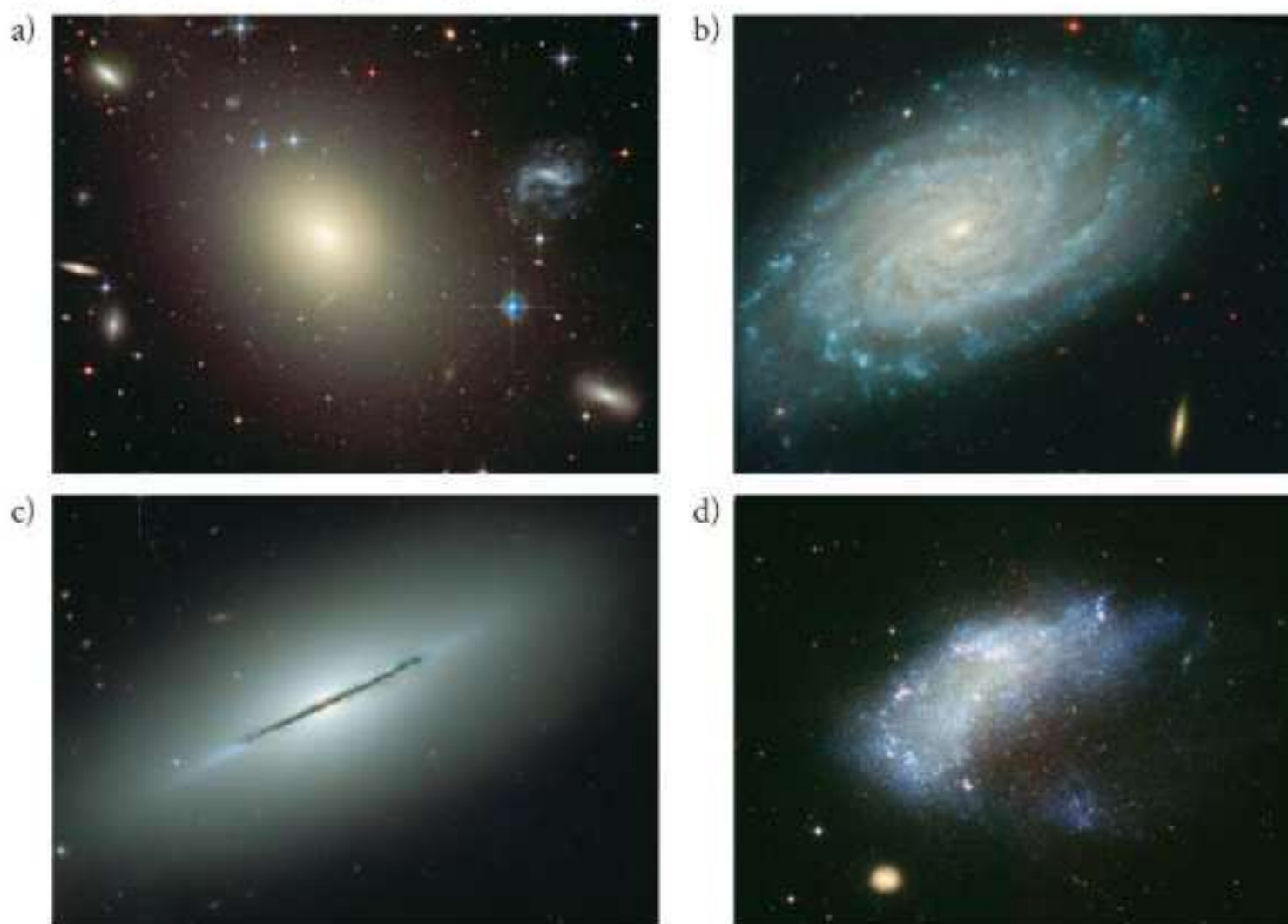
Grawitacyjne kurczenie się obłoku i protogwiazdy powoduje znaczny wzrost temperatury i ciśnienia w jej wnętrzu. Kiedy temperatura w centrum osiągnie 10 milionów stopni, zaczynają się procesy termojądrowe. Wyzwalają one olbrzymie ilości energii, która jest wysyłana w przestrzeń kosmiczną. Protogwiazda staje się **gwiazdą ciągu głównego**. Gdy paliwo wodorowe w centrum gwiazdy ulegnie wyczerpaniu, gwiazda traci swoje źródło energii. Rdzeń, który wtedy składa się głównie z helu, zaczyna się kurczyć pod wpływem grawitacji. Synteza wodoru w hel nadal trwa na styku rdzenia helowego i zewnętrznej otoczki wodorowej. Temperatura powierzchni gwiazdy spada i staje się ona czerwona, ale gwiazda świeci jaśniej niż w stanie ciągu głównego. Jest to spowodowane tym, że promieniowanie jest emitowane na znacznie większej powierzchni. „Rozdętą” gwiazdę nazywamy **czerwonym olbrzymem**. Grawitacyjne kurczenie rdzenia powoduje wzrost temperatury. Gdy w centrum zapanuje temperatura 100 milionów stopni, reakcje syntezy jądrowej zostają wznowione. Teraz hel zamienia się w węgiel. Wydziela się energia. Następuje powiększenie rdzenia helowego. W gwiazdach o większych masach dochodzi do zamiany węgla w cięższe pierwiastki, takie jak tlen, aluminium, wapń. Da się zaobserwować czerwone olbrzymy lub czerwone nadolbrzymy – zależnie od masy gwiazdy. Jądro węglowe może powstać tylko w gwiazdach o masie większej niż 1,2 mas Słońca. Gwiazdy o mniejszych masach poprzestają na jądrze helowym. Jądro helowe będzie się kurczyć i powstanie **biały karzeł**. Jednocześnie otoczka, która cały czas oddalała się od jądra, odłączy się i powstanie **mgławica planetarna**. Gwiazdy o masach 1,2–2,5 mas słońca wytwarzają jądro węglowe. Będą ustawać reakcje spalania helu w węgiel w jądrze i wodoru w hel w otaczających jądro warstwach. Jednocześnie gwiazda, na skutek niestabilności, będzie tracić masę przez wypływ bądź odrzucenie części otoczki tak długo, aż końcowa masa gwiazdy przekroczy wartość 1,4 mas słońca. Wówczas gwiazda się oziębi, wypromieniuje swoją energię w kosmos i stanie się **czarnym karłem**.

Gwiazda ciągu głównego o masie co najmniej dziesięciu mas Słońca staje się **nadolbrzymem**. W jego wnętrzu w temperaturze kilku milionów stopni powstają coraz cięższe pierwiastki. Nadolbrzymy giną w potężnym wybuchu, który obserwuje się jako tzw. **wybuch supernowej**. Ścisła on materię w jej centrum, doprowadzając do powstania bardzo gęstej gwiazdy. Blask może przewyższyć jasność całej galaktyki. Po wybuchu supernowej powstaje (w zależności od masy) **gwiazda neutronowa** lub **czarna dziura**. Przy bardzo mocnym ściśnięciu materii protony i elektrony zbliżają się do siebie na bardzo małą odległość i łączą się ze sobą. W wyniku tego protony zamieniają się w neutrony, a elektrony przestają istnieć. Powstaje gwiazda neutronowa składająca się z neutronów znajdujących się w takich odległościach, jakie występują między składnikami jądra atomowego. Na tak małych odległościach neutrony przyciągają się nie tylko siłami grawitacji, lecz także dużo potężniejszymi siłami jądrowymi.

Gwiazda o masie przewyższającej kilkanaście razy masę Słońca, kończąc swój żywot, wybuchu jako supernowa, ale w przeciwieństwie do gwiazdy neutronowej zapada się, tworząc **czarną dziurę**. To obiekt wytwarzający tak wielkie siły grawitacji, że nic, nawet światło, nie może się z niego wydostać. W 2015 roku zostały po raz pierwszy zaobserwowane **fale grawitacyjne** wytworzone

rzony w wyniku zderzenia dwóch czarnych dziur. Fale grawitacyjne to rozchodzące się drgania przestrzeni, w której działają siły grawitacji. Ich istnienie przewidywał Albert Einstein. Źródłem fal grawitacyjnych są obiekty o bardzo dużych masach i niezwykle wysokich przyspieszeniach.

Gwiazdy występują w ogromnych skupiskach nazywanych **galaktykami**. Odległości między galaktykami są dużo większe niż ich rozmiary. W obserwowanej części Wszechświata znajduje się 10^{10} galaktyk. Nasza Galaktyka – Droga Mleczna – należy do dużych galaktyk spiralnych. Gwiazdy są zgromadzone w jej centrum oraz w obszarach w kształcie spiralnych ramion. Niektóre galaktyki, podobnie jak nasza, przypominają spiralny dysk, inne mają kształt kuli lub elipsoidy, a jeszcze inne są postrzępione i nieregularne.



Rys. A.27. Przykłady galaktyk różnych typów: a) eliptyczna, b) spiralna, c) soczewkowata, d) nieregularna.

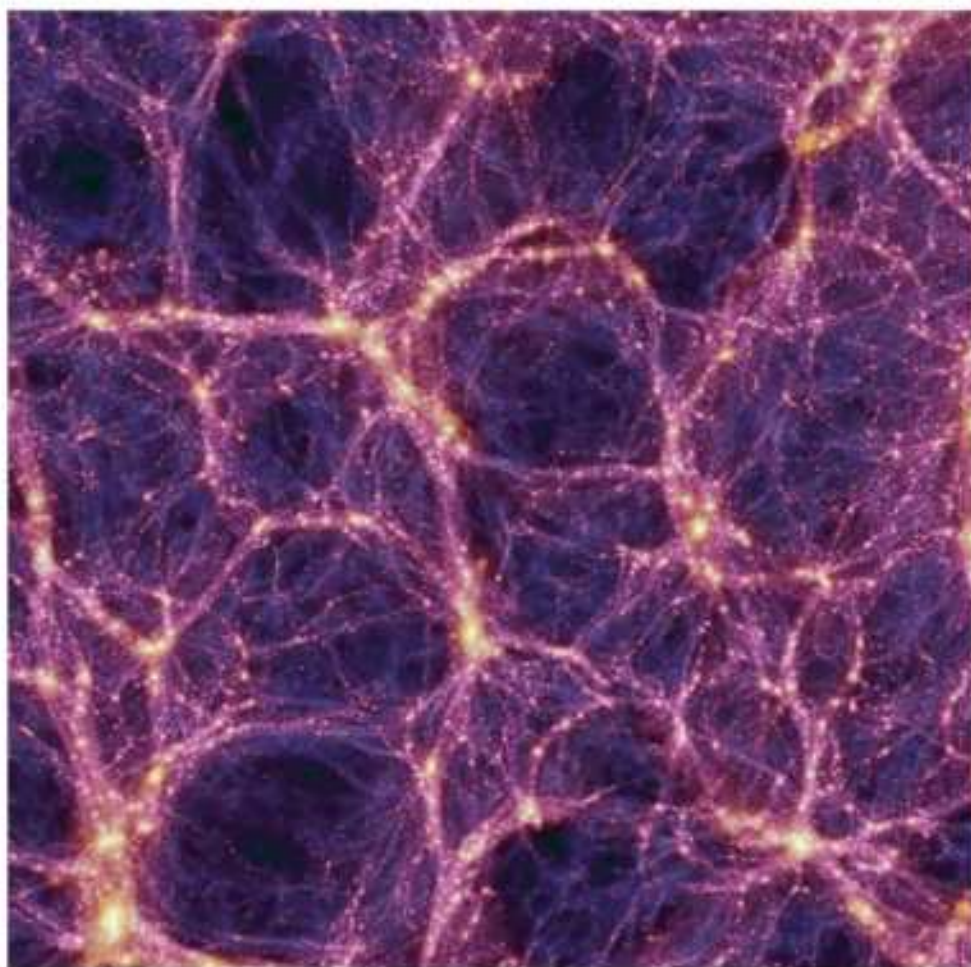
Badania rozkładu przestrzennego galaktyk we Wszechświecie prowadzą do wniosku, że są one zgrupowane w skupiska od kilku do kilkudziesięciu tysięcy galaktyk nazywanych **gromadami galaktyk**. Pomiędzy gromadami przestrzeń jest pusta. Droga Mleczna oraz inne mniejsze galaktyki wchodzi w skład gromady ponad 50 galaktyk o nazwie **Układ Lokalny** (lub **Grupa Lokalna Galaktyk**). Ma on rozmiary ponad 10 milionów lat świetlnych.

Pomiary położenia wielu tysięcy galaktyk wykazały, że nie są one rozmieszczone równomiernie. Tworzą skomplikowane struktury – łańcuchy i ściany otaczające puste obszary. Rozmieszczenie to przypomina pianę mydlaną.

Albert Einstein, a także jego następcy zakładali, że Wszechświat w największej skali jest jednorodny (tzn. że średnia gęstość występującej w nim materii jest taka sama) i izotropowy (tzn. z każdego punktu przestrzeni wygląda i zachowuje się tak samo). Założenia te stały się podsta-

wą wszelkich rozważań kosmologicznych i noszą nazwę **zasady kosmologicznej**.

Astronomowie i fizycy są obecnie przekonani, że najbardziej prawdopodobnym modelem ewolucji Wszechświata jest model **Wielkiego Wybuchu** (ang. Big Bang). Zakłada on, że około 13,8 miliardów lat temu cała materia Wszechświata, wszystkie gwiazdy i galaktyki mieściły się niemal w jednym punkcie o niewyobrażalnie dużej gęstości i temperaturze. W wyniku gigantycznej eksplozji najpierw pojawiły się cząstki elementarne, najprawdopodobniej kwarki (najmniejsze cząstki, z których zbudowane są protony i neutrony) i elektrony. Poruszały się z ogromnymi prędkościami i zderzając się ze sobą, powodowały powstawanie kolejnych cząstek – protonów i neutronów.



Rys. A.28. Obraz rozmieszczenia galaktyk w przestrzeni otrzymany za pomocą symulacji komputerowej.

Gęstość Wszechświata bardzo szybko malała. Obniżała się również temperatura. Po upływie około 380 000 lat od Wielkiego Wybuchu temperatura obniżyła się do około 3000 stopni i zaczęły powstawać atomy wodoru i helu. Fotony powstałe w tym okresie bez przeszkód rozchodziły się we Wszechświecie i możemy je teraz rejestrować jako tak zwane **promieniowanie reliktowe** (**promieniowanie tła**). Po około 200 mln lat atomy łączyły się w obłoki, z których uformowały się pierwsze gwiazdy i galaktyki.

Jest wiele danych obserwacyjnych oraz dużo przesłanek teoretycznych potwierdzających model Wielkiego Wybuchu. Do najważniejszych należy **ucieczka galaktyk**. W latach 1922–1929 amerykański uczoney Edwin Hubble (czyt. habl) zebral bogaty materiał doświadczalny świadczący o tym, że Wszechświat się rozszerza. Obserwował wiele galaktyk, mierzył ich odległości od nas i badał ich widma. Zauważył, że mają one taki sam wygląd jak widmo światła słonecznego, ale wszystkie linie widmowe są jednakowo przesunięte w stronę fal długich, czyli w stronę barwy czerwonej. Jest to tzw. **przesunięcie ku czerwieni** (ang. *redshift*). Na tej podstawie stwierdził, że galaktyki oddalają się od nas.

Hubble stwierdził, że im dalej znajduje się obserwowana galaktyka, tym większa jest jej prędkość oddalania.

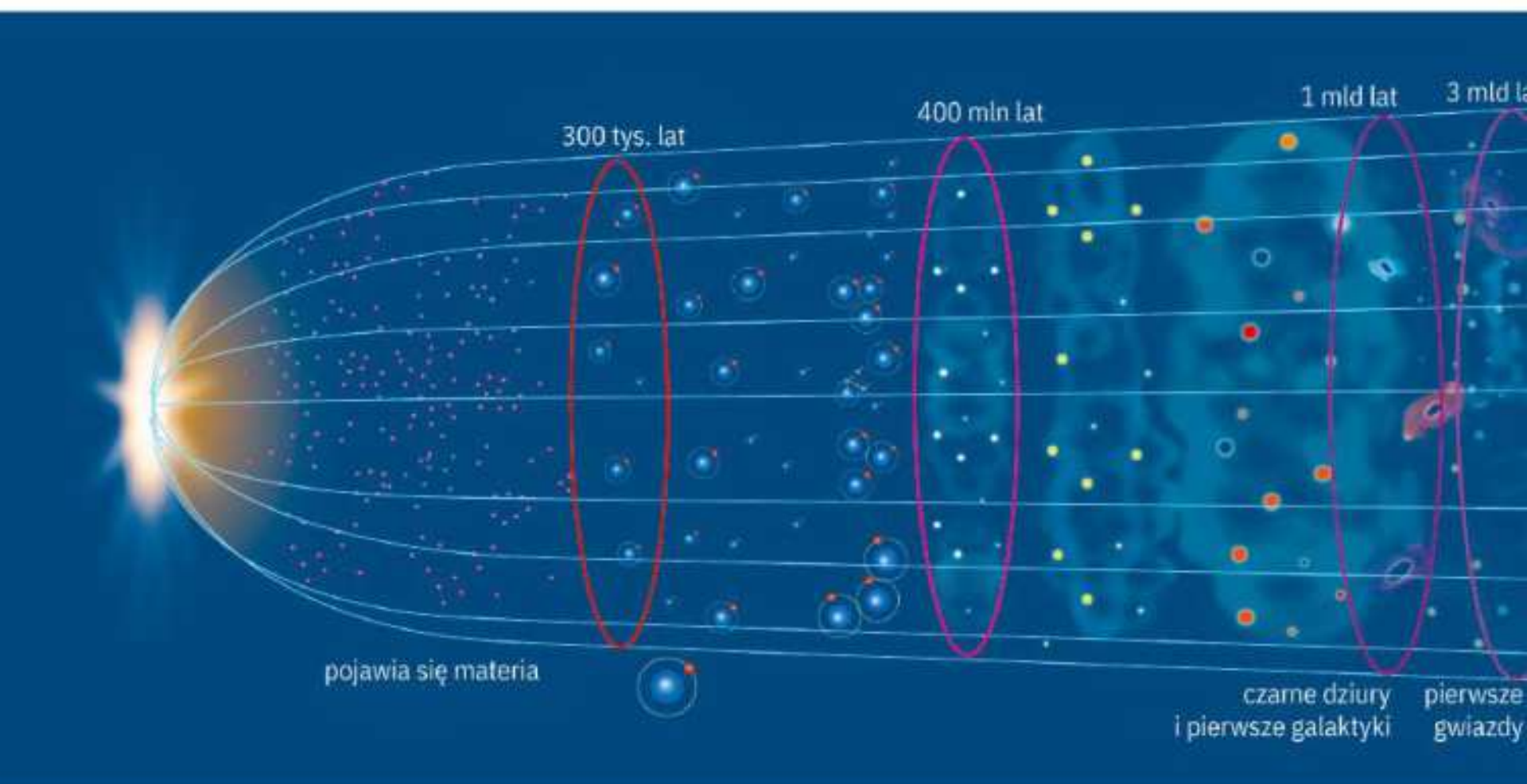
Drugie ważne wydarzenie, które potwierdziło model Wielkiego Wybuchu, to odkrycie mikrofalowego promieniowania tła. Amerykański fizyk jądrowy i kosmolog, George Gamow, który opracował teorię rozszerzającego się Wszechświata, uważał, że „żar” Wielkiego Wybuchu powinien pozostawić do chwili obecnej ślad w postaci tzw. **promieniowania reliktowego**. O pomysłe Gamowa zapomniano aż do 1964 roku. Wtedy to pracownicy badający szumy za-

klócające pracę anten radiowych odkryli przypadkowo istnienie promieniowania emitowanego z całej przestrzeni kosmicznej. Było to przewidziane przez Gamow promieniowanie reliktowe – pozostałość po Wielkim Wybuchu, bezpośredni dowód narodzin gorącego Wszechświata przed około 14 miliardami lat.

Innym faktem doświadczalnym świadczącym o poprawności modelu Wielkiego Wybuchu jest procentowy skład pierwiastków lekkich występujących we Wszechświecie. Model przewidywał, że reakcje termojądrowe, które zachodziły we wczesnym etapie rozwoju Kosmosu, doprowadziły do tego, że powstały w ich wyniku hel powinien stanowić około 25% pierwiastków występujących we Wszechświecie, a wodór około 75%. Obserwacje wykazują, że rzeczywiście tak jest.

Pojawia się pytanie o to, czy rozszerzanie to będzie trwało wiecznie, czy też w przyszłości Wszechświat zacznie się kurczyć. Z badań uczonych wynika, że siły grawitacji mogą spowodować spowolnienie ucieczki galaktyk. Losy Wszechświata zależą od tego, ile jest materii w całej jego objętości, czyli od tego, jaka jest średnia gęstość tej materii. Jeśli średnia gęstość materii w przestrzeni kosmicznej jest większa od **gęstości krytycznej**, to po pewnym czasie rozszerzanie dobiegnie końca, Wszechświat zacznie się kurczyć, a galaktyki zaczną się zbliżać do siebie, aż połączą się w jeden ogromny obiekt. Jeśli natomiast średnia gęstość materii w kosmosie jest mniejsza od gęstości krytycznej, to siły grawitacji nie zdołają powstrzymać rozszerzania się Wszechświata i będzie ono trwało wiecznie.

Niestety, obecnie naukowcy nie potrafią w sposób wystarczająco dokładny określić wartości średniej gęstości Wszechświata. Okazało się bowiem, że gwiazdy wchodzące w skład galaktyk i pozostała materia w przestrzeni między gwiazdami i galaktykami stanowią tylko niewielką



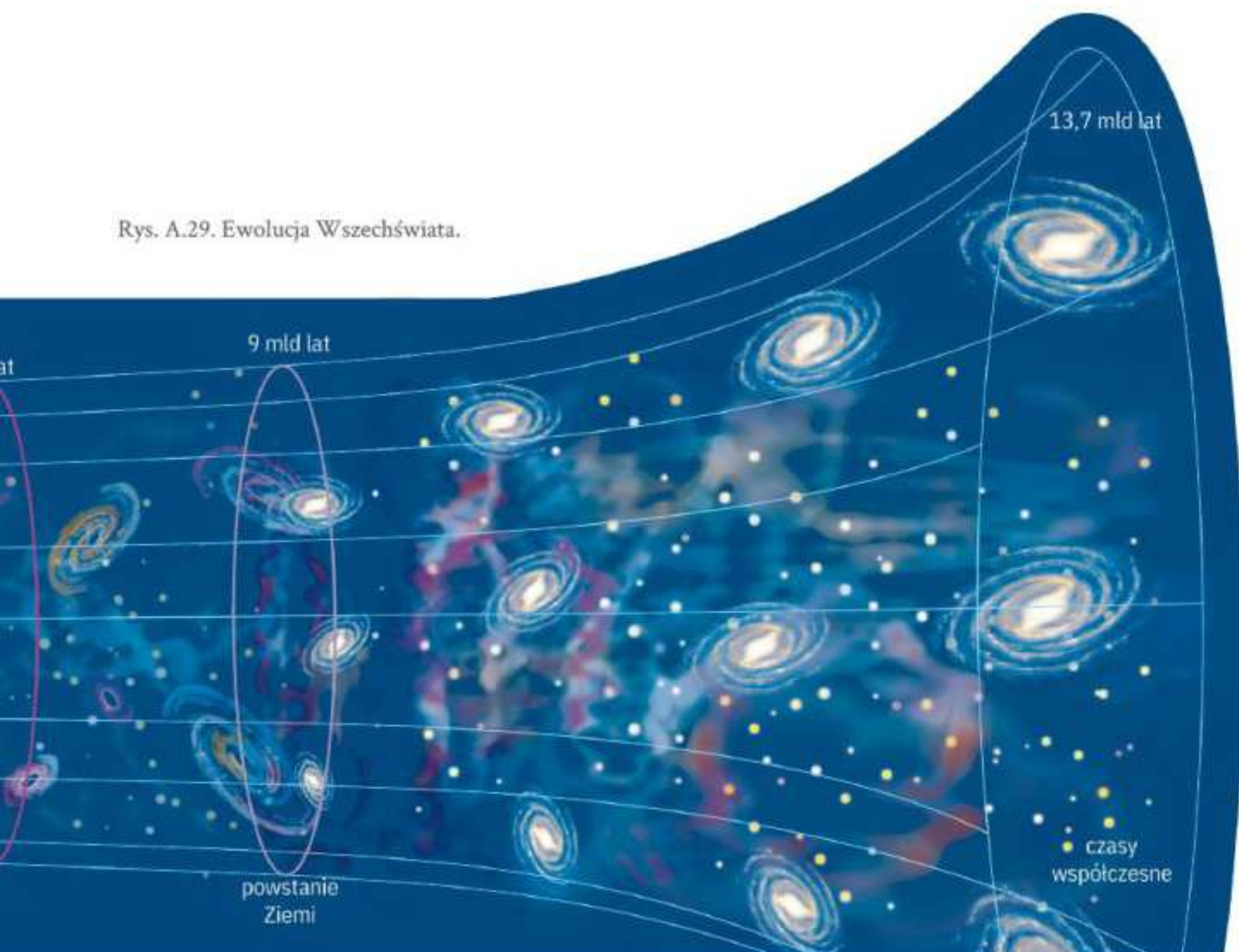
część całej materii Kosmosu. Obserwacje prowadzone w latach 70. i 80. XX wieku wykazały, że masa obserwowanej materii we Wszechświecie jest niewystarczająca, aby wytłumaczyć siły istniejące grawitacji wewnątrz galaktyk i pomiędzy nimi. Zwłaszcza gwiazdy na obrzeżach galaktyk poruszają się znacznie szybciej, niż wynikałoby to z przyciągania przez obserwowaną materię. Pomiar prędkości obrotu galaktyk sugeruje, że oprócz gwiazd jest w nich jakaś inna materia, która wpływa na ich ruch.

Nazwano ją **ciemną materią** dla odróżnienia od świecących gwiazd. Zgodnie ze współczesnymi hipotezami ciemna materia występuje w całym Wszechświecie, zarówno w przestrzeni międzygwiazdowej, wewnątrz galaktyk, jak i między nimi. Nie świeci ona ani nie wywiera ciśnienia. Wpływa w istotny sposób na powstawanie galaktyk i ewolucję Wszechświata.

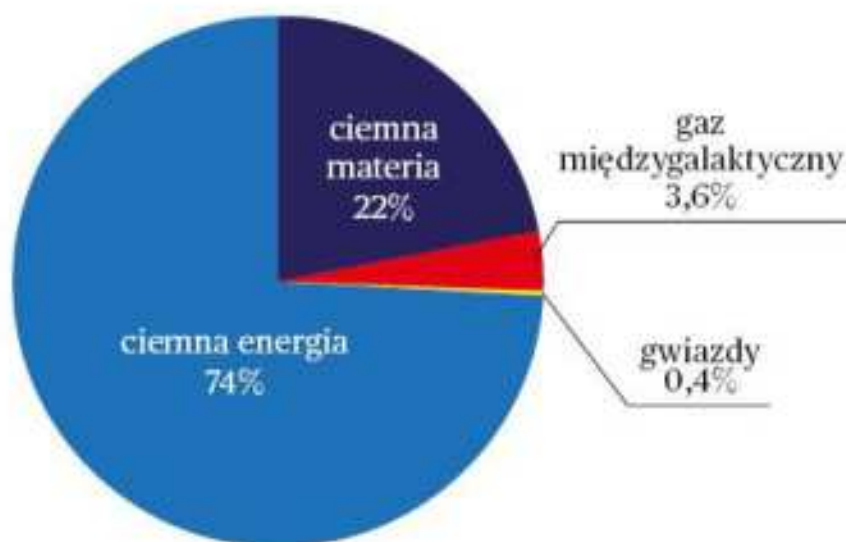
Próby ustalenia tego, czym jest ciemna materia, nie dały do dziś ostatecznych wyników. Fizycy badający cząstki elementarne sugerują, że może to być materia całkiem inna od tej, z której zbudowane są gwiazdy i planety.

Dane z obserwacji pozwalają określić, z jaką prędkością obecnie rozszerza się Wszechświat.

Rys. A.29. Ewolucja Wszechświata.



Na pytania, czy i jak prędkość ta zmienia się w miarę upływu czasu, czy rozszerzanie będzie trwało wiecznie, czy też w przyszłości kosmos zacznie się kurczyć, odpowiedzieli laureaci Nagrody Nobla z fizyki z 2011 roku, Amerykanie Saul Perlmutter, Adam Riess i Brian Schmidt. Odkryli, że Wszechświat rozszerza się coraz szybciej, tak jakby rozpychała go jakaś tajemnicza siła. Aby wyjaśnić to zjawisko, do kosmologii wprowadzono nowy czynnik – **ciemną energię**. To hipotetyczna forma energii, która wypełniając całą przestrzeń, powoduje jej rozpychanie. Ciemna energia różni się istotnie od ciemnej materii – jej oddziaływanie musi mieć charakter odpychający. Oszacowano, że ciemna energia stanowi 74% energii Wszechświata. Istnieją liczne hipotezy na temat pochodzenia i natury ciemnej energii, ale żadna z nich nie została potwierdzona.



Rys. A.30. Szacunkowy rozkład ciemnej materii i ciemnej energii we Wszechświecie.

Odkrycie noblistów sugeruje, że rozszerzanie Wszechświata będzie trwało zawsze. Za kilka miliardów lat kosmos będzie olbrzymi, ale niezwykle chłodny. Po pewnym czasie stanie się on zapewne martwy, bo wygasną wszystkie gwiazdy, a nowe nie będą powstawać w bardzo rozrzedzonej materii.



MODUŁ FAKULTATYWNY B
– CZĘŚĆ 1

B.1. Ruchy ciał z uwzględnieniem oporów ośrodka

Na ciało poruszające się w ośrodku gazowym lub ciekłym działają siły oporu zwrócone przeciwnie do prędkości ciała. Jeżeli ciało porusza się w ośrodku gazowym, to mówimy o **oporze aerodynamicznym**, a jeżeli porusza się w cieczy, to występuje **opór hydrodynamiczny**.

Działanie siły oporu możemy wyczuć na przykład wtedy, gdy przesuwamy otwartą dłoń pod wodą. Im szybciej poruszamy ręką, tym trudniej jest wykonać ten ruch. Mniejszą siłę oporu poczujemy, jeśli obrócimy dłoń „na płasko”, zmniejszając powierzchnię zwróconą w kierunku ruchu.

Siły oporu ośrodka, podobnie jak siły tarcia, zawsze przeciwstawiają się ruchowi ciała. Ich wartość zależy od prędkości obiektu, jego wielkości, kształtu i płynu, w jakim obiekt się porusza. W fizyce poprzez **płyny** rozumie się substancje zdolne do przepływu, czyli ciecze i gazy. Dla większości dużych obiektów, takich jak samochody czy samoloty, które poruszają się ze stosunkowo dużymi prędkościami, typowymi dla ruchu w powietrzu, wartość siły oporu F_{op} jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości ciała v :

$$F_{op} = \frac{1}{2} C S \rho \cdot v^2,$$

gdzie C jest **współczynnikiem oporu aerodynamicznego** zależnym od kształtu ciała, S – największą powierzchnią przekroju ciała w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu, a ρ – gęstością ośrodka (dla powietrza $\rho = 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$).

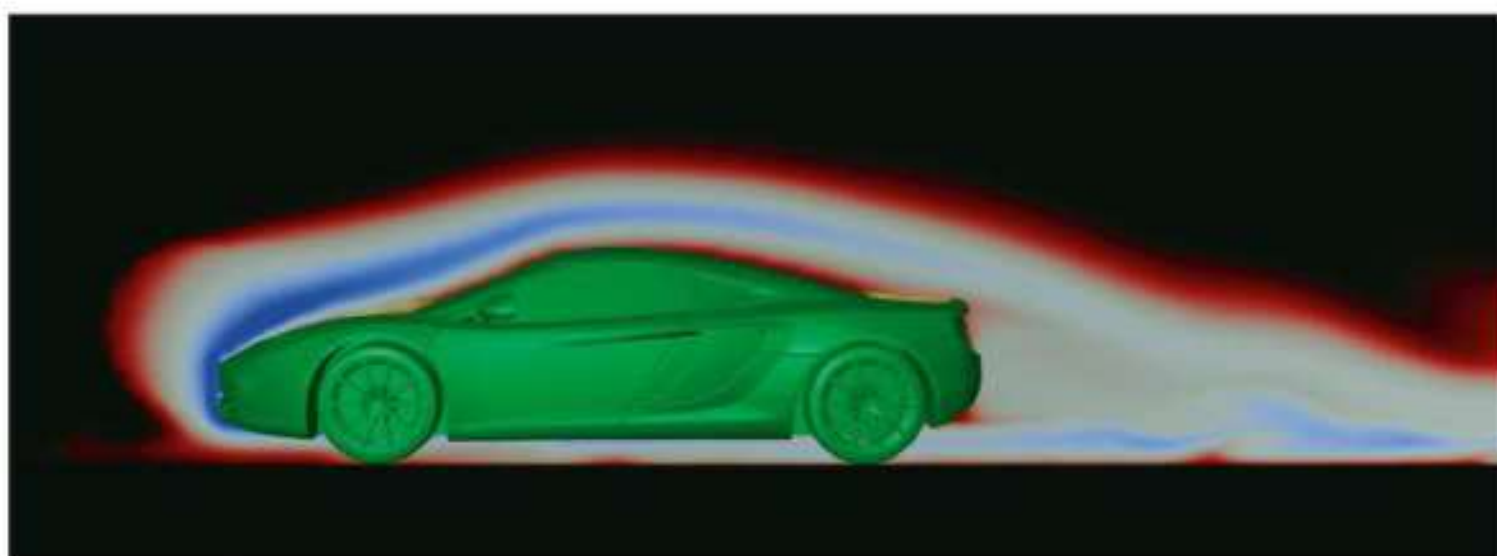
Równanie to można również zapisać w prostszej formie jako $F_{op} = b \cdot v^2$, gdzie b jest stałą równą $0,5 C S \rho$.

Warto zwrócić uwagę, że dwukrotny wzrost prędkości ciała spowoduje aż czterokrotny wzrost wartości siły oporu. Kierowcy wiedzą, że wraz ze wzrostem prędkości samochodu rośnie zużycie paliwa. Dzieje się tak, ponieważ siła napędzająca musi wówczas zrównoważyć coraz większe siły oporu ruchu.



Rys. B.1. Przy wzroście prędkości dwa razy opór powietrza rośnie cztery razy.

Projektanci samolotów i samochodów nadają swoim pojazdom aerodynamiczne (opływowe) kształty, które pomagają zredukować siłę oporu, a tym samym pozwalają osiągać większe prędkości i zmniejszać zużycie paliwa.



Rys. B.2. Zmniejszenie współczynnika C z 0,32 do 0,30 dla samochodu obniża zużycie paliwa o 0,2 l/100 km.



Wartość współczynnika oporu C jest wyznaczana doświadczalnie przy użyciu **tunelu aerodynamicznego**. Wynosi ona od 0,1 dla najdoskonalszych samolotów do 1,4 dla spadochronów. Zwróć uwagę, że jest to wielkość bezwymiarowa – nie ma jednostki.

Rys. B.3. Tunel aerodynamiczny, w którym testowane są modele samolotów.

Współczesne samochody mają współczynnik oporu nieco mniejszy niż 0,4. Wszystkie wystające części samochodu, zwłaszcza kanciaste (np. bagażnik na dachu), podczas jazdy powodują dodatkowe zawirowania powietrza, co skutkuje zwiększeniem współczynnika oporu. Przy prędkościach osiąganych na autostradach ponad połowa mocy samochodu jest zużywana na pokonywanie oporu powietrza. Z punktu widzenia zużycia paliwa najbardziej oszczędna jest prędkość około $75 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Również w świecie sportu prowadzone są badania mające na celu zmniejszenie sił oporu ośrodka. Pływacy, rowerzyści i narciarze zakładają specjalnie zaprojektowane pełne kombinezony. Ich gładka powierzchnia zewnętrzna oraz ściśnięta sylwetka zapewniają zmniejszenie siły oporu nawet o 10%.

Rys. B.4. Siła oporu powietrza hamuje ruch narciarza. Zakłada on specjalny aerodynamiczny kombinezon i przybiera najkorzystniejszą pozycję.



Ptaki migrujące, które pokonują długie dystanse, mają opływowe kształty, np. wydłużone szyje, aby minimalizować działającą na nie siłę oporu. Stada ptaków formują w locie figury o kształcie ostrza.

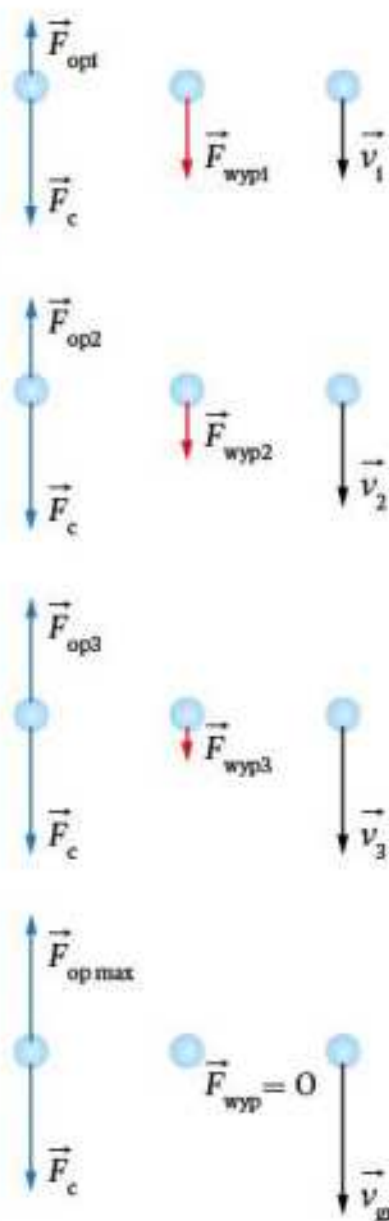
Rys. B.5. W trakcie długich lotów gęsi tworzą formacje w kształcie litery V. Kształt ten pomaga zmniejszyć opór powietrza i tym samym zredukować ilość energii zużywanej przez ptaki.



Rozważmy ruch bryłki gradu spadającej w powietrzu z uwzględnieniem oporu ośrodka. Działają na nią dwie siły: siła ciężkości $\vec{F}_c$ i siła oporu $\vec{F}_{op}$ (pomijamy znikomo małą siłę wyporu).

Zwrócona pionowo w dół siła ciężkości pozostaje cały czas stała. Siła oporu, zwrócona do góry, rośnie wraz ze wzrostem prędkości bryłki. W początkowej fazie ruchu, kiedy prędkość jest mała, opór jest też mały. Zatem w pierwszych sekundach ruch jest przyspieszony – prędkość rośnie. W miarę wzrostu prędkości wzrasta siła oporu, a przyspieszenie ciała maleje. Przy odpowiednio dużej prędkości siła oporu wzrośnie do tego stopnia, że zrównoważy siłę ciężkości. Wówczas siła wypadkowa $\vec{F}_{wyp}$ będzie równa zero i przyspieszenie zmaleje do zera. Wtedy ruch stanie się jednostajny – bryłka będzie opadać ze stałą prędkością, zwaną **prędkością graniczną** v_{gr} . Wartość tej prędkości zależy od kształtu, wielkości i gęstości ciała. Na przykład dla kulistej bryłki gradu o promieniu 4 mm wynosi około $43 \frac{m}{s}$. Tak duża prędkość spadania bryłek gradu i sztywność lodu powoduje, że grad może wyrządzić znaczne szkody, nawet uszkodzić karoserię samochodu.

Działanie siły oporu na ciało spadające w powietrzu jest wykorzystywane w spadochronie. Człowiek, spadając z dużej wysokości, przed otwarciem spadochronu osiąga prędkością graniczną, której wartość wynosi od około $200 \frac{km}{h}$ do około $350 \frac{km}{h}$ zależnie od pozycji, w jakiej się znajduje. Po otwarciu spadochronu prędkość skoczka znacznie maleje. Spadochron ma pole przekroju poprzecznego S prawie sto razy większe niż człowieka (spadochroniarz ma najmniejszy przekrój poprzeczny równy około $0,18 m^2$). Współczynnik C jest dla spadochronu około dwa razy większy (dla spadochroniarza spadającego stopami w dół wynosi 0,7). Iloczyn CS spadochronu jest więc kilkaset razy większy niż człowieka, co powoduje, że prędkość gra-



Rys. B.6. Siły działające na ciało spadające w ośrodku stawiającym opór w czterech kolejnych chwilach ruchu.

niczna skoczek spadającego z otwartym spadochronem jest kilkadziesiąt razy mniejsza niż bez spadochronu. Jest ona bezpieczna, gdyż wynosi około $15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Jej wartość jest porównywalna z prędkością, jaką uzyskamy, zeskakując z wysokości jednego metra.

Kwadratowa zależność siły oporu od prędkości się nie sprawdza, jeśli obiekt jest bardzo mały, porusza się niewielką prędkością lub gdy ruch odbywa się w ośrodku gęstszym niż powietrze (np. w cieczy). Wówczas wartość siły oporu F_{op} jest wprost proporcjonalna do prędkości v w pierwszej potęgze:

$$F_{\text{op}} = kv,$$

gdzie k jest współczynnikiem oporu zależnym od kształtu i rozmiarów poruszającego ciała oraz od rodzaju ośrodka. Jego wartość jest określana doświadczalnie.

Obserwując zwierzęta, które żyją w wodzie, możemy zauważyć, jak bardzo siła oporu wpłynęła na ich rozwój ewolucyjny. Ryby i delfiny mają opływowe kształty po to, by zmniejszyć działającą na nie siłę oporu. Konstruktorzy wzorują się na tych kształtach, gdy projektują na przykład łodzie podwodne.

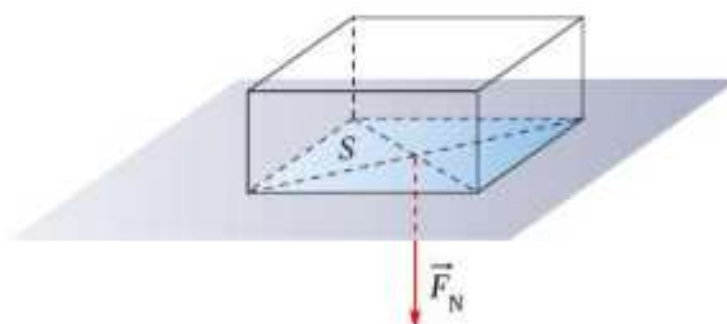


Rys. B.7. Motorówki, w szczególności wyścigowe, mają opływowe kształty.

B.2. Mechanika cieczy i gazów

Powszechnie przyjęty jest podział substancji na trzy **stany skupienia**: ciała stałe, ciecze i gazy. Ciecze i gazy mają wspólną nazwę – są to **płyny**. Płyn to każda substancja, która może dowolnie zmieniać swój kształt w zależności od naczynia, w którym się znajduje. W przypadku gazów przyjmuje objętość równą objętości naczynia. Opis zagadnień z mechaniki płynów wymaga posługiwania się pojęciami znanymi ze szkoły podstawowej: ciśnieniem i gęstością.

Przypomnijmy, że ciało leżące na podłożu działa na nie **siłą nacisku** $\vec{F}_N$. Siła nacisku jest zawsze prostopadła do powierzchni, na którą działa. Gdy ciało leży na poziomym podłożu, siła nacisku jest równa sile ciężkości. Wielkością informującą nas o wartości siły nacisku działającej na jednostkę powierzchni jest **ciśnienie** oznaczane literą p .



Rys. B.8. Siła nacisku, jaką ciało działa na podłoże.

Ciśnieniem p nazywamy wielkość skalarną równą stosunkowi wartości siły nacisku F_N do pola powierzchni S , na którą ta siła działa.

$$p \stackrel{\text{def}}{=} \frac{F}{S}$$

Jednostką ciśnienia w układzie SI jest **paskal** (Pa).

Jeden paskal jest to ciśnienie, jakie siła 1 niutona wywiera na powierzchnię 1 m^2 :

$$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2}.$$

Jednostki wielokrotne to:

- hektopaskal: $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$,
- kilopaskal: $1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pa}$,
- megapaskal: $1 \text{ MPa} = 1\,000\,000 \text{ Pa}$.

Dla danej siły nacisku ciśnienie jest tym większe, im mniejsze jest pole powierzchni S .

Do opisu płynów stosujemy pojęcie **gęstości** oznaczanej grecką literą ρ (ro). Jest to podstawowa wielkość charakteryzująca wszystkie substancje w różnych stanach skupienia.

Gęstość jest to stosunek masy substancji do objętości, jaką ona zajmuje:

$$\rho \stackrel{\text{def}}{=} \frac{m}{V},$$

gdzie ρ oznacza gęstość substancji, m – masę, a V – objętość.

Jednostką gęstości jest $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.



Rys. B.9. Ślady cegły na piasku. Największe zagłębienie pozostaje przy najmniejszej powierzchni.

Zapamiętaj

Gęstość nie zależy ani od masy ciała, ani od jego objętości, zależy natomiast od rodzaju substancji oraz od temperatury i ciśnienia.

Gęstość danej substancji jest wyznaczana doświadczalnie przez pomiar masy i objętości.

W tabeli B.1 przedstawiony jest zakres gęstości spotykanych w przyrodzie.

Tabela B.1. Gęstości wybranych obiektów

Obiekt	$\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
przestrzeń międzygwiazdowa	$10^{-18} - 10^{-21}$
najlepsza próżnia laboratoryjna	10^{-17}
powietrze (1 atm, 0°C)	1,3
powietrze (50 atm, 0°C)	6,5
woda (4°C)	$1,0 \cdot 10^3$
Ziemia: wartość średnia	$5,52 \cdot 10^3$
jądro uranu	10^{17}

Ośrodek, który w każdym punkcie ma taką samą gęstość (np. powietrze, woda), jest nazywany **ośrodkiem jednorodnym**.

Ciśnienie wywierane przez ciecz na dno i na ścianki naczynia, wywołane swym własnym ciężarem, nazywamy **ciśnieniem hydrostatycznym** p_h . Siłę nacisku, którą ciecz działa na dno i ścianki naczynia oraz powierzchnie ciał w niej zanurzonych, nazywamy **siłą parcia** $\vec{F}_p$.

Do pomiaru ciśnienia cieczy lub gazów w zbiornikach zamkniętych służą ciśnieniomierze nazywane **manometrami**. Często mają one kilka skal, na których ciśnienie odczytywane jest zarówno w paskalach (czy megapaskalach), jak i w innych jednostkach ciśnienia (spoza układu SI), takich jak: **bar** (1 bar = 10^5 Pa), **atmosfera techniczna** (1 at = 98 066,5 Pa), **atmosfera fizyczna** (1 atm = 101325 Pa), **psi** (stosowana w brytyjskim systemie miar; 1 psi = 7015 Pa).

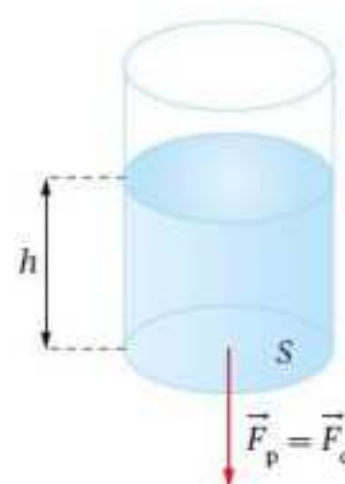
Wzór pozwalający obliczyć ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy o wysokości h można łatwo wyprowadzić, uwzględniając fakt, że wartość siły parcia, którą ciecz działa na dno naczynia, jest równa jej ciężarowi mg :

$$p_h = \frac{mg}{S}$$

Rys. B.11. Siła parcia, którą ciecz działa na dno naczynia, jest równa jej ciężarowi.



Rys. B.10. Manometr służący do pomiaru ciśnienia powietrza w kole samochodowym.



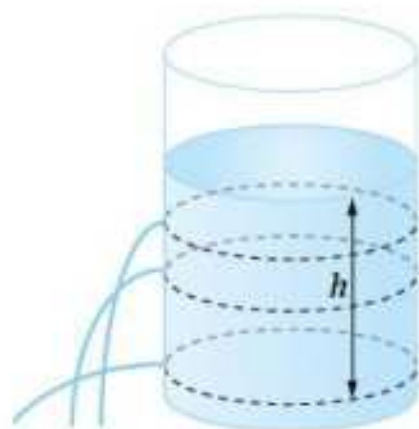
Masę cieczy wyrażoną przez jej gęstość $m = \rho_{\text{cieczy}} \cdot V$ podstawiamy do wzoru na ciśnienie:

$$p_h = \frac{\rho_{\text{cieczy}} \cdot V \cdot g}{S}$$

Wykorzystujemy wyrażenie na objętość cieczy: $V = S \cdot h$ i ostatecznie otrzymujemy:

$$p_h = \rho_{\text{cieczy}} \cdot g \cdot h,$$

gdzie ρ_{cieczy} – to gęstość cieczy (zazwyczaj jest stała), g – przyspieszenie ziemskie, a h – wysokość słupa cieczy nad poziomem, na którym wyznaczamy ciśnienie.



Z otrzymanego wzoru wynikają dwa wnioski:

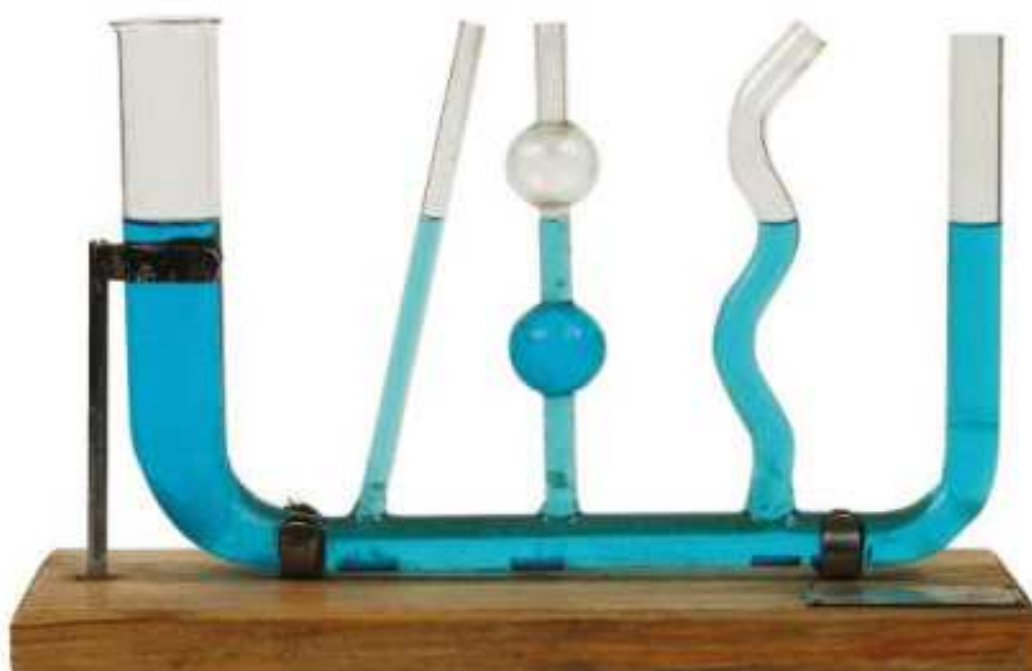
- ciśnienie hydrostatyczne rośnie wraz z głębokością,
- ciśnienie cieczy jest jednakowe dla punktów na tej samej głębokości i nie zależy od kształtu naczynia ani od masy cieczy. Zjawisko takie nazywamy **paradoksem hydrostatycznym** (choć jest zgodne z prawami fizyki), ponieważ można byłoby sądzić, że parcie cieczy na dno naczynia będzie tym większe, im więcej cieczy jest w naczyniu.

Rys. B.12. Z dolnego otworu woda wylewa się najsilniej, gdyż ciśnienie hydrostatyczne jest tym większe, im większa jest wysokość słupa cieczy.

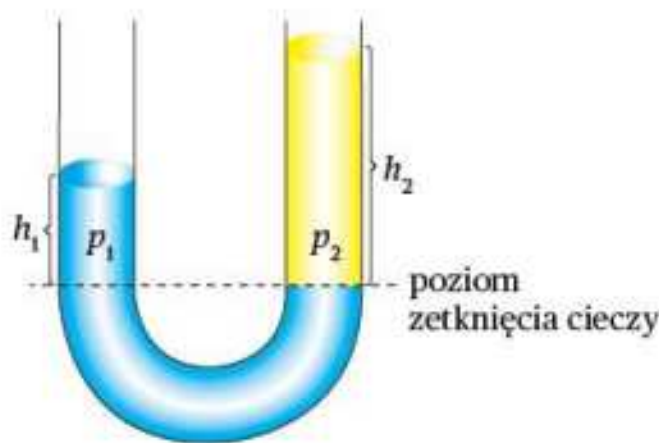


Rys. B.13. Siły parcia słupów cieczy, mających taką samą wysokość h , wywierane w naczyniach na ich dna o takiej samej powierzchni S , są jednakowe i nie zależą od kształtu tych naczyń, gdyż ciśnienia hydrostatyczne są takie same.

Dwa lub więcej naczyń połączonych ze sobą tak, że ciecz poprzez łączące je kanały może się przelewać z jednego do drugiego, nazywamy **naczyniami połączonymi**. Warunkiem równowagi cieczy jednorodnej w naczyniach połączonych jest równość ciśnień na tym samym poziomie w każdym naczyniu. Dlatego poziom cieczy jednorodnej w naczyniach połączonych jest taki sam.



Rys. B.14. Ciecz w ramionach naczyń połączonych (bez względu na ich kształt) dąży do wyrównania poziomów, tak aby ciśnienie hydrostatyczne panujące na tym samym poziomie miało taką samą wartość: $p_h = \rho_{\text{cieczy}} \cdot g \cdot h$ w każdym z ramion.



Rys. B.15. Naczynia połączone (U—rurka) z dwiema cieczami o różnej gęstości.

W przypadku różnych cieczy, niemieszających się ze sobą, ich poziomy w naczyniach połączonych nie są jednakowe.

Jeżeli ciecze znajdują się w równowadze, to poziom zetknięcia cieczy nie przesuwa się ani w dół, ani w górę. Ciśnienia słupów cieczy o wysokościach h_1 i h_2 mierzone od poziomu zetknięcia cieczy (rys. B.15) są jednakowe:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_2, \\ \rho_1 \cdot g \cdot h_1 &= \rho_2 \cdot g \cdot h_2, \\ \frac{h_1}{h_2} &= \frac{\rho_2}{\rho_1}. \end{aligned}$$

Prawo naczyń połączonych

Jeżeli dwie różne ciecze w naczyniach połączonych są w równowadze, to ciśnienia panujące na poziomie ich zetknięcia (i na każdym niższym) są jednakowe. Wysokości słupów cieczy, mierzone od poziomu zetknięcia, są odwrotnie proporcjonalne do gęstości tych cieczy.

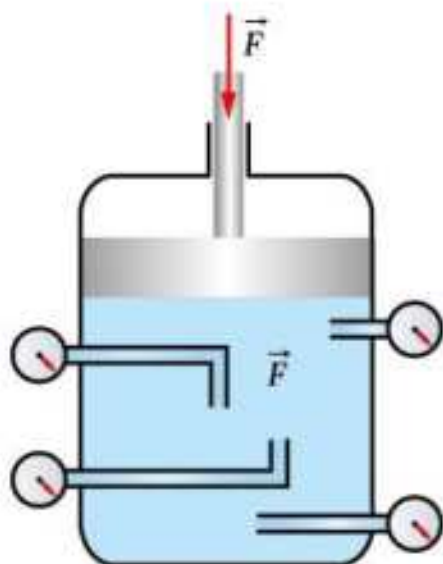
Prawo naczyń połączonych jest podstawą działania wodociągów miejskich i śluz wodnych.

Ciśnienie wewnątrz cieczy lub gazu może być też wynikiem działania siły zewnętrznej. Możliwość tę opisuje poznane w szkole podstawowej **prawo Pascala**.

Prawo Pascala

Ciśnienie wewnątrz zamkniętej cieczy lub gazu wywołane działaniem siły zewnętrznej rozchodzi się równomiernie w całej objętości płynu i ma jednakową wartość we wszystkich punktach.

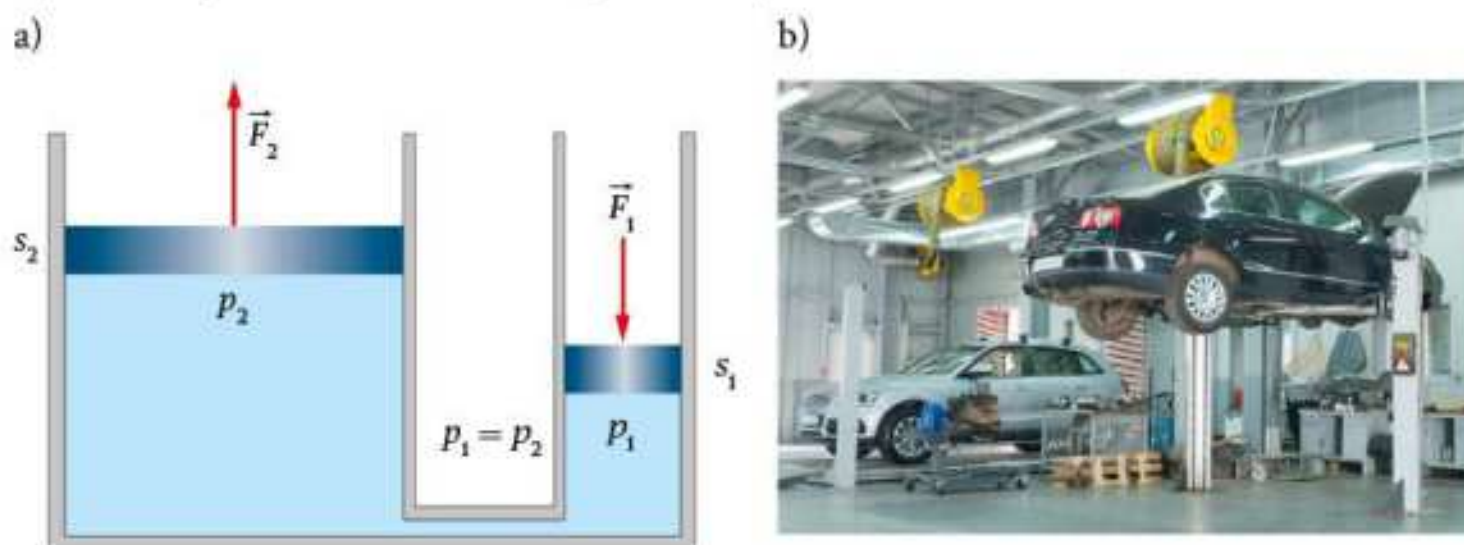
Uwaga: prawo Pascala nie uwzględnia ciśnienia hydrostatycznego powodującego wzrost ciśnienia wraz z głębokością.



Słuszność prawa Pascala można zademonstrować za pomocą cylindra wypełnionego cieczą i zamkniętego tłokiem. Wszystkie manometry zamontowane w ściankach cylindra wskazują taką samą wartość ciśnienia, i to tym większą, im większa jest siła, którą działamy na ciecz za pośrednictwem tłoka.

Rys. B.16. Doświadczalne potwierdzenie prawa Pascala. Wszystkie manometry wskazują takie samo ciśnienie wywierane przez siłę zewnętrzną $\vec{F}$.

Prawo Pascala znalazło zastosowanie między innymi w podnośnikach hydraulicznych i prasach hydraulicznych oraz w hamulcach hydraulicznych samochodów.

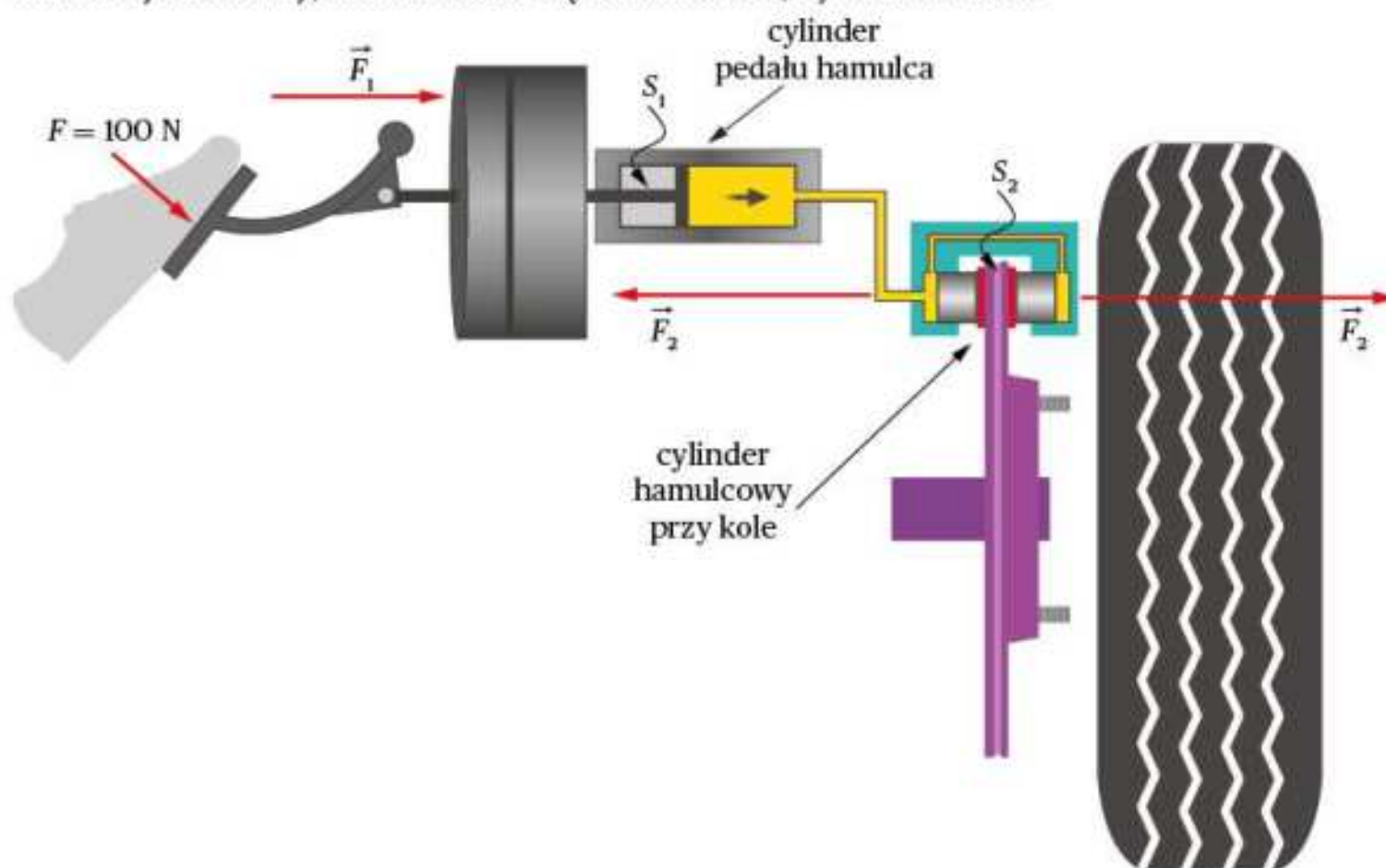


Rys. B.17. a) Schemat prasy hydraulicznej i podnośnika hydraulicznego. b) Podnośniki hydrauliczne są powszechnie używane w warsztatach do unoszenia samochodów.

Porównując ciśnienia pod małym i pod dużym tłokiem, otrzymujemy związek:

$$F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}.$$

Siła F_2 , jaką działa duży tłok, przesuwając się do góry, jest tyle razy większa od siły F_1 , jaką wywieramy na mały tłok, wciskając go w dół, ile razy powierzchnia dużego tłoka S_2 jest większa od powierzchni małego tłoka S_1 . Praca wykonana przez obie siły jest taka sama. Stosując podnośnik hydrauliczny, można unieść ciężki samochód, by zmienić koło.



Rys. B.18. Kierowca naciska na pedał hamulca, działając wzmacnianą przez dźwignię siłą, przekazywaną do układu hydraulicznego. W każdym z identycznych cylindrów hamulcowych przy kołach wytwarzane jest takie samo ciśnienie i dlatego każdy z nich działa taką samą siłą F_2 na swoje koło. W konsekwencji podczas hamowania samochód nie „ściąga” na boki.

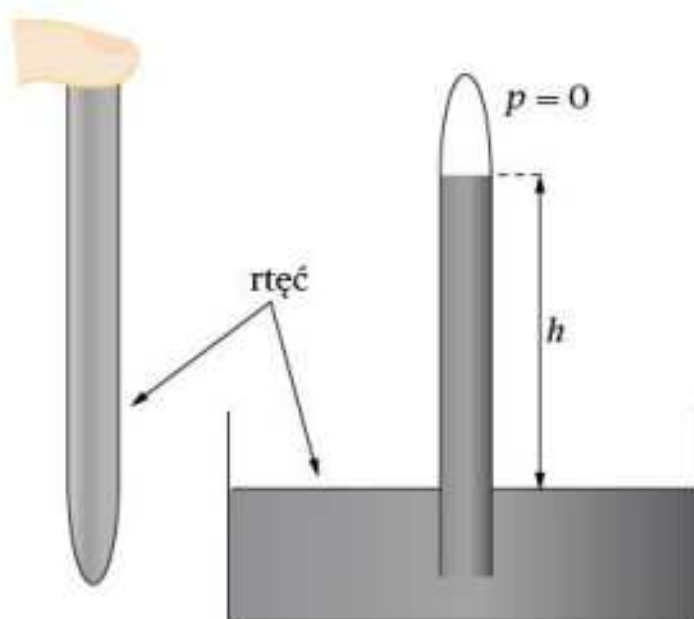
Powietrze tworzące atmosferę ziemską przyciągane jest przez Ziemię i wywiera nacisk na jej powierzchnię. Stosunek tej siły nacisku do pola powierzchni nazywamy **ciśnieniem atmosferycznym** p_{at} . Jego wartość można w przybliżeniu obliczyć tak, jak ciśnienie hydrostatyczne cieczy. Przy powierzchni Ziemi ciśnienie atmosferyczne wykazuje niezbyt duże wahania (do 50 hPa) wokół tzw. **ciśnienia normalnego**, które ma wartość:

$$101325 \text{ Pa} = 1013,25 \text{ hPa} = 760 \text{ mm Hg} = 1 \text{ atm}.$$

Zależność tę wykorzystuje się do przeliczeń różnych jednostek ciśnienia.

Ciśnienie atmosferyczne szybko maleje wraz ze wzrostem wysokości (ponieważ zmniejsza się gęstość powietrza). Na wysokości około 5 km jest o połowę mniejsze niż przy powierzchni Ziemi. Powietrze otacza ze wszystkich stron każdy przedmiot na Ziemi, dlatego na każdy fragment powierzchni ciała działa siła nacisku wynikająca z istnienia ciśnienia atmosferycznego.

Do pomiaru ciśnienia atmosferycznego służy **barometr**. W 1643 r. Evangelista Torricelli skonstruował barometr rtęciowy. **Barometr Torricellego** składa się ze szklanej rurki o długo-



ści około 1 m zasklepionej na jednym końcu. Rurkę napelniamy rtęcią, zatykamy wylot, odwracamy dnem do góry, zanurzamy w waniencie z rtęcią i otwieramy otwór. Nieco rtęci wypłynie z rurki do wanienki. Nad rtęcią w rurce tworzy się tzw. próżnia Torricellego. Znajduje się tam nasycona para rtęci, której ciśnienie jest tak małe, że można je pominąć. Wanienska z rurką stanowi z atmosferą naczynia połączone. Poziomem zetknięcia rtęci i powietrza jest górna powierzchnia rtęci w waniencie.

Rys. B.19. Barometr Torricellego.

Ciśnienie hydrostatyczne słupa rtęci o wysokości h jest równe ciśnieniu atmosferycznemu.

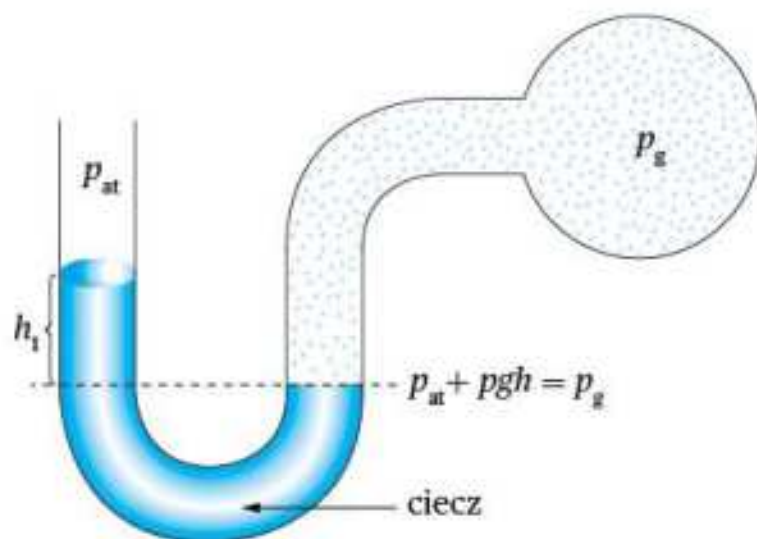
$$p_{at} = \rho gh.$$

Wyznaczenie wartości ciśnienia atmosferycznego tym sposobem sprowadza się do pomiaru wysokości h . Normalne ciśnienie atmosferyczne równoważy ciśnienie hydrostatyczne wywierane przez słupkę rtęci o wysokości 760 mm. Użycie barometrów rtęciowych do pomiaru ciśnienia atmosferycznego sprawiło, że utworzono obecnie już historyczną, ale będącą jeszcze w użyciu jednostkę ciśnienia – **milimetr słupa rtęci**, oznaczaną:

$$1 \text{ mm Hg} = 133,3 \text{ Pa}.$$

Rys. B.20. Współczesny barometr do pomiaru ciśnienia atmosferycznego.





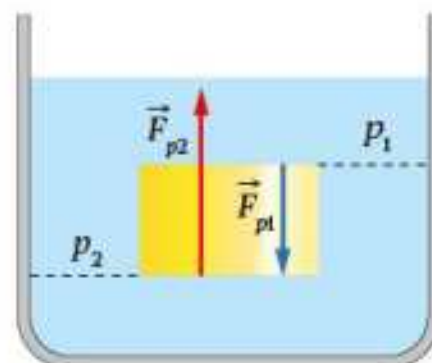
Rys. B.21. Manometr cieczowy otwarty.

Zgodnie z prawem naczyń połączonych działa najprostszy manometr – manometr cieczowy.

Ciśnienie gazu p_g w zbiorniku jest równe sumie ciśnienia hydrostatycznego słupa cieczy o wysokości h i ciśnienia atmosferycznego p_{at} . Jeżeli cieczą wypełniającą manometr jest rtęć, to wartość ciśnienia hydrostatycznego słupa h wyrażona w milimetrach słupa rtęci jest równa tej wysokości h podanej w milimetrach.

Kiedy ciało jest zanurzone w cieczy, to na każdą część powierzchni ciała wywierane jest ciśnienie hydrostatyczne, które rośnie wraz z głębokością. Siła parcia $\vec{F}_{p2}$ działająca ku górze na dolną powierzchnię przedmiotu jest większa niż siła $\vec{F}_{p1}$ działająca w dół na jego górną powierzchnię.

Rys. B.22. Siły parcia działające na ciało zanurzone w cieczy.



Siły parcia działające na obie ściany boczne oraz na przednią i tylną powierzchnię ciała się równoważą. Wypadkowa wszystkich sił parcia, którymi ciecz działa na zanurzone w niej ciało, jest więc skierowana pionowo do góry. Siłę tę nazywamy **siłą wyporu** i oznaczamy $\vec{F}_A$. Mówi o niej poznałe w szkole podstawowej **prawo Archimedes** (które odnosi się też do ciał zanurzonych w gazie):

Prawo Archimedes

Na każde ciało zanurzone w cieczy lub gazie działa zwrócona pionowo do góry siła wyporu, której wartość jest równa ciężarowi wypartej cieczy lub gazu.

$$F_A = g \cdot \rho_{\text{cieczy}} \cdot V_{\text{wypartej cieczy}} = g \cdot m_{\text{wypartej cieczy}},$$

gdzie F_A to wartość siły wyporu, ρ_{cieczy} – gęstość cieczy, g – przyspieszenie ziemskie, $V_{\text{wypartej cieczy}}$ – objętość wypartej cieczy, która jest równa objętości zanurzonej części ciała.

Zauważmy, że siła wyporu nie zależy od kształtu ciała, a tylko od jego objętości.

W przypadku ciał zanurzonych w gazie siła wyporu $F_A = g \cdot \rho_{\text{gazu}} \cdot V_{\text{wypartego gazu}}$ jest znacznie mniejsza niż dla ciał zanurzonych w cieczy, gdyż gęstości gazów są setki razy mniejsze niż gęstości cieczy. Na przykład gęstość powietrza przy powierzchni Ziemi w temperaturze 20°C wynosi zaledwie $1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, a gęstość wody – $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Ciała zanurzone w cieczy zachowują się w różny sposób: niektóre wypływają na powierzchnię cieczy i pływają częściowo zanurzone, inne zanurzają się całkowicie, ale nie toną, a jeszcze inne toną i opadają na dno. Zależy to od wartości sił działających na ciało: siły ciężkości całego ciała $\vec{F}_c$ działającej pionowo w dół i siły wyporu $\vec{F}_A$ działającej pionowo do góry.



1. Ciało unosi się nieruchomo, częściowo zanurzone w cieczy.

Zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki, siła ciężkości i siła wyporu w tym przypadku się równoważą.

$$\begin{aligned} F_c &= F_A \\ g \cdot m_{\text{ciała}} &= g \cdot m_{\text{wypartej cieczy}} \quad | : g \\ \rho_{\text{ciała}} \cdot V_{\text{ciała}} &= \rho_{\text{cieczy}} \cdot V_{\text{wypartej cieczy}} \end{aligned}$$

Siła wyporu pochodzi jedynie od tej części ciała, która jest zanurzona w cieczy, zatem:

$$V_{\text{ciała}} > V_{\text{wypartej cieczy}}$$

Stąd wynika:

$$\rho_{\text{ciała}} < \rho_{\text{cieczy}}.$$

Gdy średnia gęstość całego ciała jest mniejsza od gęstości cieczy, ciało pływa częściowo zanurzone w cieczy.

2. Ciało unosi się nieruchomo, całkowicie zanurzone w cieczy na dowolnej głębokości.

W tej sytuacji, zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki, działające na ciało siły ciężkości i wyporu również się równoważą.

$$\begin{aligned} F_c &= F_A \\ \rho_{\text{ciała}} \cdot V_{\text{ciała}} &= \rho_{\text{cieczy}} \cdot V_{\text{wypartej cieczy}} \end{aligned}$$

Tym razem siła wyporu zależy od objętości całego ciała ($V_{\text{ciała}} = V_{\text{wypartej cieczy}}$).

Stąd wynika:

$$\rho_{\text{ciała}} = \rho_{\text{cieczy}}.$$

Gdy średnia gęstość całego ciała jest równa gęstości cieczy, ciało pływa całkowicie zanurzone między dnem a powierzchnią cieczy na dowolnej głębokości, ponieważ siła wyporu nie zależy od głębokości zanurzenia.

3. Ciało opada na dno naczynia (tonie).

W tym przypadku ciężar ciała jest większy od siły wyporu. Na ciało działa siła wypadkowa skierowana pionowo w dół.

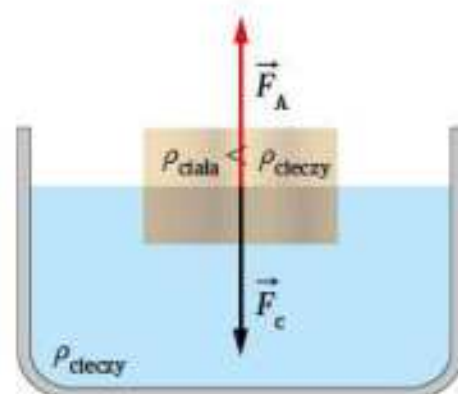
$$\begin{aligned} F_c &> F_A \\ \rho_{\text{ciała}} \cdot V_{\text{ciała}} &> \rho_{\text{cieczy}} \cdot V_{\text{wypartej cieczy}} \end{aligned}$$

Tak jak w poprzednim przypadku, siła wyporu zależy od objętości całego ciała:

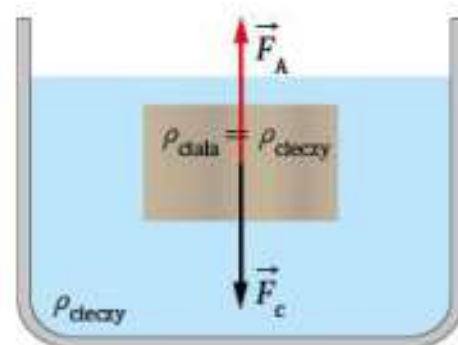
$$(V_{\text{ciała}} = V_{\text{wypartej cieczy}}).$$

Stąd wynika:

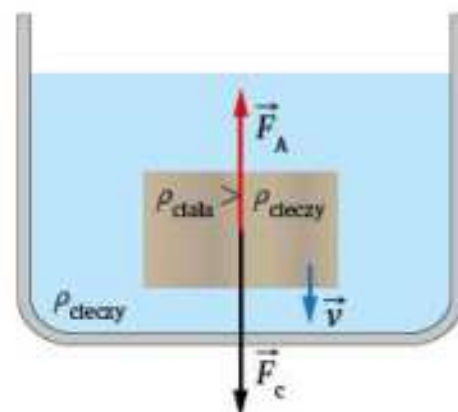
$$\rho_{\text{ciała}} > \rho_{\text{cieczy}}.$$



Rys. B.23. Gdy gęstość ciała jest mniejsza od gęstości cieczy, ciało pływa częściowo zanurzone.



Rys. B.24. Gdy gęstość ciała jest równa gęstości cieczy, ciało pływa całkowicie zanurzone.



Rys. B.25. Gdy gęstość ciała jest większa od gęstości cieczy, ciało tonie.

Zapamiętaj

Gdy gęstość ciała jest większa od gęstości cieczy, ciało opada na dno naczynia.

Na podstawie prawa Archimiedesa działa prosty przyrząd służący do wyznaczania gęstości cieczy – **areometr**. Jest to zamknięta, wąska, szklana rurka obciążona kuleczkami śrutu. Dzięki temu areometr utrzymuje się w pionie i pływa w cieczy częściowo zanurzony. Jego ciężar jest równoważony przez siłę wyporu. Siła wyporu jest więc taka sama, niezależnie od rodzaju cieczy. Z prawa Archimiedesa wynika, że im mniejsza jest gęstość cieczy, tym większa musi być objętość wypartej cieczy. W cieczach o mniejszej gęstości areometr zanurza się głębiej, a w cieczach o większej gęstości – płycej. Wystarczy więc tylko nanieść odpowiednią skalę w górnej części areometru, by wygodnie mierzyć gęstości różnych cieczy.

Rys. B.26. Areometr służy do wyznaczania gęstości cieczy.



Rys. B.27. Zmieniając średnią gęstość łodzi podwodnej, przez napełnianie zbiorników balastowych wodą, lub opróżniając je z wody sprężonym powietrzem, można osadzić łódź na dnie, wynurzyć na powierzchnię lub utrzymywać między dnem a powierzchnią wody.

Siła wyporu działa również na ciała zanurzone w powietrzu. Jest ponad 800 razy mniejsza niż dla ciał zanurzonych w wodzie, ale mimo to umożliwia wznoszenie się lekkich ciał o dużej objętości, takich jak balony i sterowce.



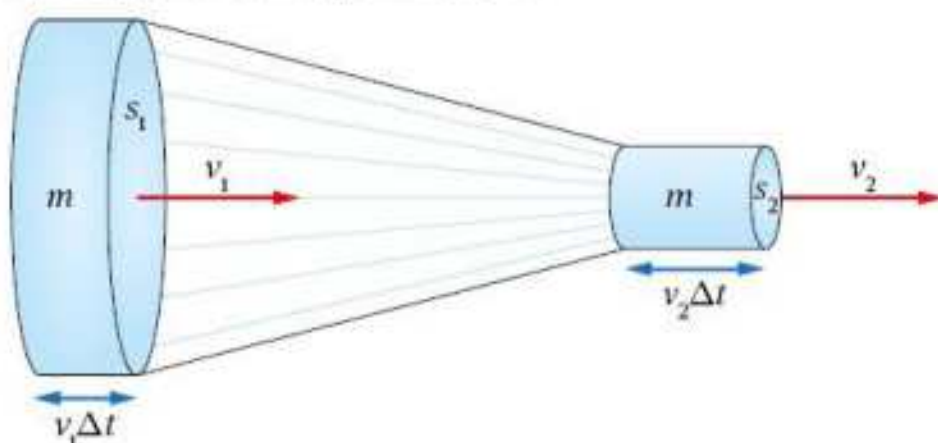
Rys. B.28. Przykłady zastosowania siły wyporu w gazach: balony i sterowiec.

Do tej pory zajmowaliśmy się statyką płynów, czyli płynami w spoczynku, a teraz zajmiemy się dynamiką płynów, czyli opisem ich ruchu. Ponieważ mogą być one bardzo skomplikowane, ograniczymy nasze rozważania do **plynu idealnego**. Jest to płyn o następujących właściwościach:

- ma pomijalną **lepkość**. Lepkością nazywamy własność płynu polegającą na występowaniu sił tarcia pomiędzy ślizgającymi się po sobie warstwami. Smoła lub miód są przykładami cieczy o dużej lepkości;
- jest nieściśliwy, to znaczy taki, że jego gęstość w całej objętości pozostaje stała. Jest to dobre przybliżenie dla cieczy, natomiast nie stosuje się dobrze do gazów.

Do zilustrowania przepływu płynu używamy linii prądu. **Linie prądu** przedstawiają drogę przebytą przez małą objętość płynu podczas przepływu. Są one w każdym punkcie styczne do wektora prędkości. Można je obserwować doświadczalnie, przepuszczając wodę nad kryształkami nadmanganianu potasu lub wprowadzając do niej proszek aluminiowy. Tory ruchu drobinek proszku lub ślady kryształków w postaci pasm zabarwionej wody przedstawiają linie prądu.

Jeśli z linii prądu utworzymy rurkę zamkniętą z obu stron powierzchniami prostopadłymi do wektorów prędkości, to przepływ płynu wystąpi tylko przez końcowe powierzchnie.



Rys. B.29. Linie prądu. Rzadko rozmieszczone linie oznaczają obszary niskiej prędkości, a linie rozmieszczone gęsto – obszary wysokiej prędkości.

Masa płynu przechodzącego przez powierzchnię S_1 w czasie Δt wynosi:

$$m_1 = \rho S_1 \cdot v_1 \Delta t,$$

gdzie $S_1 \cdot v_1 \Delta t$ stanowi objętość elementu płynu.

Analogicznie masa płynu przepływającego przez powierzchnię S_2 w czasie Δt jest równa:

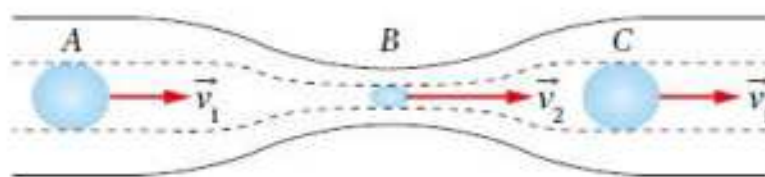
$$m_2 = \rho S_2 \cdot v_2 \Delta t.$$

Ponieważ masa m_1 płynu wchodzącego do rury musi być równa masie m_2 płynu opuszczającego rurę, otrzymujemy:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2.$$

Otrzymany związek nosi nazwę **równania ciągłości**. Wynika z niego, że tam, gdzie przekrój rurki jest mniejszy, prędkość przepływu jest większa. Linie prądu są bardziej zagęszczone w węższej części rurki.

Rozważmy przepływ cieczy przez rurkę, w której występuje przewężenie. Prędkość cieczy w przewężeniu musi być większa, zatem jeśli skupimy uwagę na wyodrębnionym elemencie cieczy przemieszczającym się z położenia A do B i dalej do C, to stwierdzamy, że od A do B element musiał przyspieszyć, a od B do C – zahamować. Jedyne siły, które mogły spowodować te zmiany prędkości, to siły parcia, wynikające z różnicy ciśnień przy przedniej i tylnej ściance rozpatrywanego elementu. Zatem ciśnienie w B musi być niższe niż ciśnienie w A i C.



Rys. B.30. Gdy płyn wpływa do węższego kanału, jego prędkość rośnie.

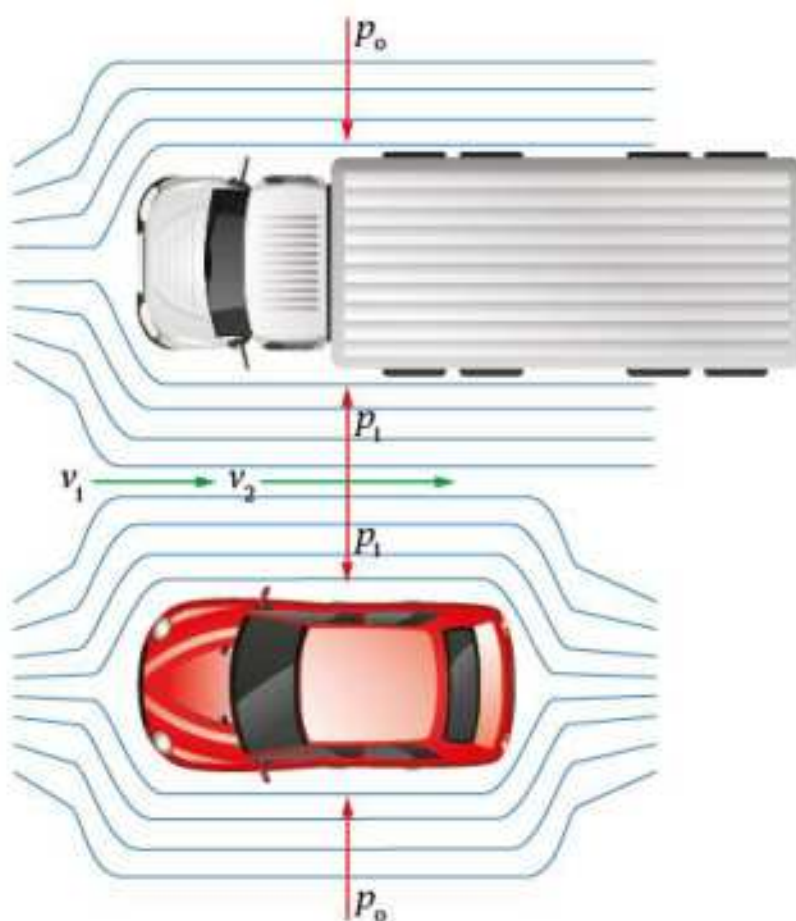
Zmiany ciśnienia wzdłuż linii prądu opisuje **równanie Bernoulliego**, które dla przepływu poziomego ma postać:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2.$$

Jest to podstawowe równanie mechaniki płynów. Wynika z niego, że gdy v_2 jest większe niż v_1 , to p_2 musi być mniejsze niż p_1 , aby równanie było spełnione. W poruszającym się płynie ciśnienie maleje, gdy wzrasta prędkość. Na przykład gdy samochód wyprzedza ciężarówkę na autostradzie, kierowcy mają wrażenie, że oba samochody się przyciągają. Duża prędkość powietrza pomiędzy samochodem a ciężarówką powoduje powstanie obszaru niższego ciśnienia pomiędzy pojazdami.

Większe ciśnienie po zewnętrznych stronach samochodów pcha je ku sobie.

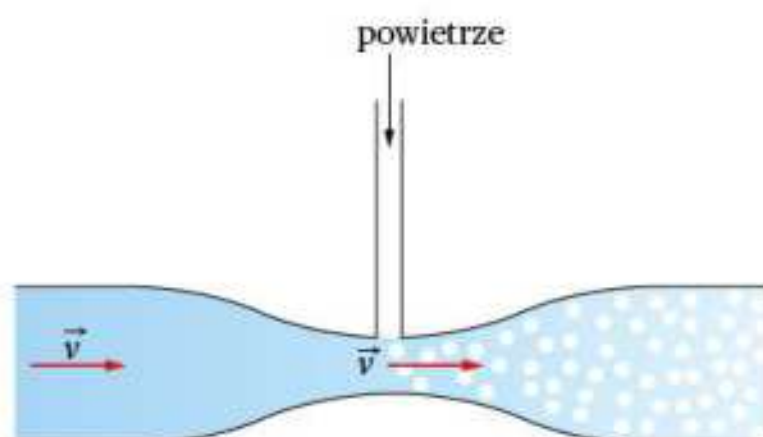
Zmniejszanie się ciśnienia w szybko poruszającym się płynie jest wykorzystywany do zasysania jednego rodzaju płynu do wnętrza drugiego. Przykładem jest pompa wodna, która pompuje wodę z akwarium do filtrów i odprowadza ją z powrotem do akwarium. Po drodze woda przepływa przez przewężenie w rurce, tak jak to pokazano na rysunku B.32.



Rys. B.31. Gdy samochód wyprzedza ciężarówkę, powietrze pomiędzy pojazdami porusza się w wąskim kanale, więc jego prędkość wzrasta (v_2 jest większe niż v_1). Ciśnienie pomiędzy nimi maleje (p_1 jest mniejsze niż p_o), przez co oba są wpychane do środka przez ciśnienie na zewnątrz.

Prędkość wody w przewężeniu jest (zgodnie z równaniem ciągłości) większa niż w rurce. Zgodnie z równaniem Bernoulliego, w poziomej rurce $p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = \text{const}$, więc gdy rośnie prędkość v , to ciśnienie p maleje i w przewężeniu jest mniejsze niż w pozostałej części rurki. Jeżeli prze-

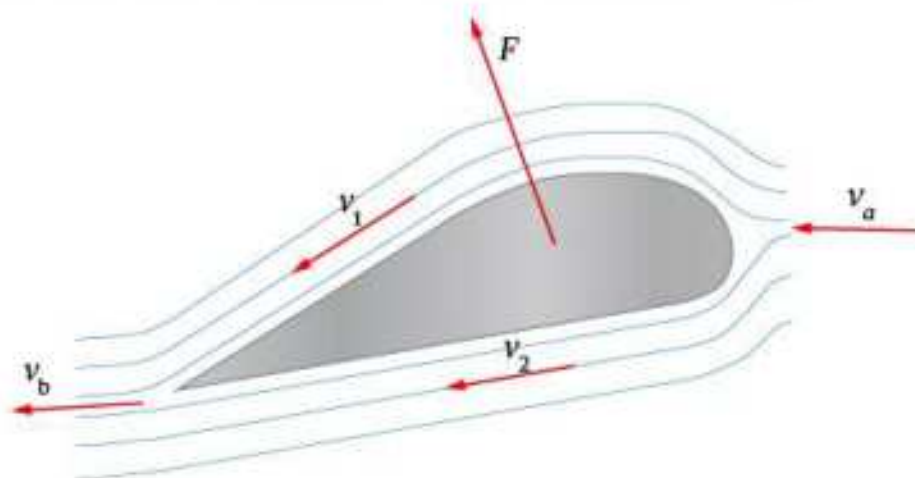
wężenie jest dostatecznie małe, to ciśnienie w przewężeniu może być niższe od ciśnienia atmosferycznego, a to oznacza, że przez otwór w przewężeniu woda nie będzie uciekać, tylko z zewnątrz będzie zasysane powietrze. W ten sposób woda będzie nie tylko filtrowana, ale jeszcze dodatkowo napowietrzana. W podobny sposób mieszany jest gaz ziemny z powietrzem w palniku gazowym.



Rys. B.32. Napowietrzanie wody w pompce wodnej.

Równanie Bernoulliego pozwala wyjaśnić występowanie **siły nośnej** działającej na skrzydło lecącego samolotu. Na rysunku B.33 pokazane są linie prądu powietrza wokół skrzydła.

Ze względu na ustawienie skrzydła, linie prądu nad tym skrzydłem są rozmieszczone gęściej niż pod nim, co oznacza, że prędkość v_1 powietrza ponad skrzydłem jest większa niż prędkość v_2 pod skrzydłem. Z równania Bernoulliego wynika, że ciśnienie nad skrzydłem jest mniejsze od ciśnienia pod skrzydłem. W związku z tym, z trzeciej zasady dynamiki Newtona wynika, że powstaje wypadkowa siła nośna F skierowana ku górze. Wektor prędkości v_a powietrza zbliżającego się do skrzydła ma kierunek poziomy, natomiast prędkość v_b powietrza za skrzydłem jest skierowana ukośnie w dół (wektor v_b ma składową pionową). Oznacza to, że skrzydło pchnęło powietrze w dół, więc w reakcji powietrze pchnęło skrzydło do góry.



Rys. B.33. Linie prądu wokół skrzydła samolotu.