

Fizyka

ZAKRES PODSTAWOWY



Zmiana MEN 2024



Oznaczono usunięte
i zmienione treści

1

Podręcznik dla **szkół ponadpodstawowych**

Adam Ogaza

Fizyka

Podręcznik dla **szkół ponadpodstawowych**

1

ZAKRES PODSTAWOWY

 **OPERON**
Edukacja jest podróżą

2023

Projekt okładki: Paweł Kwacz
Redaktor prowadzący: Jarosław Dworowski
Redakcja językowa: Monika Turęta
Redakcja graficzna i skład: Maciej Laska
Korekta techniczna: Izabela Skolmowska

Zdjęcia: Bureau international des Poids et Mesures/BIPM.org, Fabryka Pomocy Naukowych Spółka z o.o./fpnnysa.com.pl, NASA/ESA, NASA/ESA/JPL-Caltech, NASA.gov, NASA/JPL-Caltech, NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA, NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech), NASA/JPL/Cornell, NASA/Nick Risinger (Photopic Sky Survey), NASA/Robert GendlerNASA/WMAP Science Team, Grand Warszawski/Shutterstock.com, Shutterstock, Wikipedia/Alf van Beem/CC0 1.0, Wikipedia/Mirko Junge/CC BY-SA 3.0

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 w zakresie podstawowym na poziomie szkoły ponadpodstawowej, na podstawie opinii rzeczoznawców: mgr Teresy Kutajczyk, dr Józefiny Turło, dr. Jarosława Pacuły.

Etap edukacyjny: III
Typ szkoły: szkoła ponadpodstawowa
Zakres kształcenia: podstawowy
Rok dopuszczenia: 2019
Numer dopuszczenia: 1036/1/2019

© OPERON Sp. z o.o. & Adam Ogaza
Gdynia 2019

Wszelkie prawa zastrzeżone. Kopiowanie w całości lub we fragmentach bez zgody wydawcy zabronione.
N6832

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 978-83-7879-942-9

01/23/IV/S65

Spis treści

Wstęp.....	4
1. Wiadomości wstępne	
1. Podstawowe pojęcia i przedmiot badań fizyki	8
2. Wielkości fizyczne i ich jednostki	13
3. Pomiary i ich dokładność.....	19
4. Graficzna analiza danych	25
Podsumowanie przed sprawdzianem.....	30
2. Kinematyka	
1. Pojęcie ruchu.....	32
2. Ruch prostoliniowy jednostajny	37
3. Ruch prostoliniowy, jednostajnie przyspieszony	45
4. Ruch prostoliniowy, jednostajnie opóźniony	50
5. Ruch jednostajny po okręgu.....	55
Podsumowanie przed sprawdzianem.....	58
3. Dynamika	
1. Pojęcie siły	60
2. Bezwładność. Pierwsza zasada dynamiki	65
3. Druga zasada dynamiki.....	69
4. Trzecia zasada dynamiki.....	72
5. Inercjalne i nieinercjalne układy odniesienia. Siły bezwładności	75
6. Siły w ruchu po okręgu.....	80
7. Siły oporu. Tarcie.....	84
8. Praca i moc	92
9. Energia kinetyczna	98
10. Energia potencjalna	104
11. Zasada zachowania energii	110
Podsumowanie przed sprawdzianem.....	116
4. Grawitacja i elementy astronomii	
1. Prawo powszechnego ciążenia	118
2. Ruch ciał niebieskich	123
3. Przeciążenie i nieważkość	128
4. Układ Słoneczny.....	131
5. Świat galaktyk	136
6. Ewolucja Wszechświata.....	140
Podsumowanie przed sprawdzianem.....	147
Odpowiedzi do zadań	148
Indeks.....	149

Wstęp

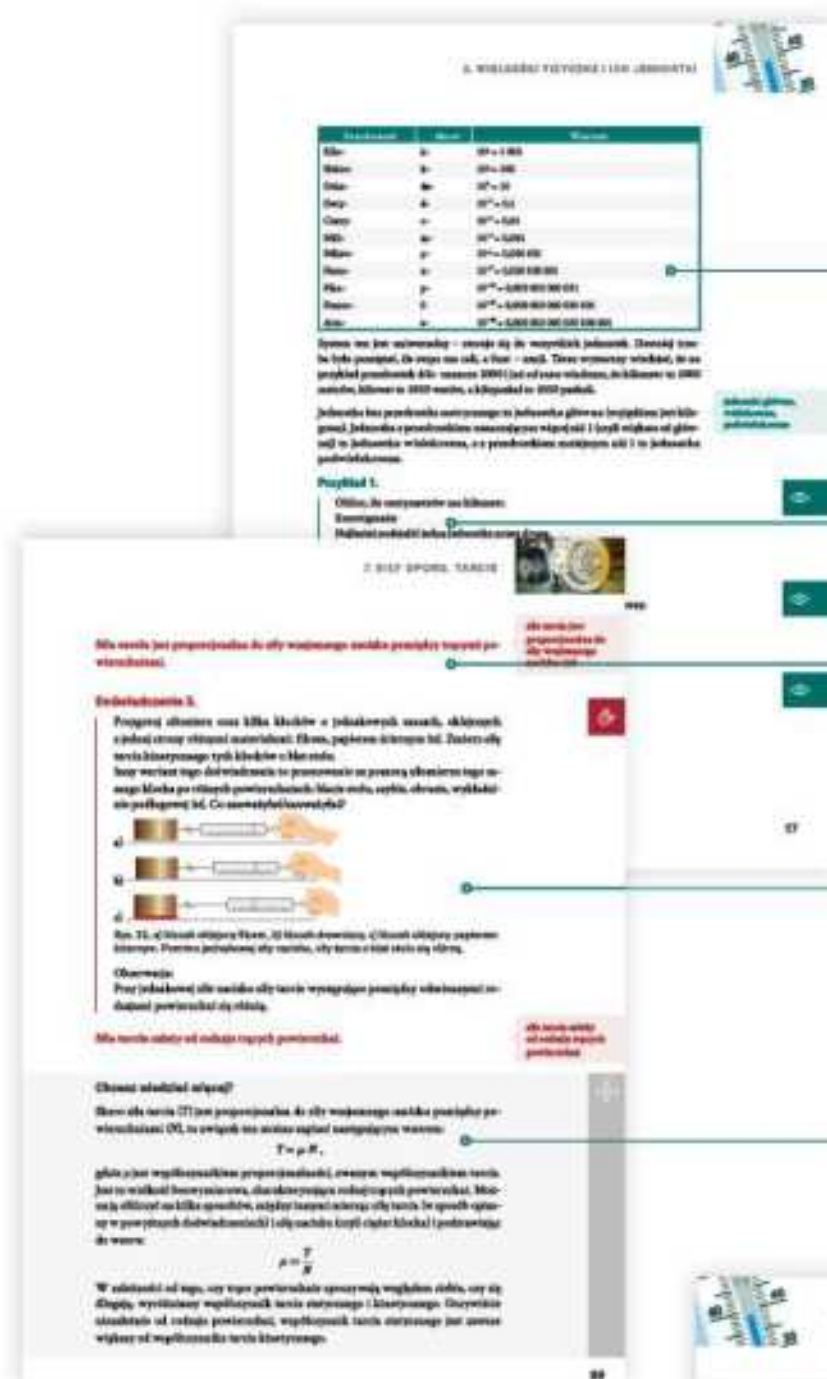
Jak jest zbudowany nasz podręcznik

Podręcznik pozwala na pełne wykorzystanie nowoczesnych metod dydaktycznych w nauczaniu fizyki. Zgodnie z założeniami reformy programowej uczniowie liceów i techników będą się uczyć tego przedmiotu w zakresie podstawowym w klasach:

- pierwszej w wymiarze 1 godziny tygodniowo
- drugiej w wymiarze 1 godziny tygodniowo
- trzeciej w wymiarze 2 godzin tygodniowo.

Zanim zaczniecie korzystać z podręcznika, zapoznajcie się z jego budową i przyjrzyjcie się wszystkim jego elementom. Zostały one skonstruowane tak, by ułatwić wam naukę i pomóc w błyskawicznym znalezieniu potrzebnych informacji.





Tabele pomogą wam usystematyzować wiedzę.

Śledźcie uważnie **rozwiązania przykładów**, a łatwiej zrozumiecie omawiane zagadnienia.

Definicje, prawa i zasady wyróżniono kolorową czcionką. Dzięki temu od razu je zauważycie i szybko znajdziecie podczas powtórek.

Doświadczenia to blok zadań, w których działacie praktycznie. Umożliwi to wam zrozumienie zagadnień fizycznych poprzez działanie. Przekonacie się, że nauka fizyki jest ciekawa.

W oknach **Chcesz wiedzieć więcej?** znajdziecie dodatkowe treści dla osób interesujących się danym tematem.

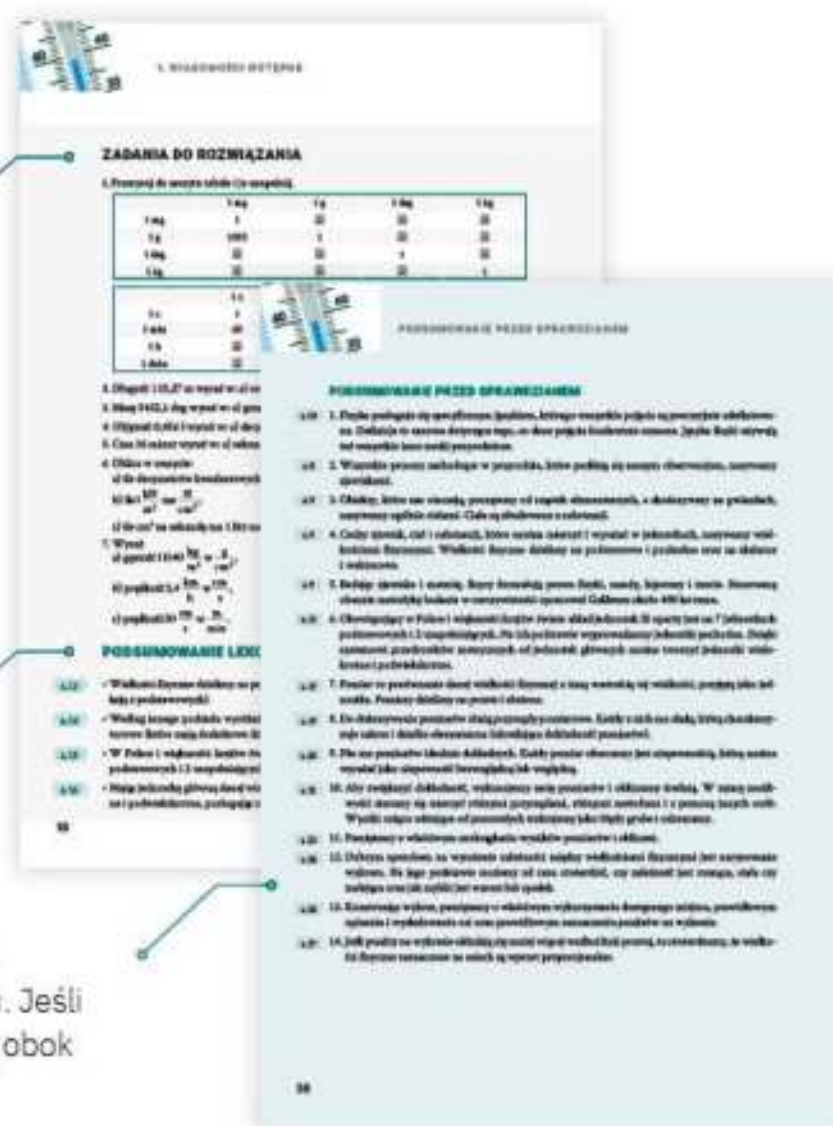
Zadania do rozwiązania przećwiczycie w toku lekcji lub wykorzystacie do nauki w domu lub przed kartkówką czy sprawdzianem.

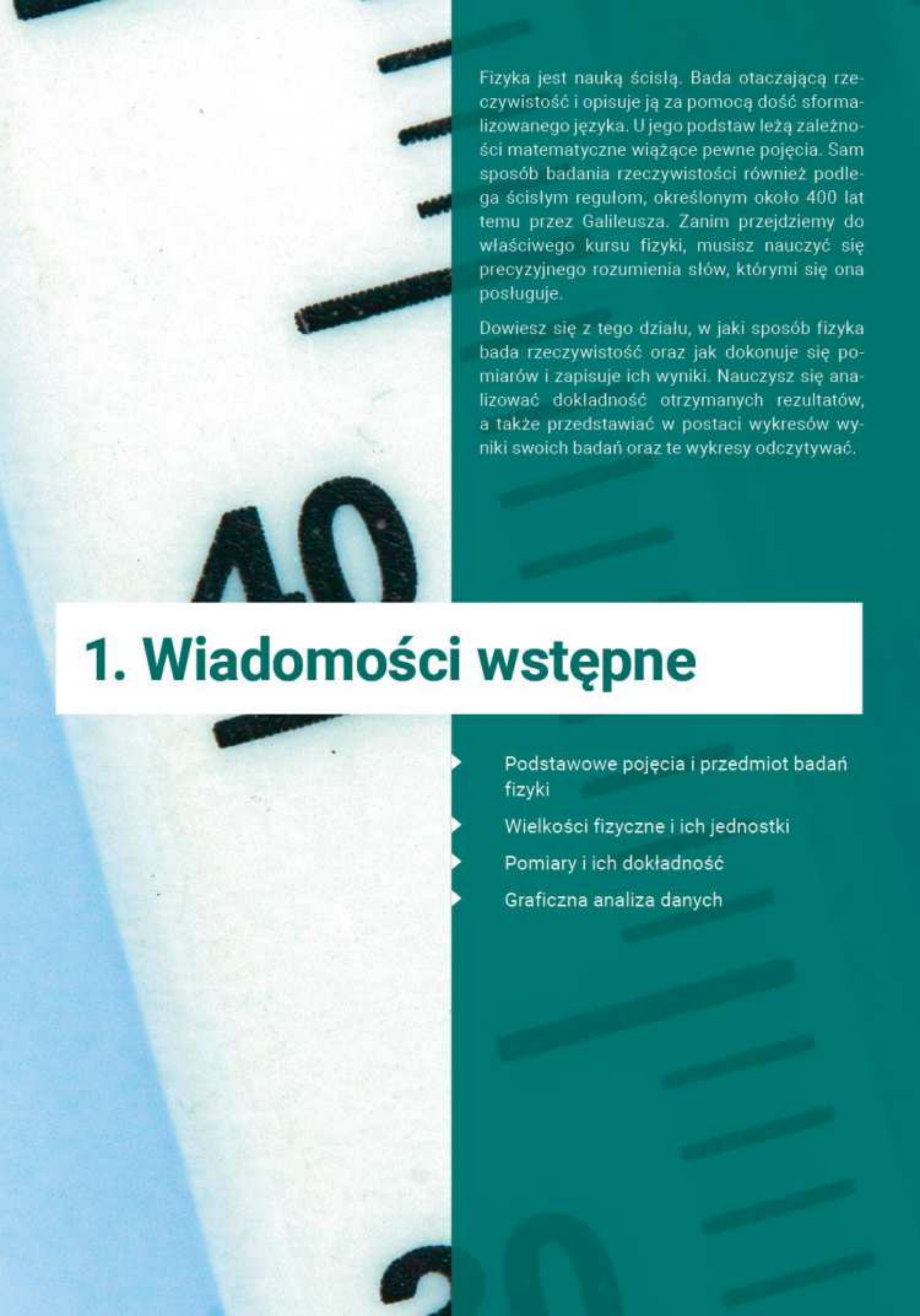
Zadania o podwyższonym stopniu trudności oznaczono gwiazdką: 4*.

Uwaga: odpowiedzi do zadań wymagających pisemnego rozwiązania zapiszcie w zeszycie.

Podsumowanie lekcji to esencja najważniejszych treści do zapamiętania. Jeśli ich nie pamiętacie, wróćcie na stronę wskazaną obok. Znajdziecie tam na marginesie odpowiednie hasło, a w treści lekcji – jego omówienie.

Podsumowanie przed sprawdzaniem zawiera najważniejsze treści do zapamiętania z rozdziału. Jeśli ich nie pamiętacie, wróćcie na stronę wskazaną obok i poszukajcie hasła na marginesie.





Fizyka jest nauką ścisłą. Bada otaczającą rzeczywistość i opisuje ją za pomocą dość sformalizowanego języka. U jego podstaw leżą zależności matematyczne wiążące pewne pojęcia. Sam sposób badania rzeczywistości również podlega ścisłym regułom, określonym około 400 lat temu przez Galileusza. Zanim przejdziemy do właściwego kursu fizyki, musisz nauczyć się precyzyjnego rozumienia słów, którymi się ona posługuje.

Dowiesz się z tego działu, w jaki sposób fizyka bada rzeczywistość oraz jak dokonuje się pomiarów i zapisuje ich wyniki. Nauczysz się analizować dokładność otrzymanych rezultatów, a także przedstawiać w postaci wykresów wyniki swoich badań oraz te wykresy odczytywać.

1. Wiadomości wstępne

- ▶ Podstawowe pojęcia i przedmiot badań fizyki
- ▶ Wielkości fizyczne i ich jednostki
- ▶ Pomiary i ich dokładność
- ▶ Graficzna analiza danych



1. Podstawowe pojęcia i przedmiot badań fizyki

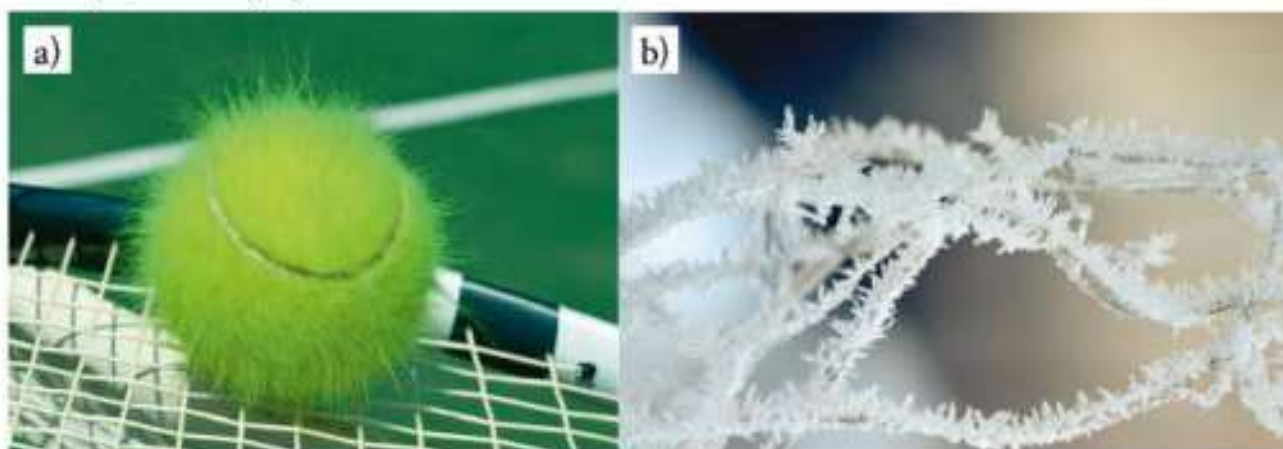
NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie sens podstawowych pojęć z metodologii nauki, takich jak: *zjawisko fizyczne, wielkość fizyczna, ciało, substancja, definicja, prawo fizyki, zasada i teoria*;
- nauczysz się dostrzegać zjawiska fizyczne w każdej dziedzinie życia;
- dowiesz się, w jaki sposób fizycy badają rzeczywistość i odkrywają nowe prawa fizyki.

Przypomnienie podstawowych pojęć z teorii nauki

zjawisko fizyczne

Fizyka jest podstawową nauką przyrodniczą, badającą otaczającą nas materię i zjawiska, jakim ta materia podlega. **Zjawiskiem fizycznym** nazywamy każdą zmianę w otoczeniu, którą możemy obserwować i badać, wszystko to, co się „dzieje” w przyrodzie. Do zjawisk fizycznych zaliczymy więc między innymi wszelkiego rodzaju ruchy, pływanie, tarcie, przyciąganie ziemskie, przepływ prądu elektrycznego, rozchodzenie się dźwięku, promieniowanie, świecenie. Przedmiotem dociekań fizyków nie są natomiast zjawiska społeczne (na przykład wojny), ekonomiczne (na przykład inflacja) ani artystyczne.



Rys. 1. Przykładowe zjawiska fizyczne: a) elektryzowanie się piłeczki tenisowej, b) pojawianie się szronu na gałęziach.

Jeśli się dobrze zastanowić, to w każdej sekundzie naszego życia podlegamy niezliczonym zjawiskom fizycznym. Siedząc na krześle i trzymając w ręce długopis, cały czas wykorzystujemy zjawisko grawitacji i tarcia. Widzimy, gdyż światło, wpadając do naszego oka, załamuje się odpowiednio w soczewce ocznej (zjawisko załamania), a następnie w siatkówce zamieniane jest na impulsy nerwowe (szereg zjawisk, których efektem jest przekształcenie fali elektromagnetycznej w prąd elektryczny). Impulsy te, docierając do neuronów (zjawisko przepływu prądu elektrycznego), wywołują dalsze zjawiska fizyczne, w wyniku czego nasz mózg może otrzymać obraz zinterpretować i zapamiętać. Podobnie jest ze słuchem. Dzięki istnieniu



odpowiednich zjawisk fizycznych możemy również oddychać, pocić się, odczuwać ból, serce pompuje krew, a ręce i nogi – zginają się.

Wszystkie twory materialne, które nas otaczają, nazywamy ogólnie **ciałami**. Tworzywo, z których wykonane jest ciało, to **substancja**. Przykładami ciał są więc na przykład elektron, cząsteczka wody, drobina kurzu, krzesło, Ziemia. Przykładami substancji są: woda (nie mówimy teraz o jednej cząsteczce!), żelazo, tlen, plastelina itp.

Materia podlegająca zjawiskom ujawnia szereg cech, które możemy przedstawiać w sposób ilościowy. Są to tzw. **wielkości fizyczne**, czyli wszelkie te cechy ciał, substancji lub zjawisk, które można mierzyć i wyrazić w odpowiednich jednostkach. Do wielkości fizycznych zaliczymy więc między innymi: długość, masę, czas, natężenie prądu elektrycznego, prędkość, przyspieszenie, moc, napięcie, opór elektryczny, natężenie dźwięku, natężenie światła itd.

Fizyka opisuje świat, posługując się precyzyjnym językiem, w którym wszystkie pojęcia są ściśle zdefiniowane. **Definicja** to umowa dotycząca tego, co rozumiemy pod danym pojęciem. Słowo to znasz już zapewne z matematyki. Jeśli powiemy *kwadrat to czworokąt, który ma wszystkie boki równe i wszystkie kąty proste*, to właśnie wypowiedzieliśmy definicję kwadratu i od tej pory wiadomo, co to słowo znaczy. Podobnie w fizyce: zdanie *prędkość to stosunek drogi do czasu, w którym została ona przebyta* stanowi definicję prędkości. Definicja może być wyrażona zarówno słownie, jak i za pomocą wzoru, na przykład $v = \frac{s}{t}$.

Badając zjawiska, fizycy formułują **prawa fizyki**, czyli zależności pomiędzy wielkościami fizycznymi. Należy pamiętać, że praw fizyki się nie wymyśla, tylko odkrywa. Istnieją one obiektywnie i niezależnie od naszej świadomości. Znając je, możemy wykorzystać zjawiska fizyczne do służenia nam (na przykład do konstrukcji silnika, dźwigni albo elektrowni). Nieznajomość praw fizyki pozbawia nas takiej możliwości.

Podobnie jak definicje, prawa fizyki mogą być wyrażone słownie lub za pomocą wzorów. Różnica polega na ich interpretacji. W definicji objaśniamy znaczenie nowego pojęcia. W prawie fizyki stwierdzamy, jak znane nam już wcześniej wielkości fizyczne są ze sobą związane.

Najważniejsze prawa, mające fundamentalne znaczenie w całej fizyce, nazywamy **zasadami**. Spójny system definicji, praw i zasad opisujących dane zagadnienie tworzy **teorię**.

Zjawiska wokół nas

Badaniem otaczającej nas materii zajmuje się wiele nauk przyrodniczych: chemia, biologia, medycyna, geologia, astronomia i inne. Każda z nich interesuje się szczegółowo pewnym wycinkiem rzeczywistości: chemia – substancjami, biologia – organizmami żywymi, medycyna – ciałem ludzkim, geologia – Ziemią, astronomia – obiektami kosmicznymi. Wszystkie wymienione formy materii podlegają ogólnym prawom fizyki, stąd postawiona na początku teza, że fizyka jest nauką podstawową. Dostarcza ona

ciało

substancja

wielkość
fizyczna

definicja

prawo fizyki

zasada

teoria



język fizyki

innym naukom przyrodniczym języka do opisu rzeczywistości, tak jak matematyka dostarcza fizyce narzędzi do formułowania wzorów.

Bez fizyki chemicy nie wiedzieliby, dlaczego substancje mają takie, a nie inne właściwości. Są one bowiem zbudowane z atomów, a te są przedmiotem badań fizyki. Biolodzy nie byliby w stanie wytłumaczyć, jakim sposobem woda dociera z korzeni do liści, na czym polega oddychanie, co tak naprawdę dzieje się w żywych komórkach. Trudno dziś wyobrazić sobie medycynę bez promieni rentgenowskich, USG, tomografii komputerowej oraz wielu innych narzędzi diagnostycznych i terapeutycznych stworzonych przez fizykę. Geolodzy nie potrafiliby wyjaśnić, dlaczego wybuchają wulkany, skąd się biorą trzęsienia ziemi, jak powstały różne rodzaje skał. Z kolei astronomowie nie wiedzieliby, dlaczego planety krążą wokół Słońca, dlaczego gwiazdy świecą, a komety rozwijają w pobliżu Słońca efektowne ogony. Wszystkie te zjawiska można wytłumaczyć, opierając się na podstawowych prawach sformułowanych przez fizykę. Dostrzeganie i wyjaśnianie tych zjawisk to kluczowa umiejętność, jaką powinienes nabyć w trakcie nauki fizyki.

Metoda naukowa Galileusza

Fizyka jest nauką doświadczalną. Swoją mądrość czerpie ze starannie zaplanowanych i przeprowadzonych eksperymentów i pomiarów. Nie zawsze to było takie oczywiste. W starożytnej Grecji, kolebce dociekań naukowych, fizyka nie występowała jako oddzielna dyscyplina naukowa, lecz była integralną częścią filozofii. Część filozofów skłaniała się ku opieraniu swych tez na wynikach obserwacji, lecz byli też tacy, którzy twierdzili, że zmysły kłamią, a prawda naukowa znajduje się w świecie idei. Uważali, że można ją poznać na drodze dedukcji opartej na założeniach, które wydawały się tak oczywiste, że nie podlegały żadnej dyskusji. Wyniki swych rozmyślań przekazywali następnie swoim uczniom jako teorie, które były dalej rozpowszechniane bez żadnej weryfikacji. Nauka czasów starożytnych i średniowiecza była pełna dogmatów i przesądów, a jej tezy często rozmijały się z rzeczywistością.



Rys. 2. Galileusz (1564–1642), prekursor współczesnej fizyki i wybitny astronom. Sformułował zasadę bezwładności. Wykazał, że wszystkie ciała spadają na Ziemię z jednakowym przyspieszeniem, niezależnie od ich masy. Odkrył izochronizm wahadła, czyli niezależność okresu drgań wahadła od jego masy i wielkości początkowego wychylenia z położenia równowagi. Za pomocą skonstruowanej przez siebie lunety odkrył góry na Księżycu, fazy Wenus, pierścienie Saturna i księżyce Jowisza (zwane odtąd „galileuszowymi”). Zaobserwował, że Droga Mleczna jest skupiskiem niezliczonej ilości gwiazd. Jako pierwszy twierdził, że naturalnym językiem fizyki jest matematyka. Wraz z Francisem Baconem (wymawiaj: Fransi-sem Bejkonem) sformułował nowoczesną metodologię badań naukowych, opartą na uogólnianych wynikach wielu doświadczeń.



Człowiekiem, który stworzył podwaliny współczesnej fizyki i wskazał właściwe metody postępowania w procesie dochodzenia do prawdy, był włoski uczony **Galileo Galilei**, zwany też w Polsce **Galileuszem** (1564–1642). Dokonał on wielu fundamentalnych odkryć w fizyce i astronomii. Jako pierwszy zastosował przemysłane eksperymenty do weryfikowania hipotez. Jest współautorem metody naukowej, stosowanej do dzisiaj we wszystkich laboratoriach świata. Jej ideę można przedstawić w postaci diagramu na rysunku 3.

metoda naukowa
Galileusza i Bacona



Rys. 3. Metoda naukowa Galileusza i Bacona.

Podstawą każdego odkrycia jest zaobserwowanie jakiegoś nowego zjawiska lub rozpoznanie problemu. Próbując wyjaśnić przebieg tego zjawiska, stawiamy hipotezy. Z każdej hipotezy wynikają określone skutki – przewidywania, jak badany obiekt zachowa się w określonych warunkach. Według Galileusza jest tylko jeden skuteczny sposób, by się przekonać, czy hipoteza jest prawdziwa: przeprowadzić eksperyment. Jeśli wynik eksperymentu jest negatywny, musimy hipotezę odrzucić i postawić nową. Jeśli wielokrotnie powtarzane eksperymenty w różnych warunkach, z użyciem różnych przyrządów, w różnych laboratoriach dają wyniki pozytywne, to upoważnia nas to do sformułowania reguły.

Można zadać pytanie, ile udanych eksperymentów trzeba przeprowadzić, aby się upewnić, że dana teoria jest prawdziwa. Otóż nie ma takiej liczby. Za to wystarczy jeden wynik negatywny, by tę teorię obalić. Historia zna przypadki teorii, które były



pozytywnie weryfikowane przez setki lat we wszystkich laboratoriach świata i wydawały się niepodważalne. Rozwój techniki, dokonanie niespodziewanych odkryć i przeprowadzenie eksperymentów w nowych okolicznościach, które dawały zaskakujące rezultaty, zmuszały nieraz świat nauki do uznania, że dotychczas ugruntowane teorie są błędne lub przynajmniej mają ograniczony zakres stosowalności. Właśnie w ten sposób między innymi narodziły się działy fizyki współczesnej: teoria względności i mechanika kwantowa.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Każde z poniższych pojęć dobierz do jednej z czterech kategorii: ciało, substancja, zjawisko, wielkość fizyczna. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

kula śnieżna	powietrze	dźwięk	uran (pierwiastek)	przyspieszenie
topnienie	prędkość	głośność	proton	częstotliwość
tęcza	ruch	rower	Uran (planeta)	Słońce
burza	śnieg	promieniotwórczość	grawitacja	lód

2. Podaj przykład definicji wyrażonej słownie i wzorem oraz prawa fizyki wyrażonego słownie i wzorem. Wyjaśnij na tym przykładzie, na czym polega różnica między definicją i prawem fizyki.

3. Wymień jak najwięcej zjawisk, praw fizyki i technologii, które musiały zostać kiedyś odkryte, aby możliwe stało się skonstruowanie współczesnego smartfona.

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 8

- Zjawisko fizyczne to każda zmiana w otoczeniu, którą możemy zaobserwować.

s. 9

- Wielkość fizyczna to każda cecha zjawiska, ciała lub substancji, którą można przedstawić ilościowo, tzn. zmierzyć i wyrazić w jednostkach.

s. 9

- Ciało to dowolny obiekt materialny badany przez fizykę.

s. 9

- Substancja to tworzywo, z którego wykonane jest ciało.

s. 9

- Definicja to umowa dotycząca tego, co znaczy dane słowo.

s. 9

- Prawo fizyki to zależność między wielkościami fizycznymi.

s. 9

- Zasada to fundamentalne prawo mające zastosowania w wielu dziedzinach fizyki.

s. 9

- Teoria to spójny system definicji, praw i zasad opisujących dane zagadnienie.

s. 10

- Wszystkie nauki przyrodnicze, badające określony wycinek rzeczywistości, posługują się językiem fizyki.

s. 11

- Stosowaną do dzisiaj metodę badań naukowych stworzył Galileusz w XVII wieku. Zakłada ona, że zanim sformulujemy prawo fizyki, musimy przeprowadzić szereg eksperymentów i odrzucić wszystkie błędne hipotezy.



2. Wielkości fizyczne i ich jednostki

NA TEJ LEKCJI

- usystematyzujesz swoją wiedzę dotyczącą wielkości fizycznych i ich rodzajów;
- poznasz szczegóły układu SI;
- przećwiczysz przeliczanie jednostek oraz tworzenie ich definicji słownych na podstawie wzoru.

Wielkości fizyczne

Do ilościowego opisu zjawisk i właściwości materii służą **wielkości fizyczne**. Są to cechy ciał i zjawisk, które można w jakikolwiek sposób mierzyć i wyrażać w odpowiednich jednostkach. Każda wielkość fizyczna ma swój symbol, którego używamy we wzorach. Wszystkich wielkości fizycznych jest bardzo dużo – znacznie więcej niż dużych i małych liter alfabetu. Dlatego często się zdarza, że różne wielkości fizyczne oznaczamy tym samym symbolem. Często posługujemy się też alfabetem greckim. Załączona tabelka przedstawia wygląd greckich liter oraz ich nazwy. Warto podkreślić, że w zasadzie wielkości fizyczne możemy oznaczać, jak chcemy – prawa fizyki nie zależą od kształtu liter, za pomocą których je zapisujemy. Niemniej stosowanie ogólnie przyjętych oznaczeń pozwala łatwiej kojarzyć wzory oraz powoduje, że są one łatwiejsze do zrozumienia dla innych.

Tab. 1. Litery greckie.

$A \alpha$	Alfa	$I \iota$	Jota	$P \rho$	Rho
$B \beta$	Beta	$K \kappa$	Kappa	$\Sigma \sigma$	Sigma
$\Gamma \gamma$	Gamma	$\Lambda \lambda$	Lambda	$T \tau$	Tau
$\Delta \delta$	Delta	$M \mu$	Mi	$Y \upsilon$	Ypsilon
$E \varepsilon$	Epsilon	$N \nu$	Ni	$\Phi \phi$	Fi
$Z \zeta$	Zeta	$\Xi \xi$	Ksi	$X \chi$	Chi
$H \eta$	Eta	$O \omicron$	Omikron	$\Psi \psi$	Psi
$\Theta \theta$	Theta	$\Pi \pi$	Pi	$\Omega \omega$	Omega

Wielkości fizyczne dzielimy na **podstawowe** i **pochodne**. **Wielkości podstawowych** w zasadzie nie definiujemy. Któż na przykład potrafiłby zdefiniować czas? Zakładamy, że każdy rozumie to pojęcie. Próba napisania definicji czasu wymagałaby użycia innych pojęć, które znowu trzeba by zdefiniować i tak utworzylibyśmy błędne koło. Taktujemy więc wielkości podstawowe jako zrozumiałe same przez się, natomiast musimy oczywiście określić sposób ich pomiaru, czyli zdefiniować jednostkę.

podstawowe
i pochodne
wielkości fizyczne



Wielkości pochodne zależą od wielkości podstawowych, a zależność tę można zdefiniować w sposób słowny lub za pomocą wzorów. Przykładem wielkości pochodnej jest prędkość, która zależy od dwóch wielkości podstawowych: długości i czasu. Inne przykłady wielkości pochodnych przedstawia tabela.

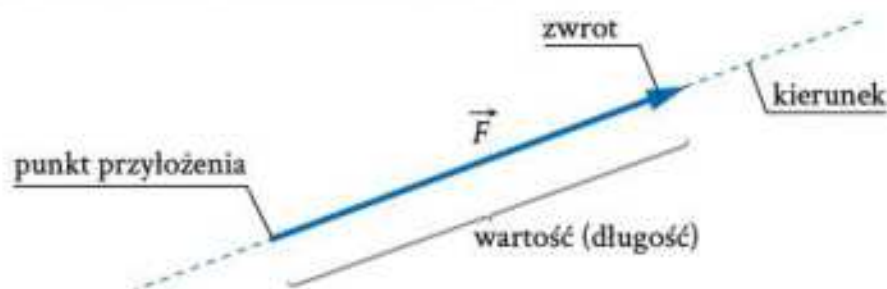
Tab. 2. Przykłady wielkości pochodnych.

Nazwa	Wzór defini- cyjny	Definicja słowna
Ciśnienie	$p = \frac{F}{S}$	Ciśnienie jest to stosunek siły działającej na daną powierzchnię do wielkości tej powierzchni.
Gęstość	$\rho = \frac{m}{V}$	Gęstość jest to stosunek masy ciała do jego objętości.
Przyspieszenie	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	Przyspieszenie jest to stosunek przyrostu prędkości do czasu, w którym ten przyrost nastąpił.

skalarne
i wektorowe
wielkości fizyczne

Niezależnie od tego, wielkości fizyczne można podzielić na **skalarne** i **wektorowe**. **Wielkości skalarne** mają tylko wartość, a do ich określenia wystarczy jedna liczba. Przykładami wielkości skalarnych są masa, czas i temperatura.

Gdy mówimy na przykład o sile, nie wystarczy podanie samej liczby. Istotne jest także, czy siła, o której mówimy działa w prawą stronę, w lewą czy na przykład do góry. Siła jest przykładem **wielkości wektorowej**.



Rys. 4. Ilustracja wektora (tu siły).

Wektory zapisujemy za pomocą strzałek nad symbolem danej wielkości i przypisujemy im następujące cechy:

- Długość albo wartość – w przypadku wektora położenia lub przemieszczenia (o którym dowiesz się później) jest to długość w sensie dosłownym (przedstawiona w odpowiedniej skali). Wektory innych wielkości fizycznych mają wartości wyrażone w jednostkach, w których się daną wielkość mierzy. Na przykład jednostką długości (wartości) wektora siły jest 1 niuton.
- Kierunek – określa go linia prosta, która ten wektor zawiera. Kierunek może być na przykład pionowy, poziomy, ukośny.
- Zwrot – jest on określony przez strzałkę kończącą wektor. W ramach każdego kierunku możliwe są dwa zwroty, na przykład w lewo i w prawo, do góry i na dół, do przodu i do tyłu itd.
- Punkt przyłożenia – jest to miejsce, w którym zaczyna się wektor. W niektórych sytuacjach punkt przyłożenia wektora jest istotny, a w innych nie. Wektor, którego punkt przyłożenia nie ma znaczenia, nazywamy wektorem swobodnym. Wektory



swobodnie możemy przesuwać równolegle na płaszczyźnie i w przestrzeni, byle tylko zachować ich pozostałe cechy, czyli wartość, kierunek i zwrot.

We wzorach symbole wielkości wektorowych opatrujemy strzałkami u góry. Jeśli pominiemy strzałkę, to znaczy, że interesuje nas tylko wartość danego wektora, a nie jego kierunek i zwrot. Długość wektora możemy też zapisać, umieszczając jego symbol w nawiasach wartości bezwzględnej, na przykład: $F = |\vec{F}|$.

Jednostki

Każda wielkość fizyczna ma swoją jednostkę. W dawnych czasach potrafiono mierzyć tylko najprostsze wielkości fizyczne: długość, masę, czas, kąt, pole i objętość. W większości przypadków konieczność dokonywania pomiarów pojawiała się podczas transakcji handlowych. Z braku precyzyjnych przyrządów na początku do pomiarów używano części ciała ludzkiego. Stąd wywodzą się takie jednostki, jak stopa, łokieć i cal (długość kciuka). Pomiaru takie były niedokładne i subiektywne, a wzajemne przeliczniki pomiędzy jednostkami – skomplikowane. W czasach rewolucji francuskiej postanowiono zerwać ze starym systemem i wprowadzono układ oparty na zupełnie nowych jednostkach: metrze i kilogramie. System ten, zwany metrycznym, ewoluował przez kolejne dziesięciolecia i w miarę dokonywanych odkryć naukowych uzupełniany był o jednostki nowo odkrytych wielkości fizycznych. Obecnie, pod nazwą **układu SI** (skrót od francuskiej nazwy *Système international d'unités*), stosowany jest w większości krajów świata.

układ jednostek SI

Układ SI oparty jest na 7 jednostkach podstawowych i 2 uzupełniających. **Jednostki podstawowe** mają swoje niezależne definicje, oparte na fundamentalnych stałych fizycznych. Pierwotne wzorce (na przykład przedstawionego na rys. 5. kilograma) zastąpiono opisami sposobów pomiaru tych wielkości, które można w uniwersalny sposób powtórzyć w każdym laboratorium świata. Definicje te możesz poznać na stronie internetowej Głównego Urzędu Miar (www.gum.gov.pl).

Rys. 5. Obowiązujący do 20 maja 2019 roku wzorzec 1 kilograma przechowywany w Międzynarodowym Biurze Miar i Wag w Sevres pod Paryżem. Ma on postać walca o średnicy 39 mm i wysokości 39 mm wykonanego ze stopu platyny i irydu. Przechowywany jest w próżni, aby zapobiec ewentualnym reakcjom utlenienia.



Tab. 3. Jednostki podstawowe układu SI.

Lp.	Wielkość fizyczna	Symbol wielkości	Jednostka	Symbol
1	Długość	l	metr	m
2	Masa	m	kilogram	kg
3	Czas	t	sekunda	s
4	Natężenie prądu	I	amper	A
5	Temperatura	T	kelwin	K
6	Światłość	I	kandela	cd
7	Liczność materii	n	mol	mol



Jednostkami uzupełniającymi są radian (jednostka kąta płaskiego) oraz steradian (jednostka kąta bryłowego).

Bazując na jednostkach podstawowych, można utworzyć jednostki pochodne dla wszystkich pozostałych wielkości fizycznych. Definicje tych jednostek wynikają wprost ze wzorów łączących poszczególne wielkości fizyczne. Niektóre z tych jednostek zawierają w nazwie działania matematyczne wynikające ze wzorów (na przykład metr na sekundę), inne mają własne nazwy, często pochodzące od nazwisk wielkich fizyków (na przykład niuton i paskal).

Tab. 4. Definicje przykładowych jednostek pochodnych.

Wielkość fizyczna	Wzór definicyjny wielkości fizycznej	Jednostka	Związek z jednostkami podstawowymi	Definicja słowna
Prędkość	$v = \frac{s}{t}$	metr na sekundę	$1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Jeden metr na sekundę jest to prędkość w ruchu jednostajnym, w którym w ciągu każdej sekundy ciało przebywa odległość 1 metra.
Przyspieszenie	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	metr na sekundę do kwadratu	$1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Jeden metr na sekundę do kwadratu jest to przyspieszenie w ruchu, w którym w ciągu każdej sekundy prędkość wzrasta o 1 metr na sekundę.
Siła	$F = m \cdot a$	niuton	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Jeden niuton jest to siła, która masie 1 kilograma nadaje przyspieszenie $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.
Ciśnienie	$p = \frac{F}{S}$	paskal	$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$	Jeden paskal jest to ciśnienie, jakie siła 1 niutona wywiera na powierzchnię 1 m^2 .
Praca	$W = F \cdot s$	dżul	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$	Jeden dżul jest to praca, jaką siła 1 niutona wykonuje na drodze 1 metra.

Jednostka *metr* jest wygodna do określenia na przykład długości pokoju. Staje się mniej wygodna, jeśli chcemy wyrazić odległość do innego miasta albo grubość kartki papieru. Aby przy podawaniu wyników pomiarów unikać liczb bardzo dużych lub bardzo małych, wprowadzono **system przedrostków metrycznych**.

Tab. 5. Przedrostki metryczne układu SI.

Przedrostek	Skrót	Wartość
Eksa-	E-	$10^{18} = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000$
Peta-	P-	$10^{15} = 1\,000\,000\,000\,000\,000$
Tera-	T-	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$
Giga-	G-	$10^9 = 1\,000\,000\,000$
Mega-	M-	$10^6 = 1\,000\,000$

system
przedrostków
metrycznych



Przedrostek	Skrót	Wartość
Kilo-	k-	$10^3 = 1\,000$
Hekto-	h-	$10^2 = 100$
Deka-	da-	$10^1 = 10$
Decy-	d-	$10^{-1} = 0,1$
Centy-	c-	$10^{-2} = 0,01$
Mili-	m-	$10^{-3} = 0,001$
Mikro-	μ -	$10^{-6} = 0,000\,001$
Nano-	n-	$10^{-9} = 0,000\,000\,001$
Piko-	p-	$10^{-12} = 0,000\,000\,000\,001$
Femto-	f-	$10^{-15} = 0,000\,000\,000\,000\,001$
Atto-	a-	$10^{-18} = 0,000\,000\,000\,000\,000\,001$

System ten jest uniwersalny – stosuje się do wszystkich jednostek. Dawniej trzeba było pamiętać, ile stopa ma cali, a funt – uncji. Teraz wystarczy wiedzieć, że na przykład przedrostek *kilo-* oznacza 1000 i już od razu wiadomo, że kilometr to 1000 metrów, kilowat to 1000 watów, a kilopaskal to 1000 paskali.

Jednostka bez przedrostka metrycznego to **jednostka główna** (wyjątkiem jest kilogram). Jednostka z przedrostkiem oznaczającym więcej niż 1 (czyli większa od głównej) to **jednostka wielokrotna**, a z przedrostkiem mniejszym niż 1 to **jednostka podwielokrotna**.

jednostki główne,
wielokrotne,
podwielokrotne

Przykład 1.

Oblicz, ile centymetrów ma kilometr.

Rozwiązanie:

Najlepiej podzielić jedną jednostkę przez drugą.

$$\frac{1\text{ km}}{1\text{ cm}} = \frac{10^3\text{ m}}{10^{-2}\text{ m}} = 10^5, \text{ więc } 1\text{ km} = 10^5\text{ cm} = 100\,000\text{ cm}$$

Przykład 2.

Oblicz, ile milimetrów sześciennych ma jeden centymetr sześcienny.

Rozwiązanie:

Podnosimy do trzeciej potęgi zarówno liczbę, jak i jednostkę.

$$1\text{ cm}^3 = (10\text{ mm})^3 = 10^3\text{ mm}^3 = 1000\text{ mm}^3$$

Przykład 3.

Przelicz centymetry sześciennie na sekundę na litry na godzinę.

Rozwiązanie:

$$\frac{1\text{ cm}^3}{\text{s}} = \frac{\frac{1}{1000}\text{ l}}{\frac{1}{3600}\text{ h}} = \frac{3600\text{ l}}{1000\text{ h}} = 3,6\frac{\text{l}}{\text{h}}$$





ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Przerysuj do zeszytu tabele i je uzupełnij.

	1 mg	1 g	1 dag	1 kg
1 mg	1	...	...	...
1 g	1000	1	...	...
1 dag	...	...	1	...
1 kg	...	...	...	1

	1 s	1 min	1 h	1 doba
1 s	1	...	...	...
1 min	60	1	...	...
1 h	...	...	1	...
1 doba	...	...	...	1

- Długość 115,27 m wyraż w: a) centymetrach, b) decymetrach, c) kilometrach, d) milimetrach.
- Masę 5432,1 dag wyraż w: a) gramach, b) kilogramach, c) miligramach, d) tonach.
- Objętość 0,456 l wyraż w: a) decylitrach, b) centylitrach, c) mililitrach, d) hektolitrach.
- Czas 36 minut wyraż w: a) sekundach, b) godzinach.
- Oblicz w zeszycie:
 - ile decymetrów kwadratowych ma 1 kilometr kwadratowy,
 - ile $1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ ma $\frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$,
 - ile cm^3 na sekundę ma 1 litr na minutę.
- Wyraż
 - gęstość $11340 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ w $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$,
 - prędkość $5,4 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ w $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$,
 - prędkość $30 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ w $\frac{\text{m}}{\text{min}}$.

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 13

- Wielkości fizyczne dzielimy na podstawowe (których nie definiujemy) i pochodne (które wynikają z podstawowych).

s. 14

- Według innego podziału wyróżniamy wielkości skalarne (które mają tylko wartość) oraz wektorowe (które mają dodatkowo kierunek, zwrot i punkt przyłożenia).

s. 15

- W Polsce i większości krajów świata obowiązuje układ jednostek SI, oparty na 7 jednostkach podstawowych i 2 uzupełniających.

s. 16

- Mając jednostkę główną danej wielkości fizycznej, można do niej utworzyć jednostki wielokrotne i podwielokrotne, posługując się systemem przedrostków metrycznych.



3. Pomiar i ich dokładność

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie, co to jest pomiar, i dowiesz się, jakie są rodzaje pomiarów;
- poznasz cechy przyrządów pomiarowych i ich wpływ na dokładność pomiarów;
- nauczysz się analizować dokładność wyników pomiarów;
- przyswoisz sobie zasady prawidłowego zaokrąglania wyników pomiarów oraz wyników zadań rachunkowych.

Pomiary i przyrządy pomiarowe

Pomiarem nazywamy porównanie danej wielkości fizycznej z inną wartością tej wielkości, przyjętą jako jednostkę. Gdy przykładowo ważymy ciało na wadze szalkowej, porównujemy jego masę z masą odważników położonych na drugiej szalce. Mierzając czas trwania jakiegoś procesu, porównujemy go z długością kolejnych sekund wskazywanych przez stoper. Patrząc na wskazówkę amperomierza, porównujemy natężenie płynącego przez niego prądu z przyjętą jednostką, tj. amperem itd.



Pomiarów dokonujemy za pomocą **przyrządów pomiarowych**. W zależności od mierzonej wielkości, różnią się one konstrukcją i zasadą działania. Niemniej każdy przyrząd wyposażony jest w skalę służącą do odczytywania wartości. Skala każdego przyrządu posiada dwie cechy: zakres i działkę elementarną.

Rys. 6. Przykładowy przyrząd pomiarowy – woltomierz.

Zakres przyrządu pomiarowego to największa wartość, jaką możemy odczytać na skali.

Działka elementarna to wartość mierzonej wielkości, odpowiadająca odległości pomiędzy najbliższymi kreskami na skali przyrządu.

pomiar

przyrządy
pomiarowe

zakres przyrządu
pomiarowego

działka elementarna
przyrządu
pomiarowego



Na przykład zakres pomiarowy zwykłej linijki to po prostu jej długość, a działka elementarna to 1 mm. Zakres wagi szalkowej uwidoczniiony jest na jej belce, a działka elementarna równa jest masie najbliższego odważnika. Z kolei dla woltomierza przedstawionego na rysunku 6. zakres wynosi 40 V, a działka elementarna to 2 V. Jeśli przyrząd ma wyświetlacz cyfrowy, jego działką elementarną jest różnica dwóch możliwie najbliższych wskazań, a zakresem – największa liczba, jaka może się pojawić na wyświetlaczu. Słowo *skala* nie zawsze więc oznacza tarczę z zaznaczonymi kreskami i liczbami, należy je rozumieć szerzej.

Przyrządy pomiarowe produkowane z myślą o poważnych zastosowaniach w nauce, technice i handlu mają oznaczenia dotyczące tzw. klasy dokładności lub działki legalizacyjnej. Wtedy przyjmujemy, że dokładność pomiarów jest taka, jak wynika z oznaczeń. W przeciwnym przypadku uważamy, że dokładność przyrządu jest równa działce elementarnej. Dokładność ta bywa również nazywana **rozdzielczością**.

pomiar prosty

Jeśli wartość mierzonej wielkości fizycznej możemy odczytać wprost ze skali przyrządu, mówimy o **miarze bezpośrednim** lub **prostym**. Przykładem jest pomiar długości za pomocą linijki lub pomiar napięcia za pomocą woltomierza. W niektórych przypadkach nie istnieją przyrządy mierzące interesującą nas wielkość bezpośrednio. Na przykład, jeśli chcemy wyznaczyć powierzchnię blatu stołu, musimy najpierw zmierzyć długości jego boków, a następnie podstawić do odpowiedniego wzoru. Czynność, podczas której najpierw mierzymy inne wielkości fizyczne, a następnie wyznaczamy wartość interesującej nas wielkości na drodze obliczeń, nazywamy **miarem pośrednim** lub **złożonym**. Wiele wielkości fizycznych możemy zmierzyć zarówno bezpośrednio, jak i pośrednio. Na przykład prędkość samochodu możemy zarówno odczytać bezpośrednio na prędkościomierzu, jak i zmierzyć drogę i czas przejazdu, a następnie podstawić do wzoru.

pomiar złożony

Dokładność pomiarów

Trzeba sobie uświadomić, że nie istnieją pomiary absolutnie dokładne. Na przeszkodzie w uzyskiwaniu idealnych wyników stoją nie tylko ograniczenia związane z samymi przyrządami pomiarowymi, lecz także naturalna zmienność badanych obiektów, czynnik ludzki oraz prawa fizyki. Wynik każdego pomiaru obarczony jest tzw. **niepewnością pomiarową**. Dalszą analizę dokładności wyników przeprowadzimy w odniesieniu do pomiarów prostych.

Niepewności pomiarowe możemy podawać w liczbach bezwzględnych i względnych.

niepewność bezwzględna

Niepewność bezwzględna wyrażona jest bezpośrednio w jednostkach wielkości mierzonej i podaje, o ile uzyskany wynik może się różnić od właściwego. Wynik i jego niepewność zapisujemy na przykład w postaci $l = (415,0 \pm 0,5)$ cm, co oznacza, że zakładamy, iż prawdziwa wartość zmierzonej długości l mieści się w przedziale od 414,5 do 415,5 cm.



Niepewność bezwzględna nie jest dobrą miarą przy porównywaniu dokładności pomiarów. Dokładność 1 mm uznalibyśmy jako rewelacyjną przy pomiarze długości sali, ale raczej za marną przy pomiarze grubości zeszytu. Ten jeden milimetr stanowi bowiem 0,01% z 10 metrów, jakie mierzy sala, oraz aż 10% z 1 centymetra będącego przykładową grubością zeszytu. Dlatego też posługujemy się pojęciem niepewności względnej.

Niepewnością względną pomiaru wielkości x nazywamy procentowy stosunek niepewności bezwzględnej tego pomiaru do wartości zmierzonej x :

$$b_x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%$$

Literka x symbolizuje tu ogólnie jakąkolwiek wielkość mierzoną. W konkretnym przypadku trzeba ją zastąpić właściwym symbolem mierzonej wielkości. Odnosząc się do przykładu z poprzedniego akapitu, naszą wielkością mierzoną jest długość l , jej niepewność bezwzględną oznaczmy Δl , więc niepewność względną obliczymy następująco:

$$b_l = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\% = \frac{0,5 \text{ cm}}{415 \text{ cm}} \cdot 100\% = 0,12\%$$

Zauważmy, że niepewność względna jest wielkością bezwymiarową (czyli nie ma jednostki). Jednostka mierzonej wielkości występuje bowiem zarówno w liczniku, jak i mianowniku i się po prostu skraca.

Poleganie na wyniku pojedynczego pomiaru jest działaniem ryzykownym. Nigdy nie mamy pewności, czy użyty przyrząd pomiarowy jest sprawny oraz czy nie popełniliśmy tzw. **błędu grubego** wynikającego z naszego roztargnienia lub niewzięcia pod uwagę jakiegoś istotnego czynnika. Dlatego najlepiej wykonać zawsze **serię pomiarów**, w miarę możliwości różnymi przyrządami i z pomocą innych ludzi.

Doświadczenie

Niech grupka 5–10 osób podejdzie ze stoperami do drgającego wahadła. Niech każdy, w sposób niezależny od pozostałych, odmierzy czas trwania 10 okresów drgań wahadła z dokładnością do 0,01 s. Następnie niech każdy zanotuje swój wynik na tablicy.

Co zauważyliście?

W powyższym doświadczeniu każdy dysponował stoperem o porównywalnej dokładności i starał się jak mógł, aby uzyskać prawidłowy wynik. Niestety, i tak otrzymane wartości okazały się różne. Uzyskaliśmy pewien rozrzut statystyczny wyników, będący nieodłączną cechą każdego pomiaru, w którym staramy się być maksymalnie dokładni (gdyby w powyższym doświadczeniu umówić się, że podajemy czasy z dokładnością do 1 sekundy, wyniki zapewne byłyby jednakowe, co nie znaczy, że bardziej dokładne). Z każdą serią pomiarów związana jest tak zwana nie-

niepewność
względna

błędy grube

seria pomiarów –
zwiększanie
dokładności
pomiarów





pewność statystyczna. Nie możemy jej wyeliminować, natomiast możemy ją zmniejszyć, używając jak najdokładniejszych przyrządów i przeprowadzając jak najdłuższą serię pomiarów.

Jeśli dysponujemy wynikami serii pomiarów, to ewentualne wartości rażąco odbiegające od pozostałych odrzucamy (jako tak zwane błędy grube), a z pozostałych obliczamy średnią arytmetyczną.

Przykład 1.

Grupa osób zmierzyła w klasie czas staczania się kulki na równi pochyłej. Każdy użył stopera w swoim własnym telefonie albo dostał stoper mechaniczny od nauczyciela. Wyniki pomiarów przedstawia tabela:

Lp.	Imię	Wynik t, s
1	Antek	14,75
2	Benek	15,04
3	Jakub	15,01
4	Danka	14,93
5	Ela	14,67
6	Felicjan	14,88

Oblicz średnią wartość czasów zmierzonych przez uczniów.

Rozwiązanie:

$$\bar{t} = \frac{14,75 + 15,04 + 15,01 + 14,93 + 14,67 + 14,88}{6} = 14,88 \text{ s} \approx 14,9 \text{ s}$$

Gdyby, przykładowo, Jakub otrzymał wynik 10,01 s, uznalibyśmy że chłopiec się zagapił albo stoper mu się zaciął i musielibyśmy taką liczbę odrzucić, a średnią obliczyć z pozostałych pięciu wyników. Wzięcie pod uwagę ewidentnie błędnej danej zafalszowałoby wynik końcowy.

Zasady prawidłowego zaokrąglania

Dość istotną sprawą jest właściwe zaokrąglanie liczb. Kalkulatory, zwłaszcza podczas dzielenia, wyświetlają tyle cyfr, ile się zmieści na ekranie. Podawanie ich wszystkich nie ma sensu fizycznego. Trzeba się zawsze zastanowić, jaka jest prawdziwa dokładność naszych pomiarów. Jeśli wielokrotnie zmierzmy długość stołu, za każdym razem z dokładnością do 1 milimetra, i obliczymy średnią, a kalkulator poda nam wynik z dokładnością do 7 miejsc po przecinku, wszystkie cyfry odpowiadające ułamkom milimetra należy odrzucić (pamiętając o regule zaokrąglania: jeśli pierwsza odrzucona cyfra jest równa co najmniej 5, to ostatnią pozostawioną cyfrę zwiększamy o 1). Podobnie w powyższym przykładzie zaokrągliliśmy czas do 0,1 sekundy, ponieważ widać, że rozrzut wyników występuje na poziomie dziesiątych części sekundy.



zasady zaokrąglania

Należy też pamiętać o właściwym **zaokrąglaniu wyników obliczeń**. Ponieważ żadne dane nie są absolutnie dokładne, nie ma sensu podawać zbyt wielkiej liczby cyfr w wyniku. Standardowo, jeśli z treści zadania lub kontekstu nie wynika coś innego, przyjmuje się, że wyniki obliczeń podajemy z dokładnością do dwóch, trzech cyfr znaczących. Co to znaczy?

cyfry znaczące

Cyfry znaczące są to pierwsze cyfry rozwinięcia dziesiętnego liczby, które nie są zerami.

W poniższych przykładach zaznaczono pogrubioną czcionką trzy cyfry znaczące i pokazano sposób zaokrąglania liczb.

$$23,45678 \approx 23,5$$

$$0,0398176 \approx 0,0398$$

$$15\,422,7 \approx 15\,400$$

$$0,0000108322 \approx 0,0000108$$

$$112,887 \approx 113$$

$$1\,234\,567 \approx 1\,230\,000$$

Jak widać, reguła właściwego zaokrąglania nie ma nic wspólnego z liczbą miejsc po przecinku, ponieważ istotna informacja niesiona przez liczbę może być zapisana na różnych pozycjach przed przecinkiem albo po przecinku.

Reasumując, jeżeli chcemy dokonać rzetelnych pomiarów dowolnej wielkości fizycznej, powinniśmy przestrzegać następujących zaleceń:

1. Używamy jak najdokładniejszych i sprawnych przyrządów pomiarowych.
2. Wykonujemy serię pomiarów – im więcej pomiarów w serii, tym lepiej. Jeśli jakiś wynik znacznie odbiega od pozostałych, to go pomijamy.
3. O ile to możliwe, używamy różnych przyrządów. Jeżeli użyjemy jednego i będzie on niesprawny, możemy otrzymać błędny wynik i nigdy się o tym nie dowiemy.
4. Jeśli to możliwe, prosimy inne osoby o wykonanie części pomiarów. Możemy coś robić źle i nie zdawać sobie z tego sprawy.
5. Z wyników serii pomiarów obliczamy średnią arytmetyczną i zaokrąglamy ją w rozsądny sposób. Nie podajemy cyfr sugerujących większą dokładność niż ta, z jaką naprawdę mierzyliśmy.
6. Każdy wynik pomiarów podajemy wraz z niepewnością pomiarową.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Określ zakres i dokładność przyrządów pomiarowych przedstawionych na ilustracjach. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.



2. Po przeprowadzeniu pomiarów kilku wielkości fizycznych uzyskano następujące wyniki i ich niepewności bezwzględne: a) $l = 1,28 \text{ m} (\pm 0,5 \text{ cm})$, b) $m = 527 \text{ g} (\pm 1 \text{ g})$, c) $I = 5,6 \text{ A} (\pm 100 \text{ mA})$. Oblicz, który z przedstawionych wyników jest najdokładniejszy, a który najmniej dokładny.
3. Kazik mierzył czas spadku kamienia z dachu i otrzymał następujące wyniki: 1,97 s, 2,01 s, 1,88 s, 1,92 s, 1,99 s. Oblicz w zeszycie wartość średnią wyników Kazika.
4. Zaokrąglaj do 2 cyfr znaczących następujące liczby: a) 1 002 777, b) 0,0987654, c) 302,7, d) 307,2. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 19 • Pomiar to porównanie danej wielkości fizycznej z inną wartością tej wielkości, przyjętą jako jednostka.
- s. 19 • Do dokonywania pomiarów służą przyrządy pomiarowe.
- s. 19 • Każdy przyrząd pomiarowy ma skalę, którą charakteryzuje zakres i działka elementarna (określająca dokładność pomiarów).
- s. 20 • Pomiar prosty polega na bezpośrednim odczytaniu mierzonej wartości ze skali przyrządu.
- s. 20 • Pomiar złożony polega na bezpośrednim zmierzeniu innych wielkości i podstawieniu do wzoru.
- s. 20 • Niepewność bezwzględna mówi, o ile zmierzona wartość może się różnić od prawidłowej.
- s. 21 • Niepewność względna to procentowy stosunek niepewności bezwzględnej do mierzonej wartości.
- s. 21 • Aby zwiększyć dokładność, wykonujemy serię pomiarów i obliczamy średnią.
- s. 21 • Wyniki rażąco odstające od pozostałych traktujemy jako błędy grube i odrzucamy.
- s. 23 • Wynik średni zaokrąglamy do takiej liczby miejsc po przecinku, jaka wynika z dokładności pomiarów.
- s. 23 • Wyniki obliczeń zaokrąglamy do maksymalnie 3 cyfr znaczących, chyba że z treści zadania, z dokładności pomiarów lub z danych wynika coś innego.



4. Graficzna analiza danych

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie, z jakich elementów składa się wykres;
- przećwiczysz odczytywanie różnych informacji z wykresu;
- nauczysz się konstruować prawidłowe wykresy zależności między wielkościami fizycznymi.

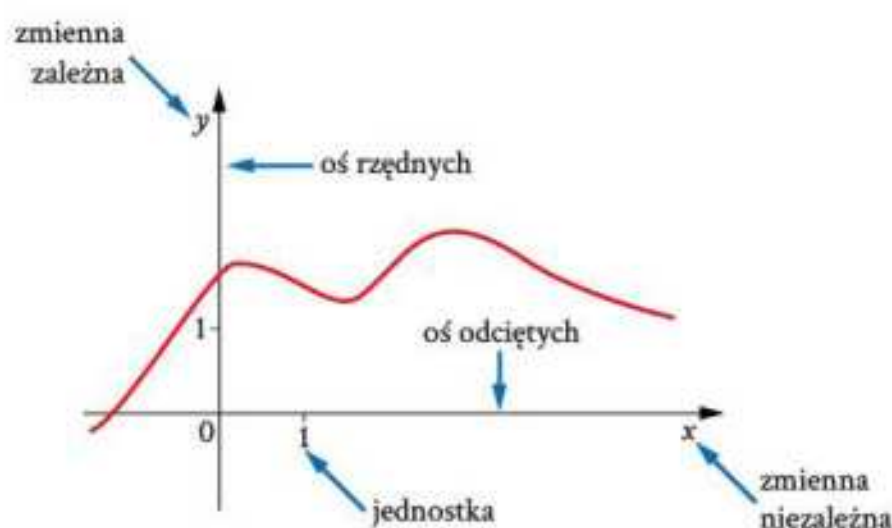
Odczytywanie informacji z wykresów

Jest rzeczą powszechnie znaną, że jeden obraz bardziej przemawia do wyobraźni i może przekazać więcej informacji niż wiele słów, a tym bardziej wiele liczb zapisanych w tabelach. Dlatego w licznych dyscyplinach wiedzy, nie tylko w naukach ścisłych, z reguły posługujemy się wykresami. Jeden rzut oka na wykres pozwala natychmiast rozpoznać charakter zależności pomiędzy różnymi wielkościami, wysnuć wnioski dotyczące trendów, zlokalizować maksima i minima. Nie dokonamy tego za pomocą nawet bardzo szczegółowego opisu słownego. Dlatego zajmiemy się teraz dokładnie techniką tworzenia wykresów oraz odczytywania z nich informacji.

Typowy wykres rysujemy w układzie współrzędnych wyznaczonych przez dwie prostopadłe osie. Oś poziomą nazywamy **osią odciętych** i odkładamy na niej wartości tak zwanej **zmiennej niezależnej**. Oś pionowa to tzw. **oś rzędnych**. Zaznaczamy na niej wartości **zmiennej zależnej**. W matematyce, gdy rysujemy wykres funkcji $y = f(x)$, to zmienną niezależną jest argument funkcji x , a zmienną zależną wartość funkcji $y = f(x)$ (rys. 7.). Kolejność oznaczenia osi nie może być zamieniona, bo wykres traci wtedy sens.

oś odciętych;
zmienna niezależna

oś rzędnych;
zmienna zależna



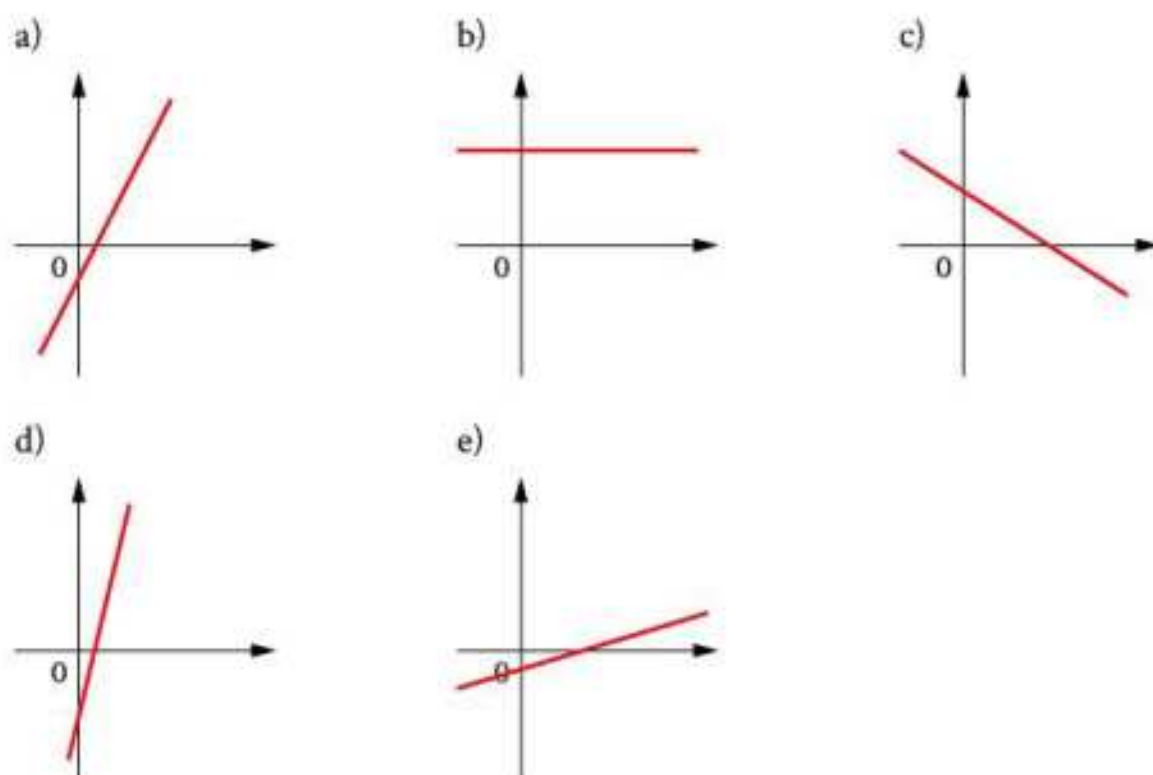
Rys. 7. Elementy wykresu.



odczytywanie
informacji
z wykresu

W fizyce zmiennymi odkładanymi na osiach są wielkości fizyczne. Zmienną niezależną jest często czas lub położenie, a zmienną zależną – na ogół inna wielkość fizyczna, która zmienia się wraz z czasem lub odległością.

Patrząc na wykres, możemy od razu rozpoznać, czy zależność łącząca zmienne jest rosnąca, czy malejąca, oraz czy te zmiany są szybkie (rys. 8.).



Rys. 8. a) funkcja rosnąca, b) funkcja stała, c) funkcja malejąca, d) szybki wzrost, e) powolny wzrost.

zasady
konstruowania
poprawnych
wykresów

Zasady konstruowania poprawnych wykresów

Na lekcjach fizyki będziemy często rysować wykresy na podstawie danych zawartych w tabeli (będących na przykład wynikami pomiarów). Aby narysować prawidłowy wykres, trzeba przestrzegać pewnych reguł. Ich spełnienie jest zawsze brane pod uwagę podczas sprawdzania testów maturalnych.

1. Rysując wykres, staramy się zawsze wykorzystać cały dostępny obszar. Wykres nie powinien być zbyt mały, gdyż wtedy bywa niedokładny.
2. Patrzymy, czy zmienne przyjmują tylko wartości dodatnie, czy też dodatnie i ujemne. Jeśli tylko dodatnie, wystarczy nam jedna ćwiartka układu współrzędnych. Jeśli również ujemne, tak dobieramy punkt przecięcia osi, by wszystkie elementy wykresu się zmieściły.
3. Oznaczamy osie, zwracając uwagę, która zmienna jest niezależna, a która zależna. Upływający czas jest zawsze zmienną niezależną!



4. Dobieramy jednostki tak, aby optymalnie wypełnić obszar wykresu. Na przykład, jeśli nasza oś odciętych ma 20 cm długości, a z tabeli z danymi wynika, że największa wartość, jaką mamy na niej zaznaczyć, wynosi 6, to jako jednostkę przyjmujemy 3 cm. Wtedy wartość 6 znajdzie się 18 cm od początku układu współrzędnych i mamy jeszcze 2 cm na zaznaczenie strzałki i opisanie osi. Wykresy ściśnięte, z dużymi pustymi obszarami (lub rozciągnięte, z punktami wystającymi poza oś), traktowane są jako źle zaprojektowane. Uwaga: osie nie muszą się przecinać w punkcie (0, 0). Jeśli na przykład zakres zmienności jednej ze zmiennych wynosi od 102 do 117, to odpowiednią oś można tak narysować, aby na skali były tylko liczby z przedziału od 100 do 120.
5. Bardzo starannie zaznaczamy punkty wykresu.
6. Jeśli chcemy graficznie odzwierciedlić matematyczny charakter zależności między zmiennymi, przeprowadzamy przez zaznaczone punkty (lub ich bezpośrednie sąsiedztwo, gdy widzimy, że punkty lekko „odstają”) gładką krzywą (nie łamaną!).

Proporcjonalność prosta

Analizując dane w tabelach lub wykresy, często będziesz stawać wobec konieczności rozpoznania, czy zależność pomiędzy wielkościami fizycznymi jest proporcjonalna. Dwie wielkości są **wprost proporcjonalne**, gdy zmiana jednej wielkości powoduje, że druga zmienia się tyle samo razy. Na przykład trzykrotny wzrost rozciągnięcia sprężyny powoduje konieczność użycia trzykrotnie większej siły, by taki stan utrzymać. Mówimy w tym przypadku, że siła reakcji sprężyny jest proporcjonalna do jej wydłużenia.

proporcjonalność
prosta

Wykres wielkości wzajemnie proporcjonalnych ma postać linii prostej. Jeśli na podstawie tabeli z danymi mamy rozstrzygnąć, czy wielkości są proporcjonalne, najlepiej sporządzić staranny wykres, po czym przyłożyć do niego linijkę. Jeśli linijkę da się przyłożyć w taki sposób, że punkty do niej przylegają (nie muszą idealnie – pamiętamy, że wszystkie dane obarczone są niepewnością pomiarową), to stwierdzamy, że zmienne są proporcjonalne.

Przykład 1.

Damian sfilmował ruch ślizgacza na torze powietrznym. Film był kręcony z szybkością 25 klatek na sekundę. Następnie Damian obejrzał film klatka po klatce i z co piątej klatki (czyli co 1/5 sekundy) odczytał położenie ślizgacza na taśmie przytwierdzonej do toru. Wyniki pomiarów zapisał w tabeli:

t, s	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4
x, cm	20	35	49	64	79	94	111	122	140	155	170	185	197

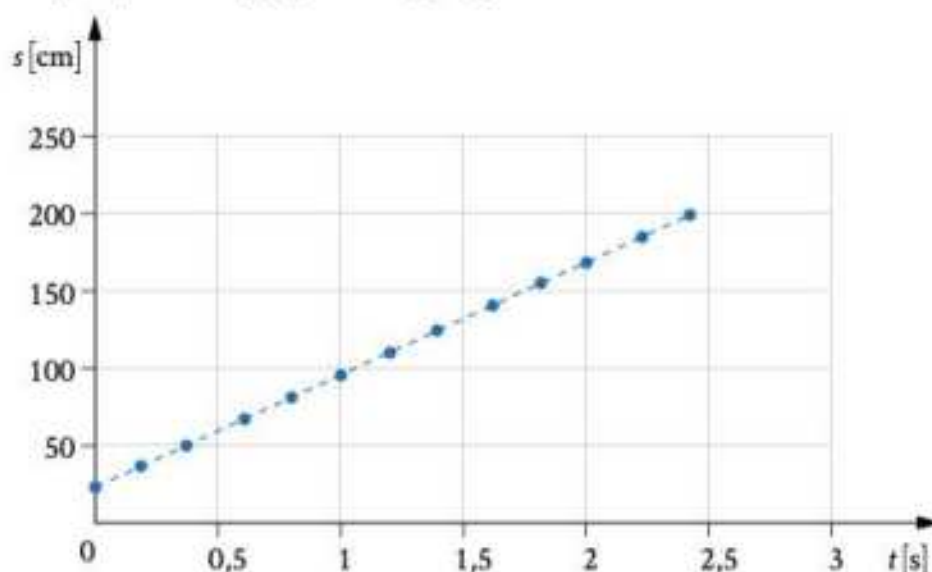
Rozstrzygnij, czy obserwowany ruch był jednostajny.





Rozwiązanie:

Uznamy, że ruch był jednostajny, jeśli droga okaże się proporcjonalna do czasu. Prawidłowy wykres wygląda następująco:



Jak widać, punkty pomiarowe dość ściśle przylegają do odcinka linii prostej. Należy więc uznać, że obserwowany ruch był jednostajny.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

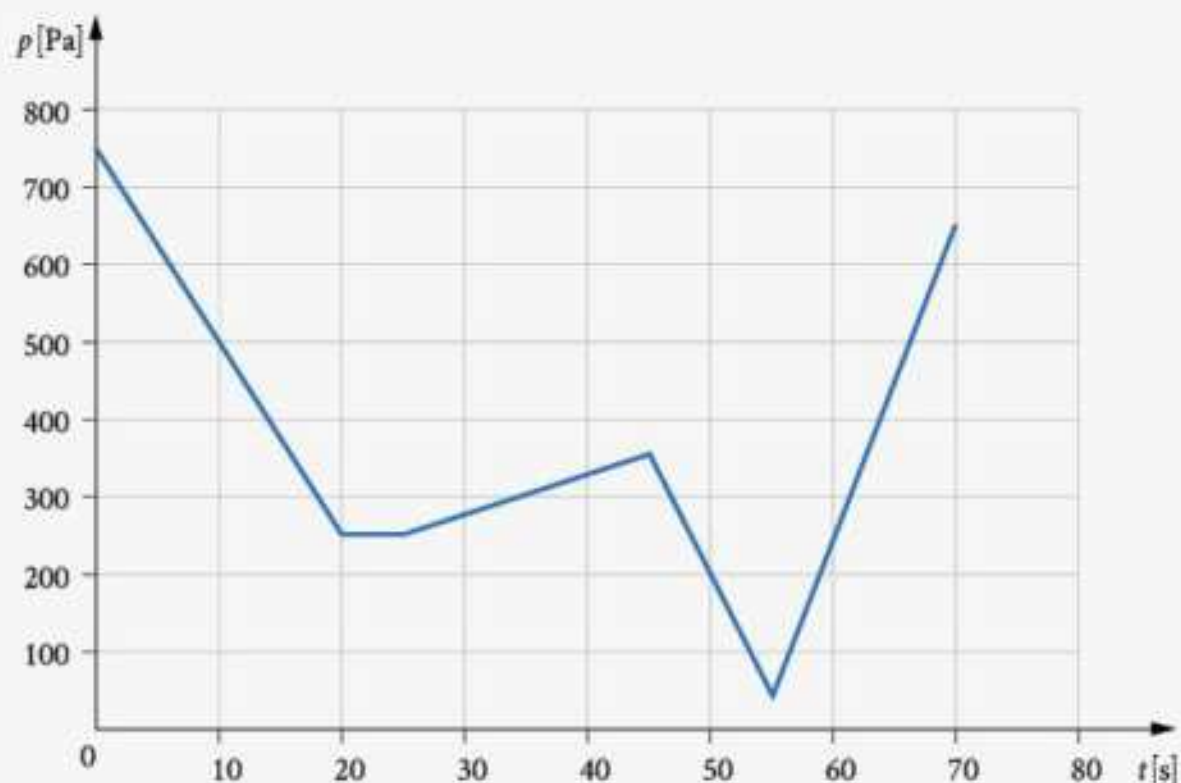
- O godzinie 9.00 temperatura powietrza na rynku w Zamościu wynosiła 11°C . Do godziny 13.00 wzrastała równomiernie, osiągając wartość 17°C . Przez kolejne 3 godziny utrzymywała się na stałym poziomie, po czym zaczęła spadać jednostajnie w tempie 1 stopień na godzinę. O godzinie 19.00 pomiary zakończono.
 - Sporządź wykres temperatury od czasu na rynku w Zamościu w godzinach 9.00–19.00.
 - Oblicz, co było większe: tempo wzrostu temperatury przed godziną 13.00 czy tempo spadku temperatury wieczorem.
 - Na podstawie wykresu oszacuj, o której godzinie temperatura na rynku wynosiła 15°C .
 - Na podstawie wykresu oszacuj, przez jaki okres (w czasie wykonywania pomiarów) temperatura powietrza była nie mniejsza niż 16°C .
 - Oszacuj temperaturę powietrza w Zamościu o godzinie 12.00.
- Zależność położenia od czasu w pewnym ruchu przedstawia tabela:

$s, \text{ m}$	1,5	2,95	4,48	5,99	7,51	9,12	10,55	12,18	13,67	15,5	17
$t, \text{ s}$	2	3	4	5	6	7,5	9	11	14	18	23

Zbadaj, czy ten ruch był jednostajny.



3. Wykres przedstawia zależność ciśnienia od czasu w komorze próżniowej podczas pewnego eksperymentu w laboratorium.



- Na jego podstawie sporządź tabelkę z wartościami ciśnienia w komorze co 5 sekund, począwszy od momentu rozpoczęcia eksperymentu aż do jego zakończenia.
- W którym momencie tempo zmian ciśnienia było największe? Oblicz największe tempo zmian w paskalach na sekundę.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Oś pozioma wykresu nazywa się osią odciętych i zaznaczamy na niej wartości zmiennej niezależnej. s. 25
- Oś pionowa to oś rzędnych i przedstawia wartości zmiennej zależnej. s. 25
- Na podstawie nachylenia wykresu możemy stwierdzić, czy zależność jest rosnąca, stała czy malejąca oraz jak szybki jest wzrost lub spadek. s. 26
- Aby poprawnie skonstruować wykres, trzeba właściwie wykorzystać dostępne miejsce, prawidłowo opisać i wyskalować osie oraz prawidłowo zaznaczyć punkty na wykresie. s. 26
- Proporcjonalność prostą rozpoznajemy po tym, że punkty na wykresie układają się mniej więcej wzdłuż linii prostej. Niewielkie odstępstwa tłumaczymy istnieniem niepewności pomiarowej. s. 27

**PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM**

- s. 10 1. Fizyka posługuje się specyficznym językiem, którego wszystkie pojęcia są precyzyjnie zdefiniowane. Definicja to umowa dotycząca tego, co dane pojęcie konkretnie oznacza. Języka fizyki używają też wszystkie inne nauki przyrodnicze.
- s. 8 2. Wszystkie procesy zachodzące w przyrodzie, które poddają się naszym obserwacjom, nazywamy zjawiskami.
- s. 9 3. Obiekty, które nas otaczają, począwszy od cząstek elementarnych, a skończywszy na gwiazdach, nazywamy ogólnie ciałami. Ciała są zbudowane z substancji.
- s. 9 4. Cechy zjawisk, ciał i substancji, które można mierzyć i wyrażać w jednostkach, nazywamy wielkościami fizycznymi. Wielkości fizyczne dzielimy na podstawowe i pochodne oraz na skalarne i wektorowe.
- s. 9 5. Badając zjawiska i materię, fizycy formułują prawa fizyki, zasady, hipotezy i teorie. Stosowaną obecnie metodykę badania w rzeczywistości opracował Galileusz około 400 lat temu.
- s. 15 6. Obowiązujący w Polsce i większości krajów świata układ jednostek SI oparty jest na 7 jednostkach podstawowych i 2 uzupełniających. Na ich podstawie wyprowadzamy jednostki pochodne. Dzięki systemowi przedrostków metrycznych od jednostek głównych można tworzyć jednostki wielokrotne i podwielokrotne.
- s. 19 7. Pomiar to porównanie danej wielkości fizycznej z inną wartością tej wielkości, przyjętą jako jednostka. Pomiary dzielimy na proste i złożone.
- s. 19 8. Do dokonywania pomiarów służą przyrządy pomiarowe. Każdy z nich ma skalę, którą charakteryzuje zakres i działka elementarna (określająca dokładność pomiarów).
- s. 20 9. Nie ma pomiarów idealnie dokładnych. Każdy pomiar obarczony jest niepewnością, którą można wyrażać jako niepewność bezwzględną lub względną.
- s. 21 10. Aby zwiększyć dokładność, wykonujemy serię pomiarów i obliczamy średnią. W miarę możliwości staramy się mierzyć różnymi przyrządami, różnymi metodami i z pomocą innych osób. Wyniki rażąco odstające od pozostałych traktujemy jako błędy grube i odrzucamy.
- s. 23 11. Pamiętamy o właściwym zaokrągłaniu wyników pomiarów i obliczeń.
- s. 26 12. Dobrym sposobem na wyrażenie zależności między wielkościami fizycznymi jest narysowanie wykresu. Na jego podstawie możemy od razu stwierdzić, czy zależność jest rosnąca, stała czy malejąca oraz jak szybki jest wzrost lub spadek.
- s. 26 13. Konstruując wykres, pamiętamy o właściwym wykorzystaniu dostępnego miejsca, prawidłowym opisaniu i wyskalowaniu osi oraz prawidłowym zaznaczeniu punktów na wykresie.
- s. 27 14. Jeśli punkty na wykresie układają się mniej więcej wzdłuż linii prostej, to stwierdzamy, że wielkości fizyczne zaznaczone na osiach są wprost proporcjonalne.



Naukę fizyki rozpoczynamy od jej centralnego działu – mechaniki. Najogólniej mówiąc, mechanika jest nauką o ruchu, czyli najpowszechniejszym zjawisku w fizyce. Poruszają się nie tylko przedmioty wokół nas, lecz także ciała niebieskie, atomy, cząstki elementarne, fale i ładunki. Pojęcie ruchu będzie się przewijać we wszystkich następnych działach fizyki. Dlatego gruntowne przyswojenie sobie mechaniki jest kluczowe dla zrozumienia całej fizyki.

W mechanice wyodrębnić można **kinematykę**, czyli naukę o opisie ruchu (bez wnikania w jego przyczyny), oraz dynamikę, czyli naukę próbującą wyjaśnić, dlaczego ruch się odbywa. Zaczynamy od rzeczy najprostszej, czyli wyjaśnienia, czym w ogóle jest ruch.

2. Kinematyka



Pojęcie ruchu

Ruch prostoliniowy jednostajny

Ruch prostoliniowy, jednostajnie przyspieszony

Ruch prostoliniowy, jednostajnie opóźniony

Ruch jednostajny po okręgu



1. Pojęcie ruchu

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie, czym jest ruch i jakie wyróżniamy rodzaje ruchu;
- przypomnisz sobie podstawowe pojęcia charakteryzujące ruch: *położenie, prędkość, przyspieszenie, tor i droga*;
- nauczysz się analizować ruch na płaszczyźnie i w przestrzeni.

Ruch i jego cechy

ruch

układ odniesienia

Ruch to zmiana położenia jednego ciała względem drugiego, zachodząca w pewnym czasie. Zwróćmy uwagę, że w przytoczonej definicji pojawia się drugie ciało, zwane **układem odniesienia**. Nie istnieje w przyrodzie absolutny ruch ani absolutny spoczynek. Patrząc na samotny kamień w przestrzeni międzygalaktycznej, nie jesteśmy w stanie określić, czy on się porusza, czy nie. Zawsze musi być jakieś tło – ciało lub układ ciał – względem którego analizujemy ruch. Dlatego mówimy, że **ruch jest względny** – zależy od wyboru układu odniesienia.

Układ odniesienia możemy wybrać dowolnie, ale musimy liczyć się z faktem, że w różnych układach odniesienia to samo ciało będzie się poruszać inaczej. Jeśli siedząc w pociągu położymy obok siebie walizkę, będzie ona względem nas spoczywać. Jeśli przyjmiemy za układ odniesienia Ziemię (i mijane słupy trakcji elektrycznej), walizka będzie się poruszać wraz z pociągiem. Dla pasażera mijającego nas pociąg ruch walizki będzie jeszcze inny. Przyjmując za układ odniesienia Słońce, musimy dodatkowo uwzględnić ruch Ziemi itd. Nie istnieje absolutny, jedyny słuszny układ odniesienia. Mówiąc o ruchu, zawsze musimy mieć świadomość, do jakiego konkretnego układu ten ruch odnosimy.

Wszystkie ruchy możemy sklasyfikować ze względu na dwie cechy: tor i prędkość.

Rys. 1. Ta sama walizka spoczywa względem siedzącego pasażera, porusza się wraz z pociągiem względem Ziemi i porusza się znacznie szybciej względem pociągu jadącego w przeciwną stronę.



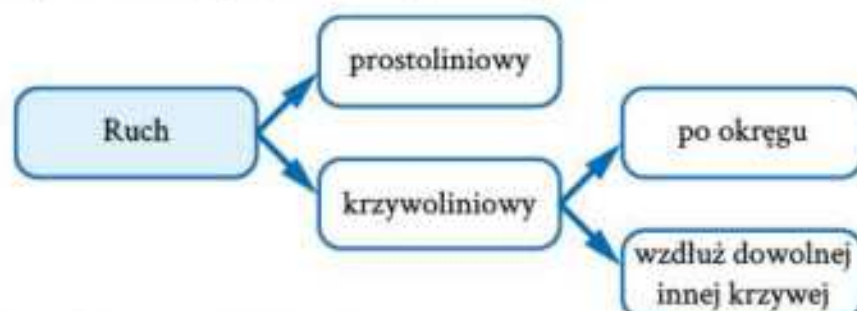
tor

Tor jest to linia, wzdłuż której porusza się ciało.



Toru (zwanego też czasem trajektorią) nie należy mylić z drogą. **Droga** jest liczbą i jest to długość odcinka toru. Tor zaś jest pojęciem geometrycznym, kształtem. Jeśli ciało porusza się wzdłuż linii prostej, mówimy o **ruchu prostoliniowym**, każdy inny ruch nazywamy **krzywoliniowym**. Ważnym (choć jednym z wielu) przypadkiem ruchu krzywoliniowego jest **ruch po okręgu**.

droga



Rys. 2. Podział ruchów ze względu na tor.

Prędkość jest wielkością wektorową – a jej ścisłą definicję podano poniżej. W szkole podstawowej została omówiona wartość wektora prędkości (zwana też szybkością), którą definiujemy jako stosunek drogi (mierzonej wzdłuż toru) do czasu jej przebycia.

Wartość prędkości to stosunek drogi do czasu, w którym została ona przebyta.

wartość prędkości

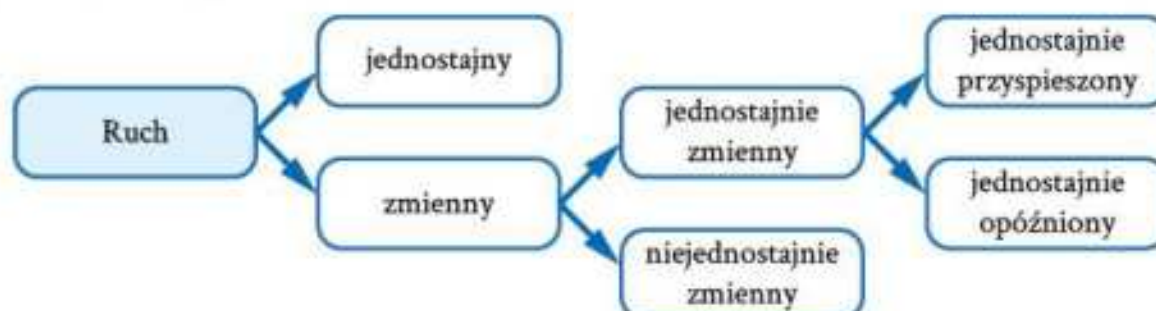
$$v = \frac{s}{t}$$

Jednostką prędkości jest 1 metr na sekundę $\left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$. Często, zwłaszcza w odniesieniu do środków transportu, posługujemy się też kilometrami na godzinę $\left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$.

Jeśli wartość prędkości nie ulega zmianie, ruch nazywamy **jednostajnym**. Każdy inny ruch jest **niejednostajny**, inaczej: **zmienny**. Zmiany wartości prędkości mogą być regularne, czyli w jednakowych przedziałach czasu prędkość może się zmieniać o taką samą wartość. Takie ruchy nazywamy **jednostajnie zmiennymi**. Jeśli zmiany prędkości w jednakowych odstępach czasu nie są jednakowe (w praktyce zdarza się to najczęściej), ruch jest **niejednostajnie zmienny**. Matematyczny opis takiego ruchu jest trudny i nie będziemy się nim zajmować. W przyszłości poznasz ważny przypadek ruchu niejednostajnie zmiennego, a mianowicie ruch drgający.

podział ruchów

Jeśli zmiany prędkości są regularne, to wartość prędkości może jednostajnie rosnąć lub maleć. Ruchy jednostajnie zmienne można więc podzielić na **jednostajnie przyspieszone** i **jednostajnie opóźnione**. Będą one przedmiotem naszych dociekań na najbliższych lekcjach.



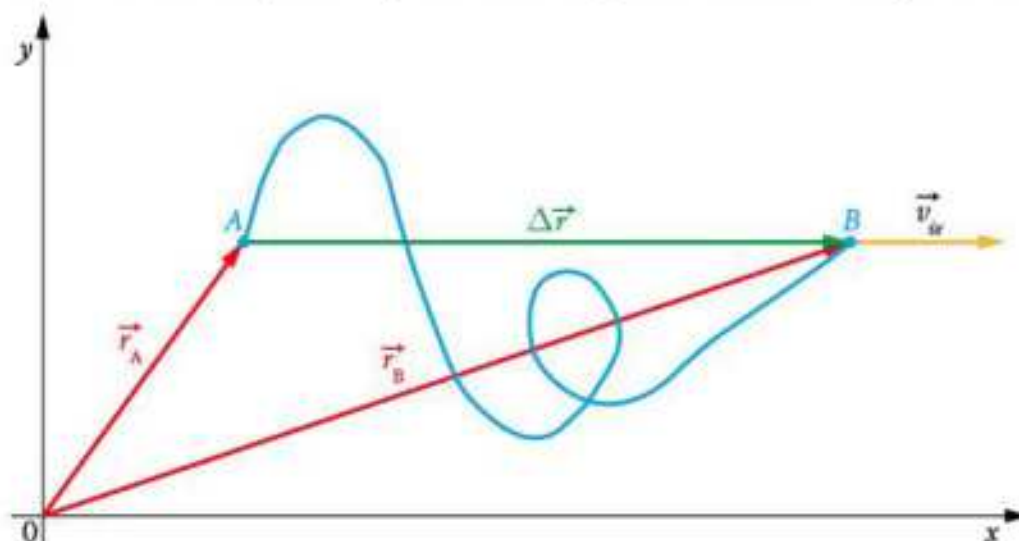
Rys. 3. Podział ruchów ze względu na wartość prędkości.



Ruch na płaszczyźnie i w przestrzeni

Torem ruchu może być dowolna krzywa na płaszczyźnie lub w przestrzeni. Konsekwencją tego jest wektorowy charakter wielkości fizycznych opisujących ruch.

Rozważmy ruch mrówki, która chodzi po płaskiej powierzchni. Mrówka może w każdej chwili skręcić pod dowolnym kątem, przyspieszyć, zwolnić, a także zatrzymać się na jakiś czas. Przykładowy tor mrówki przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Analiza ruchu mrówki na płaszczyźnie.

W chwili początkowej mrówka znajduje się w punkcie A. Położenie mrówki na płaszczyźnie można określić za pomocą wektora, którego początek znajduje się w początku układu współrzędnych, a koniec wskazuje położenie mrówki. Ten wektor, oznaczony na rysunku $\vec{r}_A$, nazywamy **wektorem położenia**. Mrówka, poruszając się wzdłuż toru swojego ruchu, dociera do punktu B, a jej nowe położenie opisuje wektor $\vec{r}_B$. Nie wdając się w szczegóły jej ruchu, stwierdzamy, że mrówka przemieściła się z punktu A do punktu B. Wektor, który zaczyna się w punkcie A i kończy w punkcie B, nazywamy **wektorem przemieszczenia** i oznaczamy jako $\Delta \vec{r}$.

Dzieląc wektor przemieszczenia przez czas, w którym to przemieszczenie nastąpiło, otrzymujemy wektor prędkości średniej. Wektor ten ma taki sam kierunek i zwrot, jak wektor przemieszczenia. Natomiast jego długość jest inna i wyraża się w innych jednostkach (metrach na sekundę). Został on zaznaczony na rysunku 4 kolorem żółtym.

Wektor prędkości średniej to stosunek wektora przemieszczenia do czasu, w którym to przemieszczenie nastąpiło.

$$\vec{v}_{sr} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

Prędkość średnia nie zawiera informacji dotyczących szczegółów zachowania mrówki w trakcie jej ruchu. Do obliczenia tej prędkości wystarczy znajomość położenia początkowego i końcowego mrówki oraz czas jej ruchu. Tymczasem widzimy, że mrówka cały czas zmieniała kierunek ruchu. Zapewne też przyspieszała i zwalniała, mogła się również zatrzymywać. Aby odzwierciedlić stan ruchu mrówki w danym momencie, musimy obliczyć jej prędkość w bardzo krótkim przedziale czasu – tak krótkim, że ta prędkość nie zdąży się zmienić. Obliczymy wtedy tak zwaną prędkość

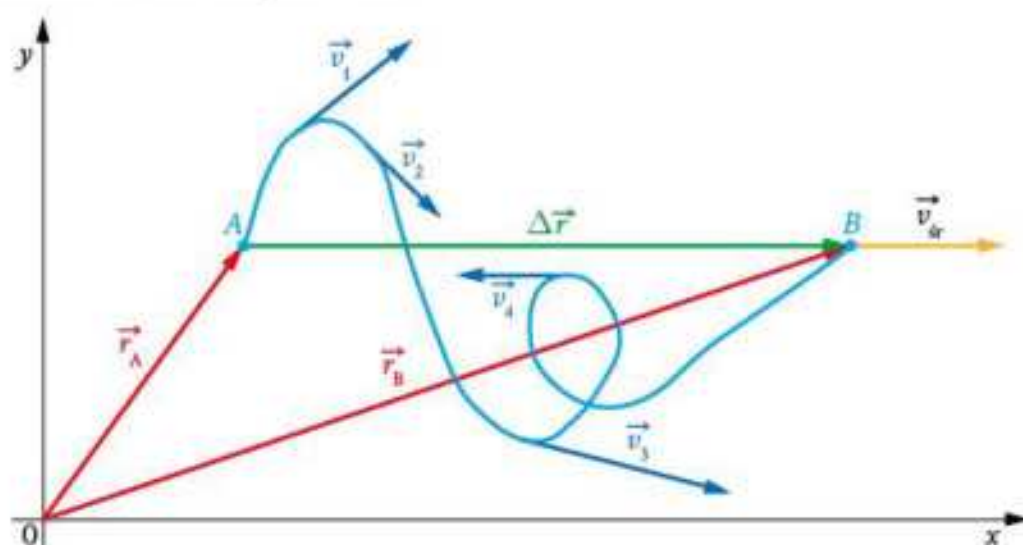
wektor położenia

wektor
przemieszczenia

prędkość średnia



chwilową. Ponieważ w bardzo krótkim czasie mrówka przemieści się nieznacznie, wektor przemieszczenia będzie miał taki sam kierunek, jak tor w danym miejscu. Będzie więc styczny do toru. Wektor prędkości chwilowej też będzie zawsze styczny do toru. Wektory prędkości chwilowych w przykładowych momentach ruchu mrówki zaznaczono na rysunku 5.



Rys. 5. Tor mrówki z zaznaczonymi przykładowymi wektorami prędkości chwilowej.

Prędkość chwilowa to wielkość wektorowa równa stosunkowi bardzo małego przemieszczenia do bardzo krótkiego przedziału czasu, w którym to przemieszczenie nastąpiło.

prędkość chwilowa

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \text{ dla } \Delta t \rightarrow 0$$

Zapis $\Delta t \rightarrow 0$ oznacza bardzo mały przedział czasu (zbiegający do zera).

Mówiąc o prędkości średniej, zawsze będziemy używać przymiotnika *średnia*. Gdy natomiast będziemy mówić o prędkości chwilowej, użyjemy określenia *prędkość*.

Nasze rozważania dotyczące ruchu mrówki odnosiły się do dwuwymiarowej płaszczyzny. Analiza ruchu trójwymiarowego (na przykład lot jaskółki w przestrzeni) jest analogiczna.

Przyspieszenie

Jeśli prędkość ciała zmienia się w czasie, mamy do czynienia z **przyspieszeniem**. Wartość przyspieszenia informuje nas, o ile zmienia się prędkość ciała w jednostce czasu, na przykład w ciągu sekundy. Zmiany prędkości możemy odnieść do dłuższego odcinka czasu – mówimy wtedy o przyspieszeniu średnim. Jeśli będziemy badać, jak prędkość zmieniała się w bardzo krótkim czasie (w danej chwili), obliczymy przyspieszenie chwilowe. Ponieważ prędkość jest wielkością wektorową, jej zmiany mogą dotyczyć zarówno wartości, jak i kierunku. Obydwa przypadki będziemy analizować na kolejnych lekcjach.

Przyspieszenie średnie jest to stosunek zmiany wektora prędkości $\vec{v}$ ciała do czasu t , w którym ta zmiana nastąpiła.

przyspieszenie
średnie

$$\vec{a}_{sr} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

**przyspieszenie
chwilowe**

Przyspieszenie chwilowe to stosunek zmiany wektora prędkości do bardzo małego upływu czasu, w którym ten przyrost nastąpił.

$$\vec{a}_{ch} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \text{ dla } \Delta t \rightarrow 0$$

Przyspieszenie jest wielkością wektorową. Kierunek i zwrot przyspieszenia są zgodne z kierunkiem i zwrotem wektora zmiany prędkości $\Delta \vec{v}$.

Jednostką przyspieszenia jest 1 metr na sekundę do kwadratu.

$1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ jest to przyspieszenie w takim ruchu, w którym w ciągu sekundy prędkość wzrasta o $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Oblicz, ile kilometrów na godzinę ma 1 metr na sekundę i ile metrów na sekundę ma 1 kilometr na godzinę. Uzyskane przeliczniki warto zapamiętać, gdyż będą się często przydawać podczas rozwiązywania zadań.
2. Turysta wędrował 3 km na południe, po czym skręcił na wschód i przeszedł kolejne 4 km. Oblicz długość wektora przemieszczenia turysty. Naskicuj tor ruchu turysty.
3. Cała wędrowka turysty z poprzedniego zadania trwała 2 godziny. Oblicz jego prędkość średnią. Odpowiedź zapisz w zeszycie.
4. Oblicz przyspieszenie średnie samochodu, który rozpędza się do „setki” w ciągu 8,5 sekundy.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 32 • Ruch to zmiana położenia jednego ciała względem drugiego, zachodząca w pewnym czasie. Ruch jest pojęciem względnym, gdyż zależy od wyboru układu odniesienia, względem którego ten ruch rozpatrujemy.
- s. 32 • Tor to linia, wzdłuż której porusza się ciało. Ze względu na tor ruchy dzielimy na prostoliniowe i krzywoliniowe.
- s. 33 • Droga to długość odcinka toru. Jest to liczba wyrażona w jednostkach długości.
- s. 33 • Wartość prędkości to stosunek drogi do czasu, w którym została ona przebyta. Jest to wielkość skalarna. Ze względu na prędkość ruchy dzielimy na jednostajne i zmienne.
- s. 34 • Przemieszczenie to wektor łączący położenie początkowe ciała w danym ruchu z jego położeniem końcowym.
- s. 34, 35 • Prędkość to stosunek przemieszczenia do czasu, w którym to przemieszczenie nastąpiło. Wyróżniamy prędkość średnią i chwilową. Prędkość jest wielkością wektorową.
- s. 35, 36 • Przyspieszenie to stosunek zmiany wektora prędkości do czasu, w którym ta zmiana nastąpiła. Jest to wielkość wektorowa. W zależności od odcinka czasu, w którym nastąpiła zmiana prędkości, wyróżniamy przyspieszenie średnie i chwilowe.



2. Ruch prostoliniowy jednostajny

NA TEJ LEKCJI

- zrewidujesz i uzupełnisz swoje wiadomości o ruchu jednostajnym prostoliniowym;
- przećwiczysz obliczanie położenia, drogi, prędkości i czasu w tym ruchu.

Badanie ruchu

Doświadczenie 1.

Tor powietrzny to odpowiednio wyprofilowany kształtownik metalowy, w środku pusty, z nawierconymi małymi otworkami. Do wnętrza toru wdmuchiwane jest powietrze, które wylatuje przez otworki. Jeśli na torze położymy ślizgacz o odpowiednim kształcie, wydmuchiwane powietrze utworzy pod nim poduszkę powietrzną, na której ślizgacz będzie się poruszać bez tarcia.

Nauczyciel wypoziomował tor powietrzny, po czym zaznaczył kredą na taśmie mierniczej przytwierdzonej do toru 9 kresek w odstępach 20 cm. Nadał im numery od 0 do 8. Następnie poprosił o podejście 8 uczniów ze stoperami. Każdy uczeń wybrał jedną kreskę (z wyjątkiem początkowej) i stanął naprzeciwko niej. Nauczyciel poinformował uczniów, że wprawi ślizgacz w ruch. Gdy początek ślizgacza dotknie kreski zerowej, powie „start”. Na ten sygnał wszyscy uczniowie mają włączyć stopery. Następnie każdy uczeń ma wyłączyć swój stoper, gdy zobaczy, że początek ślizgacza dotknął „jego” kreski.



Rys. 6. Tor powietrzny.





2. KINEMATYKA

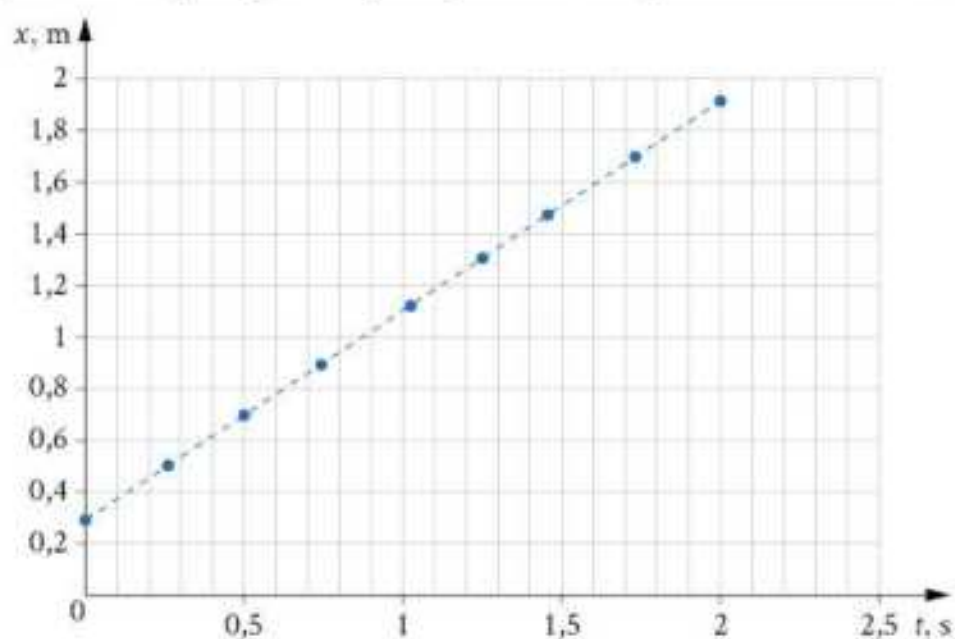
Uczniowie wykonali doświadczenie, a wyniki pomiarów czasów t dla poszczególnych położań ślizgacza zapisali na tablicy w postaci następującej tabeli:

Nr kreski	0	1	2	3	4	5	6	7	8
x, m	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9
t, s	0	0,27	0,51	0,74	1,02	1,26	1,49	1,77	2,02

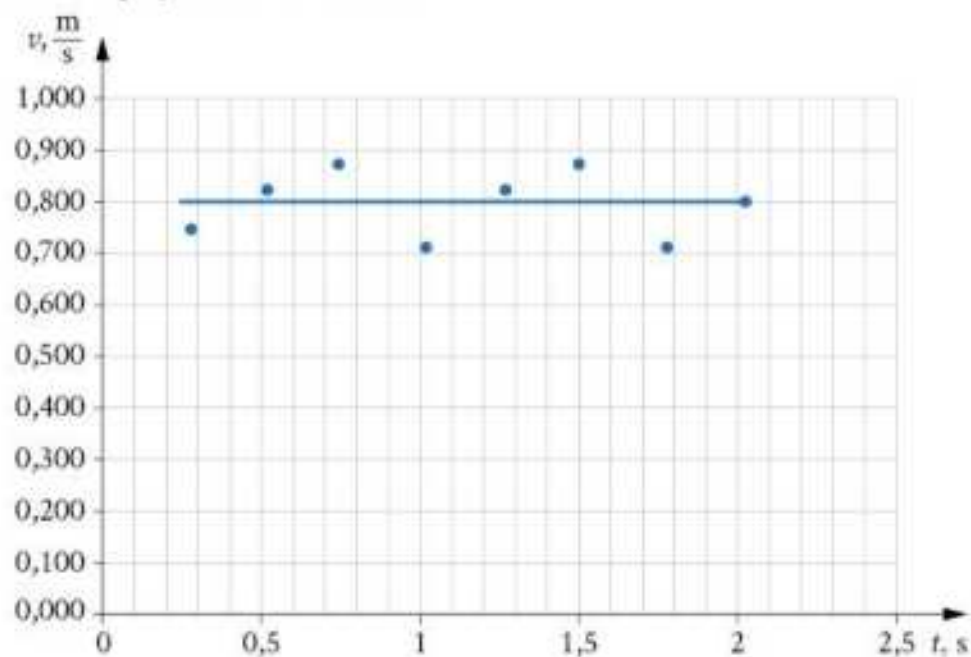
Na tej podstawie stworzyli drugą tabelę zawierającą długości wektora przemieszczenia pomiędzy poszczególnymi kreskami oraz czasy przebycia ślizgacza od danej kreski do następnej. Dzieląc długości przemieszczeń przez czasy, otrzymali wartości prędkości na poszczególnych odcinkach.

$\Delta x, \text{m}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\Delta t, \text{s}$	0,27	0,24	0,23	0,28	0,24	0,23	0,28	0,25
$v, \frac{\text{m}}{\text{s}}$	0,741	0,833	0,870	0,714	0,833	0,870	0,714	0,800

Na tej podstawie sporządzili wykresy zależności położenia od czasu:



oraz zależności prędkości od czasu:





Ze względu na niedokładność wyników pomiarów punkty nie układają się idealnie na prostych, niemniej nie ulega wątpliwości, że wykres zależności położenia od czasu przybiera postać prostej nachylonej pod pewnym kątem do osi czasu, natomiast wykres prędkości od czasu ma postać prostej poziomej.

W powyższym doświadczeniu drogi były ustalone odgórnie (można je było zaznaczyć z dużą precyzją), natomiast pomiar czasu podlegał fluktuacjom wynikającym z niedoskonałego refleksu uczniów. Można też zrobić odwrotnie: ustalić równe odstępy czasu i mierzyć pokonywane drogi.

Doświadczenie 2.

Do doświadczenia użyto metronomu oraz pionowej rurki wypełnionej wodą, w której zostawiono pęcherzyk powietrza. Metronom (rys. 7.) jest narzędziem używanym głównie przez muzyków i służy do rytmicznego odmierzania czasu. Ma postać odwróconego wahadła o regulowanej długości, co pozwala na ustawienie okresu drgań. Każde wachnięcie metronomu sygnalizowane jest dźwiękowo w postaci tyknięcia. W doświadczeniu metronom tykał co sekundę.



Rys. 7. Metronom i przyrząd do badania ruchu jednostajnego (rurka z wodą i pęcherzykiem powietrza przymocowana do podziałki).

W rurce z wodą na pęcherzyk powietrza działa stała siła wyporu równoważona przez siły oporu ruchu stawiane przez wodę. Dlatego ruch pęcherzyka możemy traktować jako jednostajny. Rurka przymocowana jest do linijki z podziałką umożliwiającą odczytanie położenia pęcherzyka.

Zadaniem ucznia było podążać pisakiem zmywalnym za poruszającym się pęcherzykiem i zaznaczać na rurce położenia pęcherzyka podczas każdego tyknięcia metronomu. Wyniki pomiarów zostały przedstawione w tabeli:

$\Delta t, s$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta x, m$	0,06	0,175	0,29	0,40	0,52	0,635	0,75	0,86	0,98

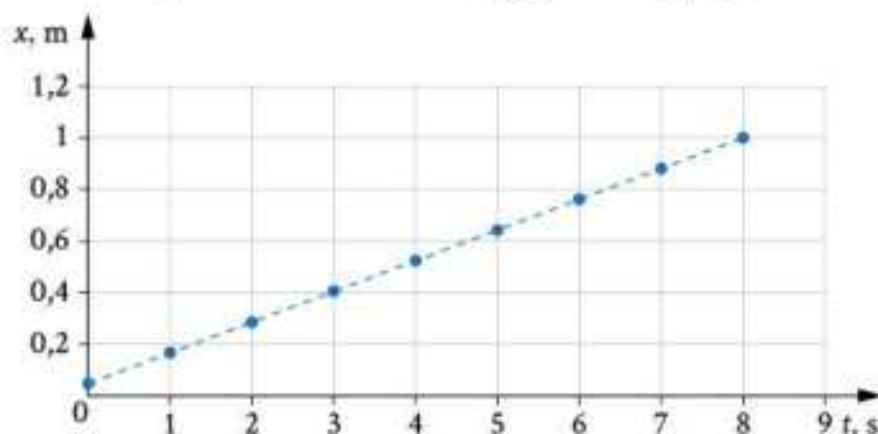


2. KINEMATYKA

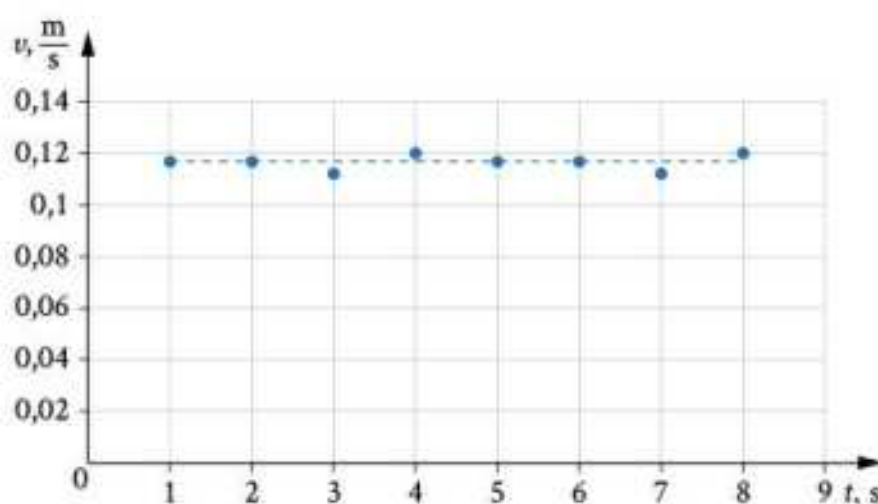
Na tej podstawie można sporządzić analogiczną tabelkę z przedziałami czasu i przemieszczeniami oraz obliczyć prędkości w poszczególnych jednostkach czasu:

$\Delta t, \text{s}$	1	1	1	1	1	1	1	1
$\Delta x, \text{m}$	0,115	0,115	0,11	0,12	0,115	0,115	0,11	0,12
$v, \frac{\text{m}}{\text{s}}$	0,115	0,115	0,11	0,12	0,115	0,115	0,11	0,12

Wykres zależności położenia od czasu wygląda następująco:



Wykres zależności prędkości od czasu:



Podobnie jak poprzednio, punkty na wykresie zależności położenia od czasu ułożyły się mniej więcej wzdłuż prostej ukośnej, a na wykresie zależności prędkości od czasu – wzdłuż prostej poziomej.

W powyższych doświadczeniach badaliśmy ruch jednostajny prostoliniowy. Jest to najprostszy przypadek ruchu.

ruch jednostajny
prostoliniowy

cechy ruchu
jednostajnego
prostoliniowego

Ruch jednostajny prostoliniowy to taki ruch, którego torem jest linia prosta, a wartość prędkości nie ulega zmianie.

Ruch ten ma następujące cechy:

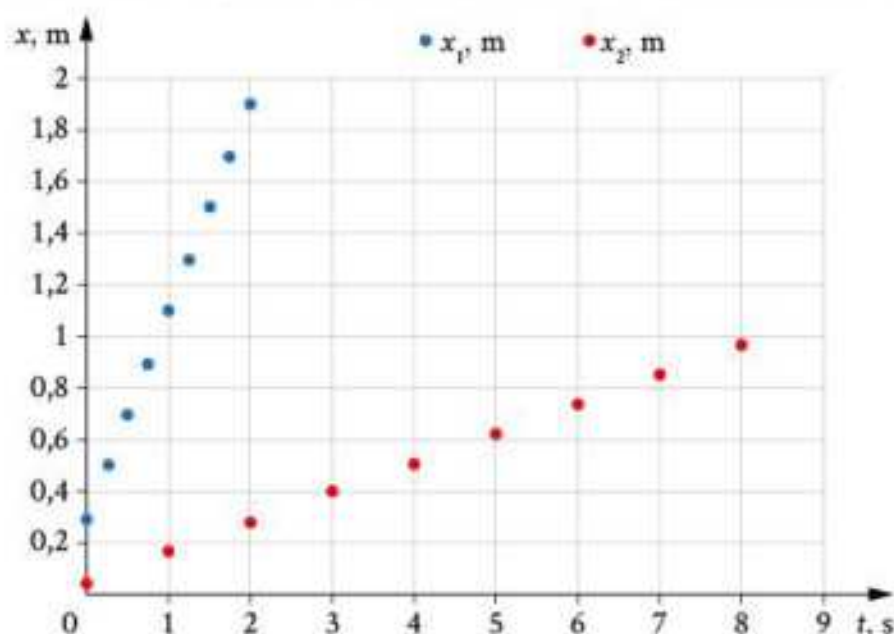
1. W jednakowych przedziałach czasu ciało przebywa jednakowe odcinki drogi.
2. Droga jest wprost proporcjonalna do czasu, w którym została przebyta.



3. Wykres zależności położenia od czasu jest prostą nachyloną do osi odciętych pod pewnym kątem.

4. Wykres zależności prędkości od czasu jest linią równoległą do osi czasu.

Zbierzmy na wspólnym wykresie wyniki pomiarów z doświadczeń 1 i 2.



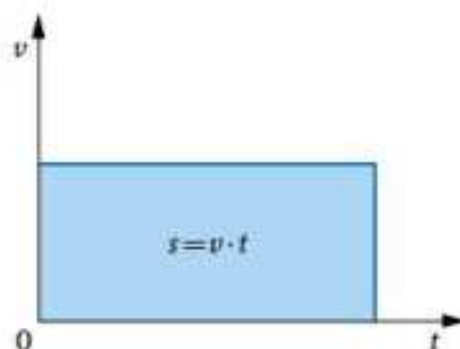
Rys. 8. Im większa prędkość, tym większe nachylenie wykresu drogi od czasu do osi odciętych.

Zauważmy, że w doświadczeniu pierwszym punkty układają się wzdłuż prostej nachylonej pod większym kątem, ponieważ prędkość była większa. Im większa prędkość, tym większy kąt nachylenia prostej. Z kolei na wykresie zależności prędkości od czasu im większa prędkość, tym wyżej znajduje się odpowiadająca jej linia.

Wzory wyrażające prędkość, drogę i czas w ruchu jednostajnym są szczególnie proste. Ponieważ prędkość jest stała, wzór $v = \frac{s}{t}$ można przekształcić, uzyskując wzór na drogę, gdy znamy prędkość i czas:

$$s = v \cdot t.$$

Przyjrzyjmy się jeszcze raz wykresowi zależności prędkości od czasu (rys. 9).



Rys. 9. Droga na wykresie zależności prędkości od czasu.



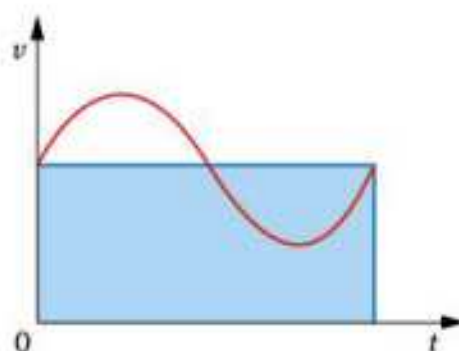
graficzna
interpretacja wzoru
na drogę

warunki
stosowania wzoru
na drogę $s = vt$

Jak widać, droga w ruchu jednostajnym jest liczbowo równa polu prostokąta utworzonego przez wykres prędkości, oś czasu i linie pionowe odpowiadające momentom rozpoczęcia i zakończenia ruchu. Obserwację tę można uogólnić stwierdzając, że **w dowolnym ruchu droga jest zawsze liczbowo równa polu figury ograniczonej wykresem prędkości i osią czasu.**

Wynika z tego, że użyteczność wzoru na drogę $s = v \cdot t$ jest ograniczona do 2 przypadków:

1. prędkość jest stała, wtedy figura pod wykresem prędkości jest prostokątem,
2. mowa jest o prędkości średniej – wtedy pole dowolnej figury utworzonej przez zmienną prędkość chwilową zastępujemy polem prostokąta (rys. 10.). Prędkość średnia w ruchu zmiennym ma taką wartość, że gdyby poruszać się z nią w sposób jednostajny, przebylibyśmy całkowitą drogę w tym samym czasie, co w ruchu zmiennym.



Rys. 10. Pole figury pod wykresem prędkości zmiennej jest takie samo, jak pole prostokąta. Wysokość prostokąta jest liczbowo równa prędkości średniej w ruchu niejednostajnym.

Wzór na drogę $s = v \cdot t$ można stosować tylko w ruchu jednostajnym lub w odniesieniu do prędkości średniej.

Przykład 1.

Odległość z Katowic do Poznania wynosi 370 km. O której godzinie należy wyjechać z Katowic, aby dotrzeć do Poznania o godzinie 20.00? Zakładamy średnią prędkość jazdy równą $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Rozwiązanie:

Dane:

$$s = 370 \text{ km}$$

$$v = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Szukane:

$$t = ?$$

W zadaniach tego typu zazwyczaj nie musimy zamieniać kilometrów na godzinę na metry na sekundę.



Ze wzoru $v = \frac{s}{t}$ otrzymujemy:

$$t = \frac{s}{v}, \quad t = \frac{370 \text{ km}}{80 \frac{\text{km}}{\text{h}}} = 4,63 \text{ h} = 4 \text{ h } 38 \text{ min.}$$

Odejmując tę wartość od godziny 20.00, otrzymujemy, że należy wyjechać z Katowic o godzinie 15.22.

Przykład 2.

Równolegle do drogi biegną tory kolejowe. Po torze jedzie pociąg towarowy o długości 400 m z prędkością $54 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Mija go samochód osobowy jadący w tę samą stronę z prędkością $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Jak długo będzie trwać wyprzedzanie pociągu przez samochód?

Wskazówka: samochód traktujemy jako obiekt punktowy, należy obliczyć czas od momentu zrównania samochodu z tyłem pociągu do momentu zrównania z przodem pociągu.

Rozwiązanie:

Dane:

$$v_1 = 54 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_2 = 90 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$l = 400 \text{ m}$$

Szukane:

$$t = ?$$

Tym razem zamieniliśmy jednostki, ponieważ długość pociągu wyrażona jest w metrach, a spodziewany czas wyprzedzania będzie trwał sekundy. To zadanie można łatwo rozwiązać, korzystając ze względności ruchu. Prędkość samochodu względem pociągu wynosi:

$$v_2 - v_1 = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Z tą prędkością samochód musi przesunąć się z końca pociągu do jego początku, czyli droga $s = l = (v_2 - v_1)t$. Zajmie mu to:

$$t = \frac{l}{v_2 - v_1}$$

Podstawiając dane liczbowe, otrzymujemy:

$$t = \frac{400 \text{ m}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 40 \text{ s}$$

Odpowiedź:

Wyprzedzanie pociągu przez samochód będzie trwać 40 sekund.





ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Fragment rozkładu jazdy Przeworskiej Kolejki Wąskotorowej przedstawia tabela.

km	Stacja	Przyjazd	Odjazd
0	Przeworsk Wąski		9.00
9	Urzejowice	9.22	9.23
11	Krzeczowice	9.29	9.30
15	Kańczuga	9.38	9.40
18	Łopuszka	9.46	9.47

Oblicz w zeszycie:

- ile trwają łącznie postoje pociągu na wymienionych stacjach;
- na którym odcinku między stacjami prędkość pociągu jest największa, a na którym najmniejsza;
- jaka jest średnia prędkość pociągu od wyjazdu z Przeworska do przyjazdu do Łopuszki.

Wskazówka: pierwsza kolumna zawiera kilometr bieżący szlaku.

2. Dwaj biegacze zamierzają przebiec 20 km. Pierwszy z nich pierwsze 15 km biegł z prędkością $18 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, po czym osłabł i resztę trasy przebiegł z prędkością $12 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Drugi biegacz cały czas utrzymywał prędkość $15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

- Który biegacz szybciej dobiegł do mety i o ile minut?
- Wyjaśnij, dlaczego biegacze nie dotarli do mety jednocześnie, mimo że $15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ to średnia arytmetyczna liczb $12 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ i $18 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

3. Samochód pierwszą połowę drogi przejechał z prędkością $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, a drugą z prędkością $40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Oblicz w zeszycie średnią prędkość samochodu na całej trasie.

4. Przestępca dokonał kradzieży i zaczął uciekać z prędkością $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Zdarzenie dostrzegł policjant znajdujący się w odległości 20 m i w tym samym momencie zaczął biec za przestępcą z prędkością $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Po jakim czasie i w jakiej odległości od miejsca kradzieży policjant dogoni przestępcę?

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 40 • Ruch jednostajny prostoliniowy to taki, którego torem jest linia prosta, a wartość prędkości nie ulega zmianie.
- s. 40 • W ruchu jednostajnym w jednakowych odstępach czasu przemieszczenia ciała są jednakowe.
- s. 40 • Droga przebyta w ruchu jednostajnym jest wprost proporcjonalna do czasu. Wykresem zależności drogi od czasu w ruchu jednostajnym jest prosta nachylona do osi czasu pod pewnym kątem. Kąt ten jest tym większy, im większa jest wartość prędkości.
- s. 40 • Wykresem zależności prędkości od czasu w ruchu jednostajnym jest prosta pozioma.
- s. 42 • Droga jest liczbowo równa polu figury ograniczonej wykresem prędkości i osią czasu.
- s. 42 • Wzorów $v = \frac{s}{t}$, $s = v \cdot t$ można używać w opisie ruchu jednostajnego oraz w zadaniach na prędkość średnią. Nie wolno ich stosować do prędkości chwilowej w ruchu zmiennym.



3. Ruch prostoliniowy, jednostajnie przyspieszony

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie podstawowe wiadomości o ruchu jednostajnie przyspieszonym;
- nauczysz się obliczać drogę i prędkość w tym ruchu.

Idealny ruch jednostajny jest bardzo trudny do uzyskania w praktyce. Aby ciało nie zmieniał prędkości, wszystkie działające na niego siły muszą się dokładnie równoważyć. O wiele częściej ciała zmieniają prędkość. Tak się dzieje na przykład podczas spadku swobodnego oraz podczas zsuwania się ciała po równi pochyłej. Są to dwa przykłady ruchu jednostajnie przyspieszonego. Przyczyną przyspieszenia ciała jest działanie niezrównoważonej siły.

Ruchem prostoliniowym jednostajnie przyspieszonym nazywamy taki ruch, którego torem jest linia prosta i w którym wektor przyspieszenia jest stały (zarówno co do wartości, jak i do kierunku), a ponadto zwrot wektora przyspieszenia jest zgodny ze zwrotem wektora prędkości. W ruchu takim w jednakowych odstępach czasu prędkość wzrasta o jednakową wartość.

ruch jednostajnie przyspieszony prostoliniowy

Ruch jednostajnie przyspieszony prostoliniowy to taki, którego torem jest linia prosta i w jednakowych przedziałach czasu prędkość rośnie o tę samą wartość.

Ponieważ kierunki wektorów prędkości i przyspieszenia nie ulegają zmianie, strzałki przy symbolach tych wielkości można pominąć i operować dalej wartościami wektorów. Przeanalizujemy wobec tego wzór na przyspieszenie, mając na uwadze, że przyrost prędkości Δv jest różnicą prędkości końcowej v_k i prędkości początkowej v_0 .

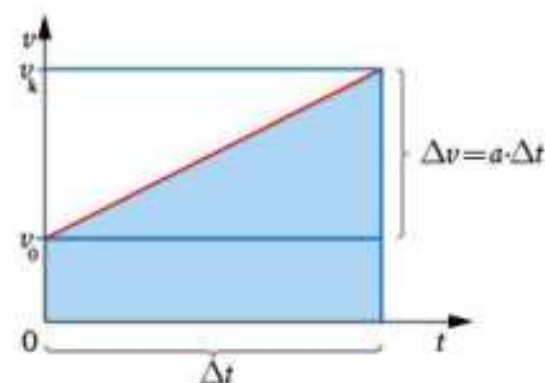
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_k - v_0}{\Delta t}$$

$$v_k - v_0 = a \cdot \Delta t$$

$$v_k = v_0 + a \cdot \Delta t$$

Ostatni wzór wyraża **wartość prędkości końcowej** ciała w ruchu jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem a i prędkością początkową v_0 . Wynikają z niego następujące wnioski:

1. Przyrost prędkości jest proporcjonalny do przedziału czasu, w którym ten przyrost nastąpił.
2. Wykresem zależności prędkości od czasu jest linia prosta nachylna do osi czasu pod pewnym kątem (zależnym od przyspieszenia) i przesunięta w górę o v_0 (rys. 11.).



Rys. 11. Zależność prędkości od czasu dla ruchu jednostajnie przyspieszonego.

wartość prędkości
końcowej

W ruchu jednostajnie przyspieszonym wartość prędkości końcowej obliczamy ze wzoru $v_k = v_0 + a \cdot \Delta t$.

Zajmijmy się teraz obliczeniem drogi w ruchu jednostajnie przyspieszonym. W dalszych rozważaniach będziemy przyjmować, że upływ czasu będziemy mierzyć od chwili $t = 0$, czyli $\Delta t = t$. Z poprzedniej lekcji wiesz już, że wzór na drogę w ruchu jednostajnym nie ma zastosowania w ruchach zmiennych. Do wszystkich ruchów odnosi się jednak zasada ogólniejsza – droga jest liczbowo równa polu figury pod wykresem zależności prędkości od czasu. Jak widać na rysunku 11., w ruchu jednostajnie przyspieszonym tą figurą jest trapez. Można go podzielić na prostokąt o długości podstawy t i wysokości v_0 oraz trójkąt o podstawie t i wysokości $a \cdot t$. Pole całej figury jest wobec tego równe:

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} \Delta v t,$$

a ponieważ $\Delta v = at$, więc:

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2.$$

Powyższy wzór wyraża drogę, jaką w czasie t przebędzie ciało poruszające się ruchem jednostajnie przyspieszonym z prędkością początkową v_0 i przyspieszeniem a .

droga w ruchu
jednostajnie
przyspieszonym

W ruchu jednostajnie przyspieszonym drogę obliczamy ze wzoru $s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$.

Jest to przypadek ogólny. Często mamy jednak do czynienia z sytuacją, że ciało rusza z miejsca, to znaczy jego prędkość początkowa wynosi 0. Wtedy wzory na prędkość końcową i drogę przyjmują prostszą postać:

$$v_k = a \cdot t$$

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

Wynika z nich, że:

1. prędkość końcowa jest wprost proporcjonalna do czasu trwania ruchu,
2. droga jest proporcjonalna do kwadratu czasu.

Jeśli prędkość początkowa ciała w ruchu jednostajnie przyspieszonym jest równa 0, to wartość prędkości końcowej obliczamy ze wzoru $v_k = a \cdot t$, a drogę ze wzoru $s = \frac{1}{2} at^2$.

Doświadczenie

Skonstruuuj równię pochyłą do obserwacji ruchu jednostajnie przyspieszonego. Może to być tor powietrzny nachylony pod pewnym niewielkim kątem, ale też na przykład rynienka, w której stacza się mała kulka lub deska, z której zjeżdża samochodzik. Zaznacz na równi położenie początkowe ciała i odmierz kolejno (jeden za drugim) cztery odcinki o długościach pozostających w proporcji 1:3:5:7. W zależności od długości całej równi ich długości mogą wynosić na przykład 10 cm, 30 cm, 50 cm i 70 cm lub 5 cm, 15 cm, 25 cm i 35 cm. Zaznacz wyraźnie



końce tych odcinków. Następnie puść swobodnie ciało na równi z zaznaczonego punktu początkowego i odliczaj na głos „raz, dwa, trzy, cztery”, ilekroć ciało dojdzie do kolejnej kreski. Co zauważyłeś/zauważyłaś?

Teraz zwiększ nachylenie równi i powtórz eksperyment. Co zauważyłeś/zauważyłaś?

Powtórz eksperyment jeszcze raz, stosując mniejsze nachylenie niż na początku. Co zauważyłeś/zauważyłaś?

Jeśli badany ruch był rzeczywiście jednostajnie przyspieszony, to odliczanie powinno być miarowe. Przy większym nachyleniu równi odliczanie będzie szybsze, przy mniejszym – wolniejsze, ale zawsze przedziały czasu potrzebne do pokonania kolejnych odcinków (przy danym nachyleniu równi) będą jednakowe. Wynika stąd wniosek, że drogi pokonywane w jednakowych przedziałach czasu mają się do siebie jak kolejne liczby nieparzyste.

W ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej drogi pokonywane w kolejnych jednakowych przedziałach czasu mają się do siebie jak kolejne liczby nieparzyste.

$$s_1:s_2:s_3:s_4:\dots = 1:3:5:7:\dots$$

Długości tych przedziałów czasu nie mają znaczenia, byle były jednakowe. Przyjmijmy więc, że to są sekundy. W pierwszej sekundzie ciało przebywa więc 1 jednostkę długości, w drugiej 3, w trzeciej 5 i w czwartej 7 (oczywiście dla każdego nachylenia równi długości tych jednostek będą inne). Obliczmy więc, ile jednostek długości przebędzie ciało od początku ruchu do końca kolejnych sekund:

Jedna sekunda:	$s = s_1$	$= 1$	$= 1 = 1^2$
Dwie sekundy:	$s = s_1 + s_2$	$= 1 + 3$	$= 4 = 2^2$
Trzy sekundy:	$s = s_1 + s_2 + s_3$	$= 1 + 3 + 5$	$= 9 = 3^2$
Cztery sekundy:	$s = s_1 + s_2 + s_3 + s_4$	$= 1 + 3 + 5 + 7$	$= 16 = 4^2$

W ten sposób potwierdziliśmy doświadczalnie fakt, który wcześniej wydedukowaliśmy na drodze teoretycznej: w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej droga jest proporcjonalna do kwadratu czasu.

W ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej droga jest proporcjonalna do kwadratu czasu, w którym została ona przebyta.

Przykład 1.

Pociąg rusza ze stacji z przyspieszeniem $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Oblicz prędkość pociągu po upływie minuty i drogę, jaką przebędzie w tym czasie.

Rozwiązanie:

odcinki drogi
w ruchu
jednostajnie
przyspieszonym
bez prędkości
początkowej





Dane:

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

$$t = 60 \text{ s}$$

Szukane:

$$v_k = ?, s = ?$$

$$v_k = a \cdot t, v_k = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 60 \text{ s} = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$s = \frac{1}{2} a t^2, s = 900 \text{ m}$$

Odpowiedź:

W ciągu minuty pociąg rozpędzi się do $30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ i przebędzie drogę 900 m.

Zauważmy w powyższym przykładzie, że gdyby pociąg cały czas jechał z prędkością równą prędkości końcowej, to w ciągu minuty przejechałby 1800 m. Ponieważ jego początkowa prędkość wynosiła 0, to droga jest dwa razy mniejsza. Ogólnie w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej słuszna jest zależność:

$$s = \frac{1}{2} v_k t$$

Jeśli prędkość początkowa jest różna od zera, to drogę możemy obliczyć ze wzoru:

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

Jest to konsekwencja faktu, że **prędkość średnia w ruchu jednostajnie przyspieszonym** jest równa średniej arytmetycznej prędkości początkowej i końcowej.

Przykład 2.

Ciało porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej. W ciągu drugiej sekundy ruchu przebyło dystans 1,2 m. Jaką drogę przebędzie to ciało w piątej sekundzie ruchu?

Rozwiązanie:

Stosunek drogi pokonanej w piątej sekundzie ruchu do drogi w drugiej sekundzie jest równy stosunkowi piątej liczby nieparzystej do drugiej liczby nieparzystej. Zatem:

$$\frac{s_5}{s_2} = \frac{9}{3} = 3 \Rightarrow s_5 = 3s_2 = 3,6 \text{ m}$$

Odpowiedź:

W piątej sekundzie ciało przebędzie dystans 3,6 m.

Przykład 3.

Samochód stojący na poboczu szosy poza terenem zabudowanym ruszył z przyspieszeniem $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Oblicz drogę, jaką przejedzie, zanim rozpędzi się do maksymalnej dopuszczalnej prędkości $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Rozwiązanie:

Dane:

$$a = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v_k = 90 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

prędkość średnia
w ruchu
jednostajnie
przyspieszonym





Nieznany jest czas tego ruchu. Można by go obliczyć i podstawić do wzoru na drogę, jednak zastosujemy tutaj inną metodę: wyprowadzimy wzór na drogę, w którym czas będzie niepotrzebny.

$$s = \frac{1}{2}at^2, v_k = at \Rightarrow t = \frac{v_k}{a}$$

Wstawiając wyrażenie na czas do wzoru na drogę, otrzymujemy:

$$s = \frac{1}{2} \frac{v_k^2}{a} = 156 \text{ m}$$

Odpowiedź:

Samochód potrzebuje 156 metrów, aby z przyspieszeniem $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ rozpędzić się do prędkości $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Samochód ruszył z miejsca i w ciągu 16 sekund osiągnął prędkość $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Oblicz w zeszycie przyspieszenie tego samochodu.
2. Ciało porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej. W ciągu 1 sekundy przemieściło się o 2 m. Oblicz w zeszycie drogę tego ciała w ciągu 4 pierwszych sekund ruchu.
3. Motocyklista rozpędził się do $108 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ na drodze 120 m. Oblicz przyspieszenie motocyklisty i czas, w jakim się rozpędził. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.
4. Rowerzysta jechał przez 5 sekund ze stałą prędkością $18 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. W ciągu kolejnych 5 sekund jechał ze stałym przyspieszeniem i zwiększył prędkość do $36 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Narysuj wykres zależności prędkości rowerzysty od czasu. Oblicz drogę, jaką przejechał ten rowerzysta w ciągu opisanych 10 sekund.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- W ruchu jednostajnie przyspieszonym prostoliniowym torem jest linia prosta, a prędkość rośnie o tę samą wartość w jednakowych przedziałach czasu. s. 45
- Przyrost prędkości w ruchu jednostajnie przyspieszonym jest proporcjonalny do czasu. s. 46
- Jeśli prędkość początkowa w ruchu przyspieszonym wynosi 0, to droga jest proporcjonalna do kwadratu czasu. s. 46
- W ruchu przyspieszonym bez prędkości początkowej stosunek dróg przebywanych w kolejnych jednakowych odstępach czasu jest równy stosunkowi kolejnych liczb nieparzystych. s. 47
- Prędkość średnia w ruchu jednostajnie przyspieszonym jest równa średniej arytmetycznej prędkości początkowej i prędkości końcowej. s. 48



4. Ruch prostoliniowy, jednostajnie opóźniony

NA TEJ LEKCJI

- poznasz szczegóły dotyczące ruchu jednostajnie opóźnionego;
- dowiesz się, jak w prosty sposób obliczać drogę w złożonym ruchu jednostajnie zmiennym.

Zajmiemy się dzisiaj odmianą ruchu jednostajnie zmiennego, jaką jest ruch jednostajnie opóźniony. Jest on często spotykany w życiu codziennym. Taki ruch wykonuje na przykład kamień rzucony pionowo w górę albo dowolne ciało zmniejszające prędkość pod wpływem siły tarcia.

Doświadczenie

Rozłóż na poziomym stole lub równej podłodze papierową taśmę mierniczą (można ją dostać za darmo na przykład w sklepach budowlanych). Popchnij zabawkowy samochodzik, kulkę lub na przykład ołówek w kształcie walca tak, by toczył się swobodnie wzdłuż taśmy. W kolejnych sekundach (może je na głos odliczać kolega/koleżanka) zaznaczaj położenie obiektu na taśmie. Co zauważyłeś/zauważyłaś?

Ruchem jednostajnie opóźnionym nazywamy taki ruch, w którym w jednakowych przedziałach czasu prędkość maleje o tę samą wartość.

różnice między
ruchem jednostajnie
opóźnionym
a jednostajnie
przyspieszonym

Pod wieloma względami ruch jednostajnie opóźniony jest analogiczny do ruchu jednostajnie przyspieszonego. W zasadzie można go opisać tymi samymi wzorami, niemniej trzeba mieć na uwadze kilka różnic:

- Zwrot wektora przyspieszenia jest w tym ruchu przeciwny do zwrotu wektora prędkości.
- We wzorach przyspieszenie przyjmuje wartości ujemne i nazywamy je **opóźnieniem**. Zdanie *opóźnienie w ruchu wynosi $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$* oznacza to samo, co *przyspieszenie w ruchu wynosi $-2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$* .
- W przeciwieństwie do ruchu przyspieszonego, w ruchu opóźnionym ciało musi posiadać prędkość początkową, która potem maleje.
- Ruch przyspieszony może trwać dowolnie długo. Ruch opóźniony kończy się najpóźniej w momencie zatrzymania się ciała.

opóźnienie



wartość prędkości
końcowej w ruchu
opóźnionym

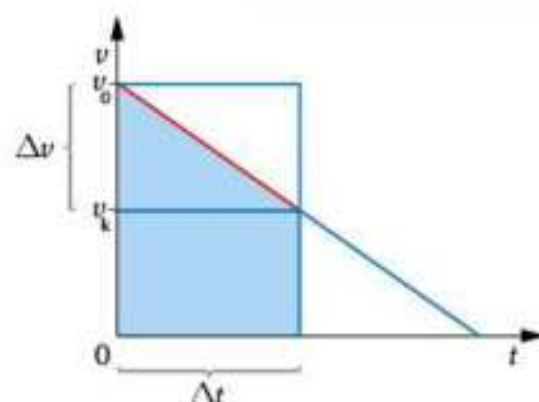
Wzór na prędkość ciała w ruchu opóźnionym przyjmuje postać:

$$v_k = v_0 - a \cdot \Delta t$$

gdzie $a = \frac{v_0 - v_k}{\Delta t}$ to właśnie opóźnienie. Zwróćmy uwagę na kolejność wyrazów w liczniku: od wartości większej odejmujemy mniejszą.

Powyższy wzór na prędkość jest równaniem funkcji liniowej malejącej. Jej wykres przedstawiony jest na rys. 12.

Drogę w tym ruchu odczytamy jako pole figury ograniczonej wykresem prędkości, osią czasu oraz liniami pionowymi odpowiadającymi chwili początkowej i końcowej. Figurą tą jest trapez o podstawach v_0 i v_k oraz wysokości Δt . Jeśli czas mierzymy od wartości 0, symbol delty pomijamy. Pole to możemy obliczyć na dwa sposoby.



Rys. 12. Zależność prędkości od czasu w ruchu jednostajnie opóźnionym.

1. Bezpośrednio ze wzoru na pole trapezu. Otrzymujemy:

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

identycznie jak w ruchu przyspieszonym. Różnica polega tylko na tym, że v_0 i v_k na rysunku zamieniły się miejscami.

2. Od pola prostokąta o wysokości v_0 możemy odjąć pole trójkąta o podstawie t i wysokości $\Delta v = a \cdot t$. W takim przypadku:

$$s = v_0 t - \frac{1}{2} a t^2$$

Oba te wzory są równoważne. Stosujemy ten, który w danym przypadku jest dla nas wygodniejszy.

Można zadać pytanie, jak długo może trwać ruch przyspieszony i jaką drogę przebędzie ciało do momentu zatrzymania. Sytuację ilustruje rysunek 13.

Obliczmy, ile czasu mija od momentu rozpoczęcia ruchu opóźnionego do momentu zatrzymania. W tym celu we wzorze na prędkość końcową podstawmy $v_k = 0$:

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

$$a \cdot t = v_0$$

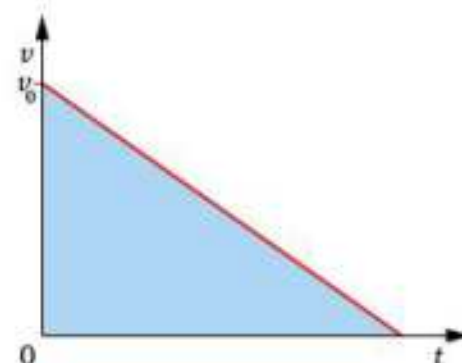
$$t = \frac{v_0}{a}$$

Jest to czas, po którym ciało, które wystartowało z prędkością v_0 i poruszało się ruchem jednostajnie opóźnionym z opóźnieniem a , zatrzyma się.

Droga, jaką przebędzie ciało do momentu zatrzymania się, będzie liczbowo równa polu trójkąta przedstawionego na rysunku 13. Jego wysokość wynosi v_0 , a długość podstawy t . W takim razie:

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

Zwróćmy uwagę, że jest to szczególny przypadek wzoru na drogę, który podaliśmy wcześniej, w którym podstawimy $v_k = 0$.



Rys. 13. Zależność prędkości od czasu dla ruchu jednostajnie opóźnionego, trwającego do momentu zatrzymania.

**Przykład 1.**

Benek podrzucił pionowo w górę kamień z prędkością $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Oblicz, jak długo kamień będzie się wznosić oraz jaką wysokość osiągnie. Przyjmij przybliżoną wartość przyspieszenia ziemskiego $g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Rozwiązanie:

Dane

$$v_0 = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

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

Kamień został podrzucony w górę, a przyspieszenie ziemskie jest skierowane w dół. Będzie to więc ruch jednostajnie opóźniony. Za opóźnienie wstawiamy przyspieszenie ziemskie.

Czas wznoszenia obliczamy ze wzoru:

$$\Delta t = \frac{v_0}{g}, \Delta t = \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,5 \text{ s}$$

Przebyta droga, którą oznaczamy jako wysokość h :

$$h = \frac{1}{2} v_0 t, h = \frac{1}{2} \cdot 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,5 \text{ s} = 1,25 \text{ m}$$

Odpowiedź:

Kamień będzie się wznosił przez 0,5 sekundy i osiągnie wysokość 1,25 metra.

**Przykład 2.**

Z jaką prędkością należy podrzucić kamień, aby wznosił się na wysokość 5 m?

Rozwiązanie:

Dane:

$$s = 5 \text{ m}$$

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

Podstawmy do wzoru na drogę w ruchu jednostajnie opóźnionym:

$$h = \frac{1}{2} v_0 t$$

wyrażenie na czas wznoszenia:

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

Stąd:

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

Po przekształceniu otrzymujemy:

$$v_0^2 = 2gh \Rightarrow v_0 = \sqrt{2gh}, v_0 = \sqrt{2 \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5 \text{ m}} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Odpowiedź:

Aby kamień wznosił się na wysokość 5 metrów, trzeba go podrzucić z prędkością $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.



obliczanie drogi
w dowolnym ruchu

Świadomość faktu, że **droga w dowolnym ruchu** jest liczbowo równa polu figury ograniczonej wykresem prędkości i osią czasu, pozwala w łatwy sposób rozwiązywać pozornie trudne zadania i to bez znajomości przytoczonych na kilku ostatnich stronach wzorów. Wystarczy umieć obliczać pola figur geometrycznych.

Przykład 3.

Rowerzysta wyruszył z miejsca i przez 5 sekund poruszał się ze stałym przyspieszeniem, osiągając prędkość $6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Przez następne 12 sekund poruszał się ze stałą

prędkością, po czym hamował ze stałym opóźnieniem $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ i się zatrzymał.

a) Sporządź wykres zależności prędkości rowerzysty od czasu.

b*) Sporządź wykres zależności przyspieszenia rowerzysty od czasu.

c) Oblicz drogę, jaką przejechał rowerzysta.

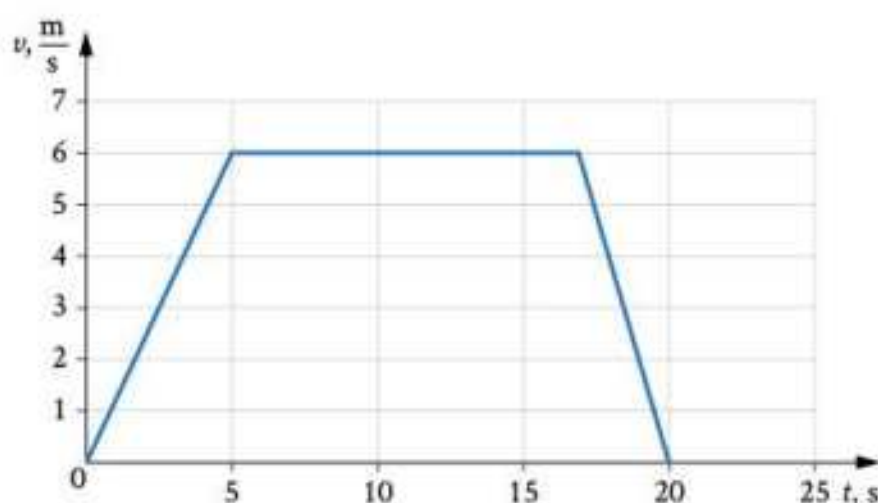
d) Oblicz prędkość średnią rowerzysty.

Rozwiązanie:

a) Jak łatwo obliczyć, czas potrzebny na zmniejszenie się prędkości od $6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ do

zera w ruchu jednostajnie opóźnionym z opóźnieniem $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ wynosi 3 sekundy.

Cały ruch trwał więc $5 + 12 + 3 = 20$ sekund. Należy to wziąć pod uwagę podczas skalowania osi. Z kolei największa wartość prędkości na osi pionowej wynosi $6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Wykres zależności prędkości od czasu wygląda więc następująco:

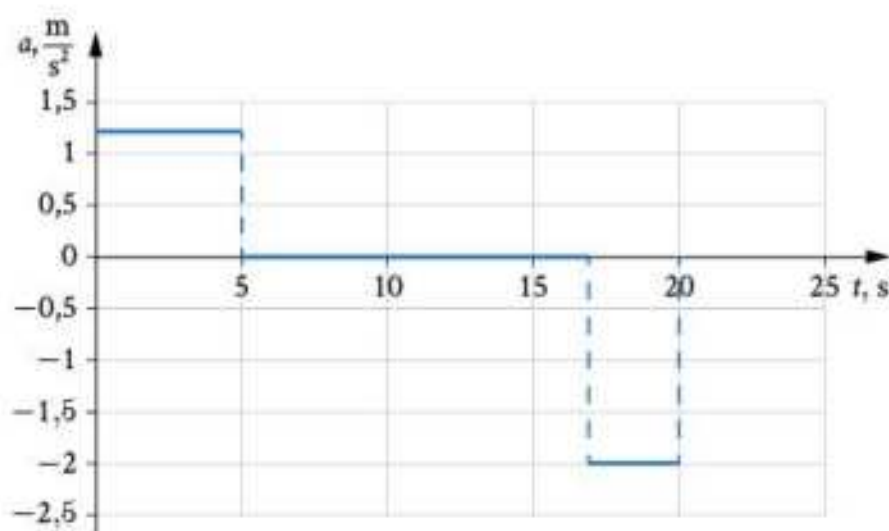


b*) Przyspieszenie w pierwszych 5 sekundach ruchu rowerzysty wynosiło

$\frac{6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5 \text{ s}} = 1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. W ciągu kolejnych 12 sekund rowerzysta poruszał się jednostajnie,

więc jego przyspieszenie wynosiło 0. W ostatnich 3 sekundach poruszał się z opóźnieniem $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Oś przyspieszenia należy tak wyskalować, by zmieścić na

niej wartości 1,2, 0 i -2. Drugi wykres, $a(t)$, wygląda następująco:



c) Droga, jaką przejechał rowerzysta, jest liczbowo równa polu figury pod wykresem prędkości. Widzimy, że jest to zwykły trapez o długościach podstaw 20 i 12 jednostek oraz wysokości 6 jednostek. Jego pole wynosi $s = \frac{20+12}{2} \cdot 6 = 96$ i jest to przebyty dystans w metrach. Identyczny wynik otrzymamy, sumując drogi obliczone kolejno na podstawie wzorów dla ruchu przyspieszonego, jednostajnego i opóźnionego.

d) Prędkość średnią obliczymy, dzieląc całkowitą drogę przez całkowity czas jazdy:

$$v = \frac{96 \text{ m}}{20 \text{ s}} = 4,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Odpowiedź:

Rowerzysta przejechał 96 metrów ze średnią prędkością $4,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Zależność jego prędkości i przyspieszenia od czasu przedstawiają zamieszczone wyżej wykresy.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

- Krążek hokejowy ślizga się po lodzie z prędkością początkową $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ i opóźnieniem $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Ile czasu potrzeba, by jego prędkość zmalała o połowę i jaką przebyłby wtedy drogę?
- Autobus jadący z prędkością początkową o wartości $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ przez 8 sekund poruszał się ruchem jednostajnie przyspieszonym, osiągając prędkość $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Przez kolejne 25 sekund jechał ruchem jednostajnym, a przez następne 7 sekund ruchem jednostajnie opóźnionym z opóźnieniem $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.
 - Sporządź wykres zależności prędkości autobusu od czasu.
 - Sporządź wykres zależności przyspieszenia autobusu od czasu.
 - Oblicz drogę przebytą przez autobus w całym opisanym ruchu.
 - Oblicz prędkość średnią autobusu w tym czasie.

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 50

- W ruchu jednostajnie opóźnionym ciało musi posiadać prędkość początkową. W jednakowych przedziałach czasu prędkość maleje o te same wartości.

s. 50

- Przyspieszenie w ruchu opóźnionym ma zwrot przeciwny niż prędkość i nazywane jest opóźnieniem.

s. 53

- Obliczanie drogi w dowolnym ruchu jednostajnie zmiennym bardzo ułatwia fakt, że droga w dowolnym ruchu jest zawsze liczbowo równa polu figury ograniczonej wykresem prędkości, osią czasu i liniami pionowymi odpowiadającymi chwili początkowej i końcowej ruchu.



5. Ruch jednostajny po okręgu

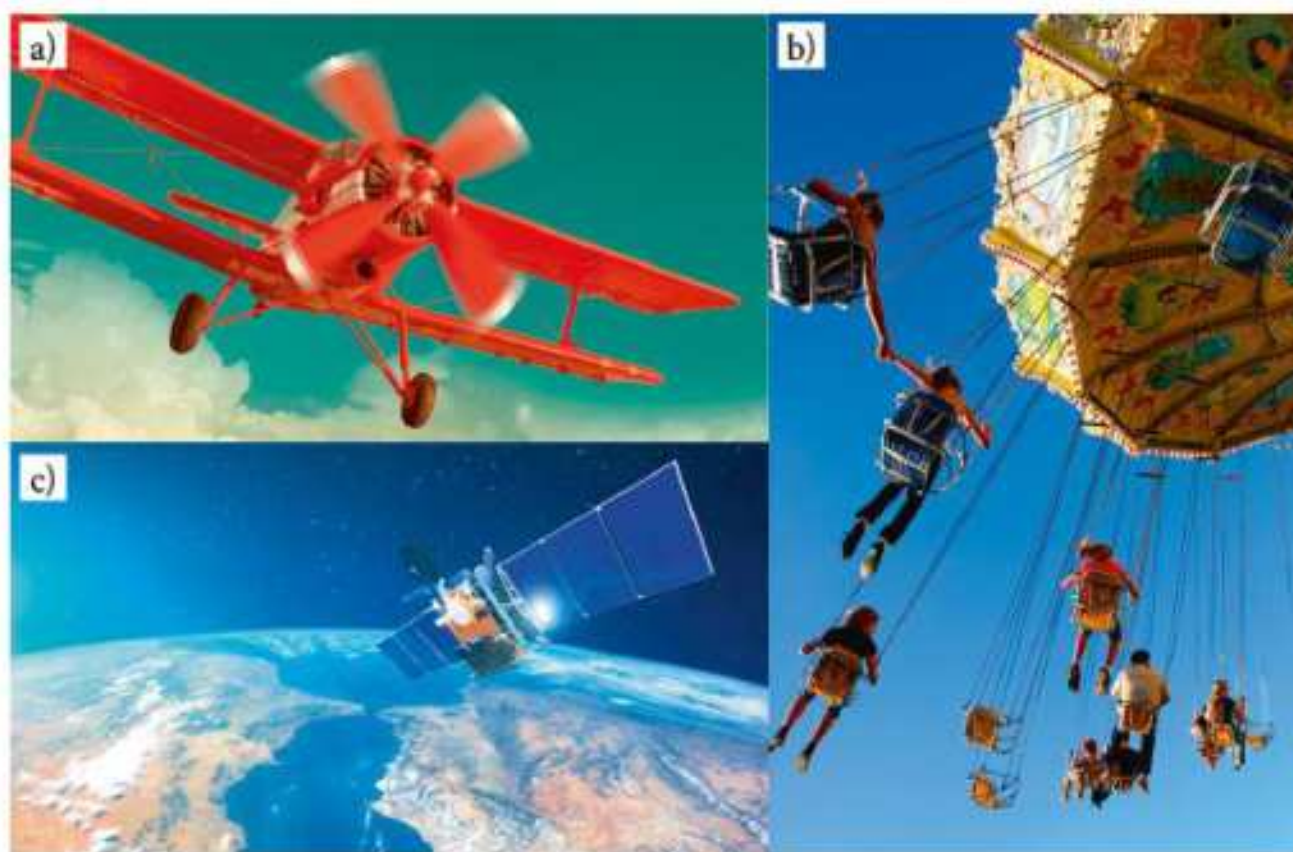
NA TEJ LEKCJI

- zapoznasz się z ruchem jednostajnym po okręgu;
- poznasz wielkości fizyczne opisujące ten ruch.

Pojęcie ruchu jednostajnego po okręgu

Do tej pory zajmowaliśmy się ruchami prostoliniowymi lub takimi, w których nie braliśmy pod uwagę toru. W momencie, gdy zaczynamy się interesować krzywizną toru, musimy uwzględnić nowe zjawiska i poszerza się zasób pojęć niezbędnych do ich opisanie.

Spośród wszystkich ruchów krzywoliniowych na szczególną uwagę zasługują ruchy po okręgu. Są one bardzo rozpowszechnione w życiu codziennym, a ich opis matematyczny jest stosunkowo prosty. Ruch po okręgu wykonują między innymi punkty wszystkich ciał, które się obracają, takich jak: koła jadącego samochodu, śmigła samolotu, krążek CD i dysk twardy podczas odczytu danych oraz wirujące elementy różnych maszyn i mechanizmów. Po orbitach zbliżonych do kołowych krążą planety wokół Słońca oraz księżyce wokół planet. Ruchy po okręgu mogą się odbywać ze stałą lub zmienną prędkością. Mówimy wtedy odpowiednio o ruchu jednostajnym lub zmiennym po okręgu.



Rys. 14. Przykłady ciał poruszających się po okręgu: a) dowolny punkt śmigła samolotu, b) ludzie na karuzeli, c) satelita na orbicie kołowej.



ruch jednostajny
po okręgu

Ruchem jednostajnym po okręgu nazywamy taki ruch, którego torem jest okrąg, a wartość prędkości nie ulega zmianie.

Zwróćmy uwagę, że w powyższej definicji mówimy o wartości prędkości. Jak pamiętamy, prędkość to wektor, więc ma również kierunek i zwrot. Kierunek wektora prędkości jest zawsze styczny do toru, a więc w ruchu po okręgu nieustannie się zmienia. Pomimo stałej wartości prędkości ruch po okręgu stanowi tak naprawdę ruch zmienny. Zmiany kierunku wektora prędkości są wymuszone działaniem siły dośrodkowej, o której będzie mowa w dalszej części podręcznika.

Wielkości charakteryzujące ruch jednostajny po okręgu

Obserwując ciało wykonujące ruch jednostajny po okręgu, na przykład wybrany punkt talerza obracającego się w kuchence mikrofalowej, dochodzimy do wniosku, że czas wykonania jednego pełnego okrążenia jest zawsze taki sam. Nazywamy go **okresem ruchu** i oznaczamy literą T . Jednostką okresu jest oczywiście 1 sekunda.

okres w ruchu
jednostajnym
po okręgu

Okresem ruchu jednostajnego po okręgu nazywamy czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego okrążenia.

częstotliwość
w ruchu
jednostajnym
po okręgu

Często posługujemy się też odwrotnością okresu, czyli **częstotliwością**. Częstotliwość w ruchu po okręgu to liczba obrotów na sekundę.

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

Jednostką częstotliwości jest 1 herc, czyli 1 obieg na sekundę.

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

Jeśli okres jest stały, to częstotliwość też jest wielkością stałą, a więc stanowi parametr charakteryzujący ruch.

Częstotliwość w ruchu jednostajnym po okręgu to odwrotność okresu, czyli liczba okrążeń wykonanych w ciągu 1 sekundy.

Ogólna definicja prędkości, jaką jest stosunek przemieszczenia do czasu, nie wnosi wiele nowego do opisu ruchu po okręgu. Zauważmy jednak, że w czasie równym jednemu okresowi ciało zatacza pełen okrąg, a więc przebywa drogę równą $2\pi r$, gdzie r to promień okręgu. To spostrzeżenie pozwala precyzyjniej zdefiniować prędkość w ruchu po okręgu, zwaną **prędkością liniową**. Otrzymamy ją, dzieląc przebytą drogę (a więc długość okręgu) przez czas ruchu (a więc okres).

prędkość liniowa
w ruchu
jednostajnym
po okręgu

Wartość prędkości liniowej w ruchu jednostajnym po okręgu to stosunek długości okręgu do okresu ruchu.

$$v = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r f, \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Używamy nazwy prędkości liniowej dla odróżnienia jej od prędkości kątowej, która również charakteryzuje ruch po okręgu, ale nią nie będziemy się tutaj zajmować.

Przykład

Samochód jedzie ze stałą prędkością $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Oblicz, z jaką częstotliwością obracają się jego koła, jeśli ich średnica wynosi 40 cm.

Rozwiązanie:

Dane:

$$v = 72 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d = 2r = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$$

Aby rozwiązać to zadanie, nie musimy nawet obliczać obwodu koła. Wystarczy, że zastosujemy bezpośrednio wzór na prędkość liniową:

$$v = 2\pi r f = \pi d f \Rightarrow f = \frac{v}{\pi d}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$f = \frac{20 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,14 \cdot 0,4 \text{ m}} \approx 15,9 \text{ Hz}$$

Odpowiedź:

Częstotliwość ruchu koła wyniesie około 16 herców.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Jak zmieni się okres i częstotliwość ruchu ciała po okręgu, jeśli wartość jego prędkości liniowej wzrośnie dwukrotnie?
2. Koło jadącego roweru o średnicy 0,7 m kręci się z częstotliwością 5,5 Hz. Oblicz w zeszycie prędkość ruchu postępowego tego roweru.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Ruch jednostajny po okręgu to taki ruch, którego torem jest okrąg, a wartość prędkości nie ulega zmianie. s. 56
- Okres w ruchu jednostajnym po okręgu to czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego okrążenia. s. 56
- Częstotliwość to odwrotność okresu, czyli liczba okrążeń w ciągu 1 sekundy. s. 56
- Prędkość ciała w ruchu po okręgu nazywamy prędkością liniową. Jej wartość możemy obliczyć, dzieląc długość okręgu przez okres. s. 56

**PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM**

- s. 31 1. Kinematyka jest nauką o opisie ruchu bez wnikania w jego przyczyny.
- s. 32 2. Ruch jest to przemieszczanie się jednego ciała względem drugiego, zachodzące w pewnym czasie. Ruch jest pojęciem względnym – zależy od wybranego układu odniesienia.
- s. 32 3. Tor to linia, wzdłuż której porusza się ciało. Jest to pojęcie geometryczne.
- s. 33 4. Droga to liczba – długość odcinka toru.
- s. 34 5. Przemieszczenie to wektor łączący położenie początkowe i położenie końcowe ciała.
- s. 34 6. Prędkość to wielkość wektorowa – stosunek wektora przemieszczenia do czasu, w którym ono nastąpiło.
- s. 33 7. Ze względu na tor ruchy dzielimy na prostoliniowe i krzywoliniowe.
- s. 33 8. Ze względu na prędkość ruchy dzielą się na jednostajne i zmienne.
- s. 40 9. W ruchu jednostajnym w jednakowych przedziałach czasu przemieszczenia ciała są jednakowe, a droga jest wprost proporcjonalna do czasu ruchu.
- s. 35 10. Przyspieszenie to stosunek wektora przyrostu prędkości do czasu, w którym ten przyrost nastąpił.
- s. 45 11. W ruchu jednostajnie przyspieszonym w jednakowych przedziałach czasu prędkość wzrasta o te same wartości.
- s. 47 12. W ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej drogi przebywane w kolejnych jednakowych przedziałach czasu mają się do siebie jak kolejne liczby nieparzyste, a całkowita droga jest wprost proporcjonalna do kwadratu czasu.
- s. 50 13. W ruchu jednostajnie opóźnionym w jednakowych przedziałach czasu prędkość maleje o te same wartości. Przyspieszenie w tym ruchu jest ujemne i nazywa się opóźnieniem.
- s. 56 14. Ruch jednostajny po okręgu to taki ruch, którego torem jest okrąg, a wartość prędkości nie ulega zmianie.
- s. 56 15. Okresem ruchu po okręgu nazywamy czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego okrążenia.
- s. 56 16. Częstotliwość to odwrotność okresu – liczba okrążeń na sekundę.
- s. 56 17. Prędkość w ruchu po okręgu nazywamy prędkością liniową i obliczamy jako stosunek długości okręgu do okresu ruchu.

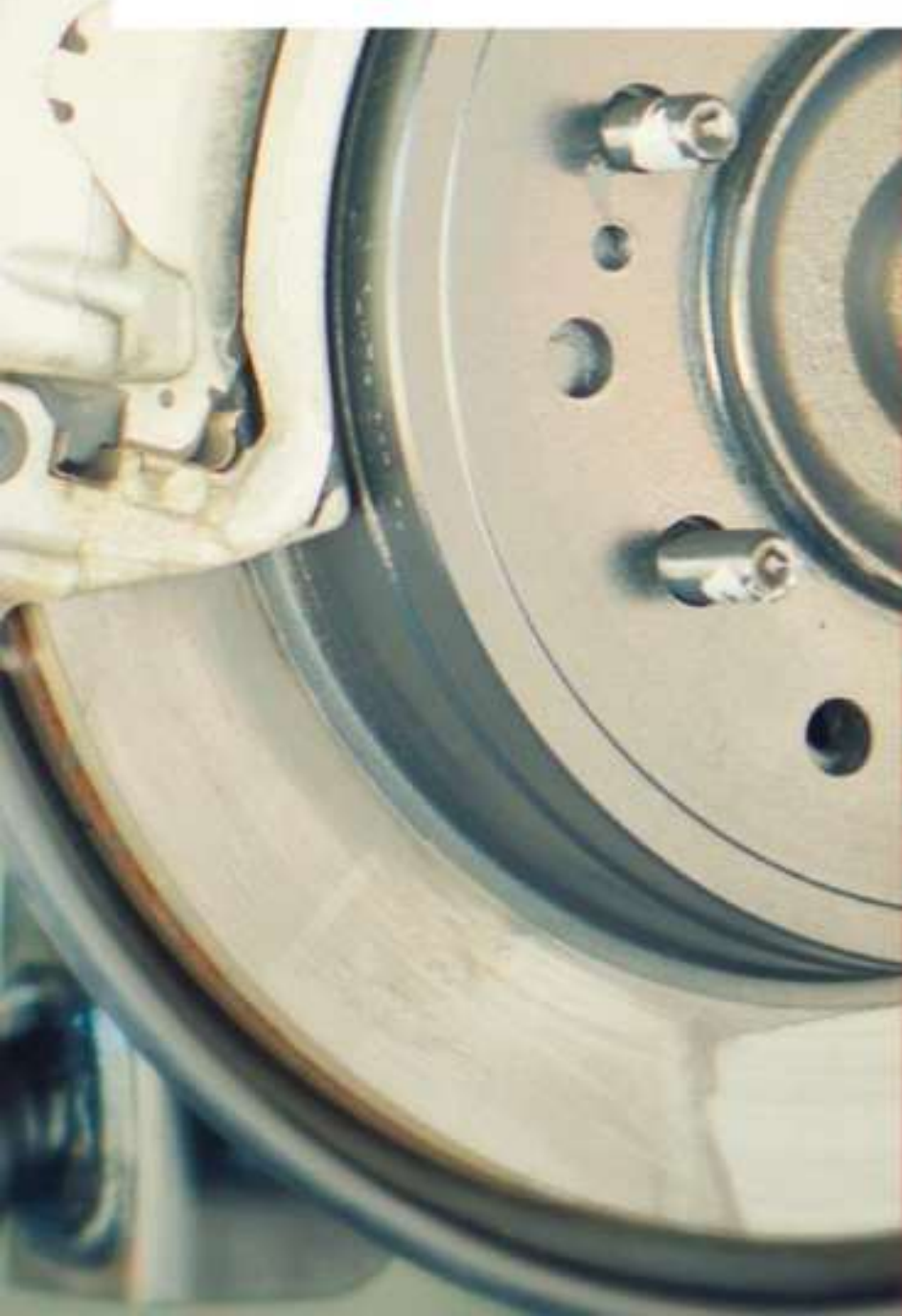


Poznałeś/poznałaś już różne rodzaje ruchów i nauczyłeś/nauczyłaś się je opisywać. Ale skąd bierze się ruch? Czy ruch musi mieć swoją przyczynę? Czy ciało raz wprowadzone w ruch będzie się poruszać nieustannie, czy też może się samo z siebie zatrzymać? Pytania te ludzkość stawia sobie już od ponad dwóch tysięcy lat.

Zrozumienie tych zagadnień nastąpiło stosunkowo niedawno dzięki pracom takich uczonych, jak Galileusz i Izaak Newton (wymawiaj: Izaak Niuton). Sformułowane przez Newtona zasady dynamiki są fundamentem fizyki, a ich znajomość jest niezbędna do zrozumienia tego, co się dzieje dookoła.

Zgłębiając zagadnienia poruszone w tym dziale, zrozumiesz, dlaczego ciała się poruszają, oraz jaki jest sens podstawowych pojęć, takich jak siła, praca i energia. Poznasz fundamentalne zasady rządzące wszystkimi zjawiskami zachodzącymi w otaczającym świecie.

3. Dynamika



Pojęcie siły

Bezwładność. Pierwsza zasada dynamiki

Druga zasada dynamiki

Trzecia zasada dynamiki

Inercjalne i nieinercjalne układy odniesienia. Siły bezwładności

Siły w ruchu po okręgu

Siły oporu. Tarcie

Praca i moc

Energia kinetyczna

Energia potencjalna

Zasada zachowania energii



1. Pojęcie siły

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie i uzupełnisz podstawowe wiadomości o sile;
- nauczysz się wyznaczać siłę wypadkową dla sił działających w różnych kierunkach;
- ugruntujesz pojęcie równowagi sił.

Siła jako miara oddziaływań

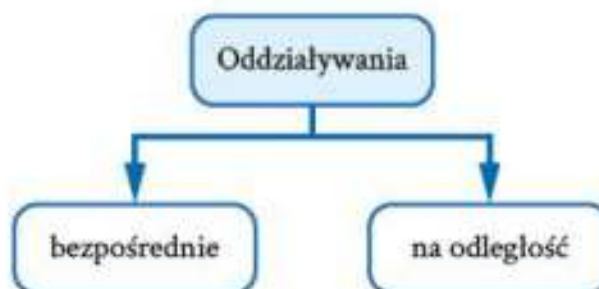
siła jest miarą
oddziaływań

Sily bezpośrednio nie widać. Poznajemy ją po skutkach. Wszelkie interakcje między ciałami, w których występuje siła, nazywamy oddziaływaniami. **Siła** jest miarą tych oddziaływań.

Istnieje ogromnie wiele różnych oddziaływań, chociaż tak naprawdę można je sprowadzić do kilku tzw. oddziaływań fundamentalnych. Zaliczamy do nich oddziaływanie grawitacyjne, elektromagnetyczne oraz dwa rodzaje oddziaływania jądrowego (słabe i silne). Dzięki oddziaływaniom działają Twoje zmysły, możesz oddychać, serce pompuje krew, a ciało nie rozsypuje się na pojedyncze atomy i cząstki elementarne. To oddziaływania sprawiają, że nie odrywasz się od powierzchni Ziemi, a planety, gwiazdy i galaktyki mogą w ogóle istnieć.

podział
oddziaływań

Jeśli oddziaływujące ciała się stykają, to takie oddziaływania nazywamy **bezpośrednimi**. Dzięki oddziaływaniom bezpośrednim możesz utrzymać w ręce długopis, samochód może zahamować, a klej skleić dwie kartki papieru. Sily mogą też działać **na odległość** – na przykład Ziemia przyciąga odległy o setki tysięcy kilometrów Księżyc.



Rys. 1. Podział oddziaływań ze względu na zasięg.

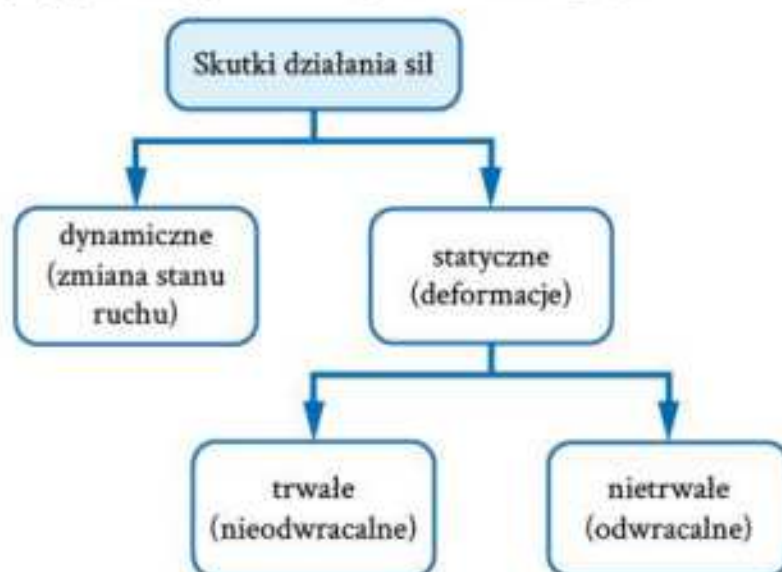
skutki
oddziaływań

Działająca siła może wywołać różne skutki. Może wprowadzić ciało w ruch, a także zatrzymać lub zmienić kierunek jego ruchu. Przykładem jest oddziaływanie zachodzące pomiędzy piłkarzem a piłką. Takie skutki nazywamy **dynamicznymi**. Często się też zdarza, że ciało, na które działa siła, pozostaje na swoim miejscu, ale ulega deformacjom. Są to tak zwane skutki **statyczne**. Deformacje mogą być odwracalne,



na przykład kładka, która ugina się pod ciężarem stojących na niej osób, wraca do poprzedniego stanu, gdy te osoby z niej zejść. Niezbyt mocno rozciągnięta sprężyna odzyskuje poprzednią długość po ustaniu siły rozciągającej. Deformacje mogą też być trwałe. Człowiek, który chodzi po wilgotnej glinie, pozostawia na niej trwałe odciski stóp. Nadepnięta skorupka jajka pęka w sposób nieodwracalny. Deformacji trwałej ulegnie też sprężyna, którą rozciągniemy zbyt mocno.

Skutki dynamiczne sił będziemy analizować na kolejnych lekcjach. Do zagadnień związanych ze sprężystością powrócimy w klasie drugiej.



Rys. 2. Podział skutków działania siły.

Siła jest wielkością wektorową. Ma wartość, kierunek, zwrot i punkt przyłożenia. Wartość siły mierzymy za pomocą siłomierzy. Jednostką siły jest 1 niuton (1 N). Do definicji tej jednostki powrócimy niebawem.



Rys. 3. Siłomierz.

Składanie sił

Na dowolne ciało może działać kilka sił jednocześnie. Jeśli są one przyłożone do tego samego punktu ciała, będą powodowały taki sam skutek, jakby działała jedna siła będąca ich sumą – **siła wypadkowa**. Przypomnijmy, że składniki sumy wektorów nazywamy wektorami składowymi. Pojedyncze siły, które dodajemy, będą więc nosić nazwę **sił składowych**. Siłę oznaczamy literą F , więc kolejne wektory siły będą miały symbole $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$ itd. Zapis F_1 bez strzałki będziemy rozumieć jako wartość siły $\vec{F}_1$.

Z dodawaniem wektorów w najprostszych przypadkach spotkałeś/spotkałaś się już w szkole podstawowej. Teraz podejmiemy do sprawy w sposób bardziej systematyczny.

Najłatwiej jest dodawać wektory, które mają taki sam kierunek i zwrot (rys. 4.). Generalna zasada jest taka, że wektory przesuwamy równolegle (zachowując kierunek,

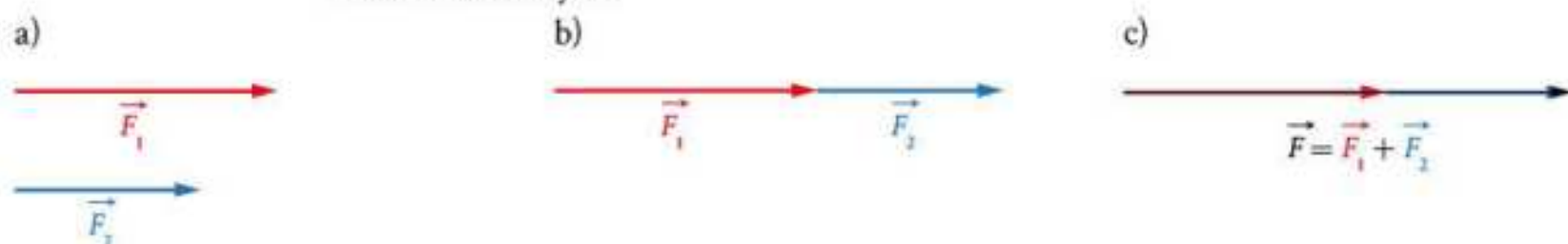
siła wypadkowa

siły składowe

dodawanie
wektorów sił
równoległych

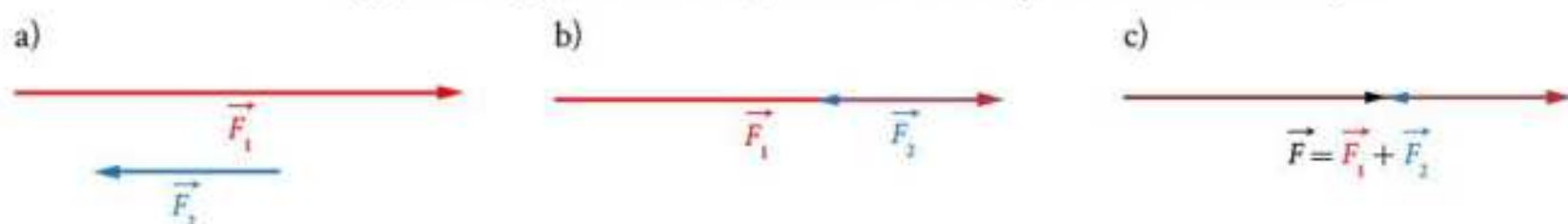


zwrot i wartość) w taki sposób, by początek drugiego wektora składowego pokrył się z końcem pierwszego. Następnie łączymy początek pierwszego wektora z końcem drugiego, otrzymując wektor wypadkowy. Zauważmy, że jeśli zwroty wektorów składowych są zgodne, to długość wektora wypadkowego jest sumą długości wektorów składowych.



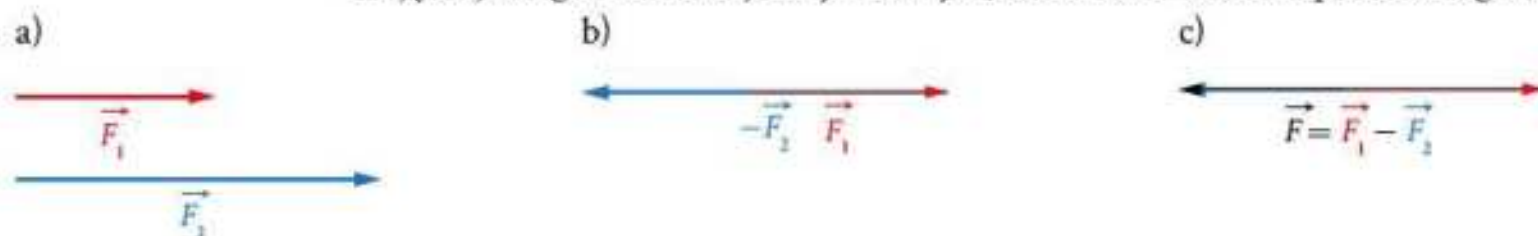
Rys. 4. Dodawanie sił o tych samych kierunkach i zwrotach: a) siły, które chcemy dodać, b) przesuwamy drugi wektor składowy na koniec pierwszego, c) łączymy początek pierwszego wektora z końcem drugiego i uzyskujemy wektor wypadkowy.

Gdy zwroty wektorów są przeciwne, postępujemy analogicznie (rys. 5.). Długość wektora wypadkowego jest różnicą długości wektorów składowych. Zwrot wektora wypadkowego jest taki sam, jak zwrot dłuższego wektora składowego.



Rys. 5. Dodawanie sił o jednakowych kierunkach, lecz przeciwnych zwrotach: a) siły, które chcemy dodać, b) przesuwamy drugi wektor składowy na koniec pierwszego, c) łączymy początek pierwszego wektora z końcem drugiego i uzyskujemy wektor wypadkowy.

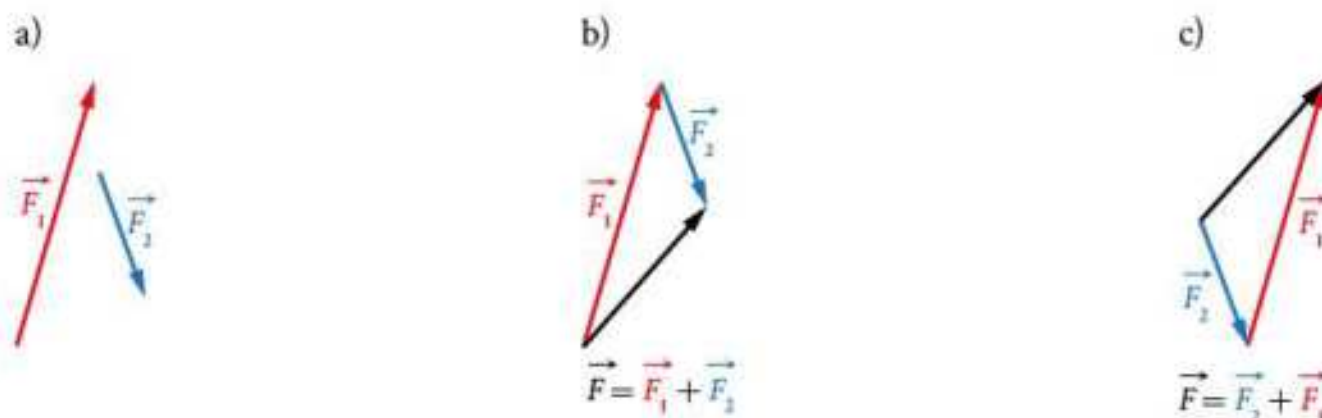
Wektor o tej samej długości i tym samym kierunku, lecz przeciwnym zwrocie do danego wektora $\vec{F}$, nazywamy wektorem przeciwnym i oznaczamy symbolem $-\vec{F}$. Odjęcie jakiegoś wektora jest tym samym, co dodanie wektora przeciwnego (rys. 6.).



Rys. 6. Odejmowanie sił: a) siły, które chcemy odjąć, b) wektorowi odejmowanemu zmieniamy zwrot i przesuwamy na koniec pierwszego wektora składowego, c) dalej postępujemy analogicznie jak przy dodawaniu wektorów.

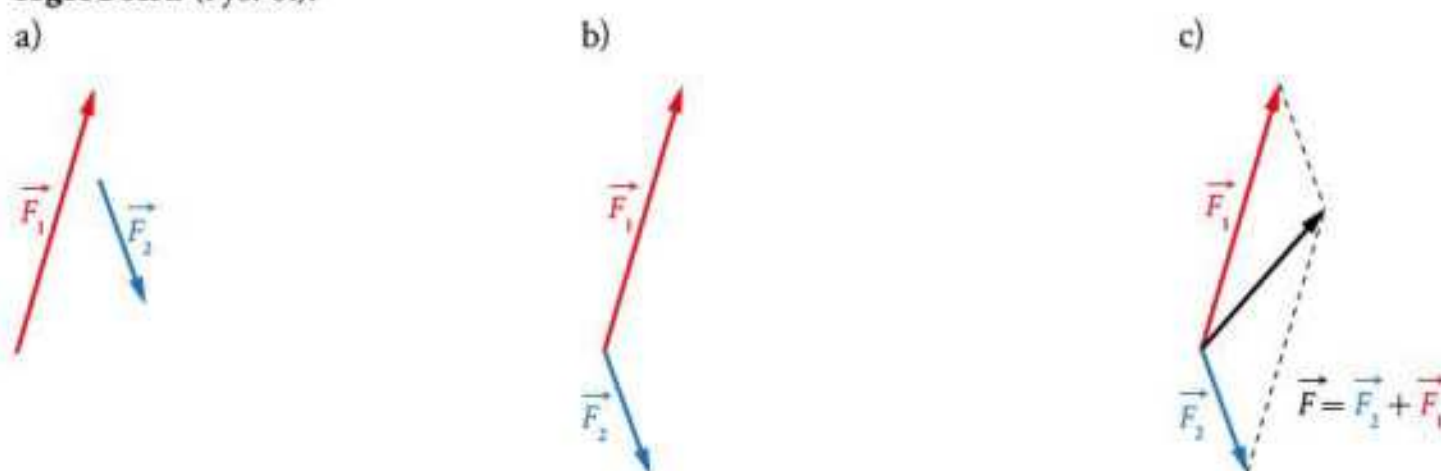
**dodawanie sił
działających
w różnych
kierunkach**

Dodawanie sił działających w dowolnym kierunkach na płaszczyźnie możemy przeprowadzić dwiema metodami. Pierwsza to tzw. **metoda trójkąta**. Jest ona uogólnieniem sposobu przedstawionego powyżej: wektory przesuwamy w taki sposób, by koniec pierwszego pokrył się z początkiem drugiego. Następnie rysujemy wektor wypadkowy, który zaczyna się w punkcie zaczepienia pierwszego wektora składowego, a kończy w punkcie zakończenia drugiego wektora (rys. 7.).



Rys. 7. Dodawanie sił działających w różnych kierunkach metodą trójkąta: a) siły, które chcemy dodać, b) przesuwamy wektory składowe w taki sposób, by początek drugiego nałożył się na koniec pierwszego, a następnie łączymy początek pierwszego wektora z końcem drugiego, c) te same wektory dodane w odwrotnej kolejności. W obu przypadkach otrzymany wektor wypadkowy ma ten sam kierunek i zwrot oraz tę samą wartość. Dowodzi to, że dodawanie wektorów jest działaniem przemienne.

Druga metoda dodawania wektorów wydaje się bardziej skomplikowana, ale jest w praktyce częściej stosowana, ponieważ ułatwia wykonywanie czynności odwrotnej – rozkładania wektora wypadkowego na składowe. Jest to tzw. **metoda równoległoboku** (rys. 8.).



Rys. 8. Dodawanie sił metodą równoległoboku: a) wektory składowe (takie same jak na poprzednim rysunku), b) przesuwamy je tak, by zaczynały się w tym samym punkcie, c) uzupełniamy brakujące boki równoległoboku; jego przekątna to poszukiwany wektor wypadkowy. Zwróć uwagę, że narysowany równoległobok jest jakby sumą trójkątów z rysunku 7 b) i c). Obie metody są więc równoważne.

Procedura dodawania sił działających w dowolnych kierunkach metodą równoległoboku jest następująca:

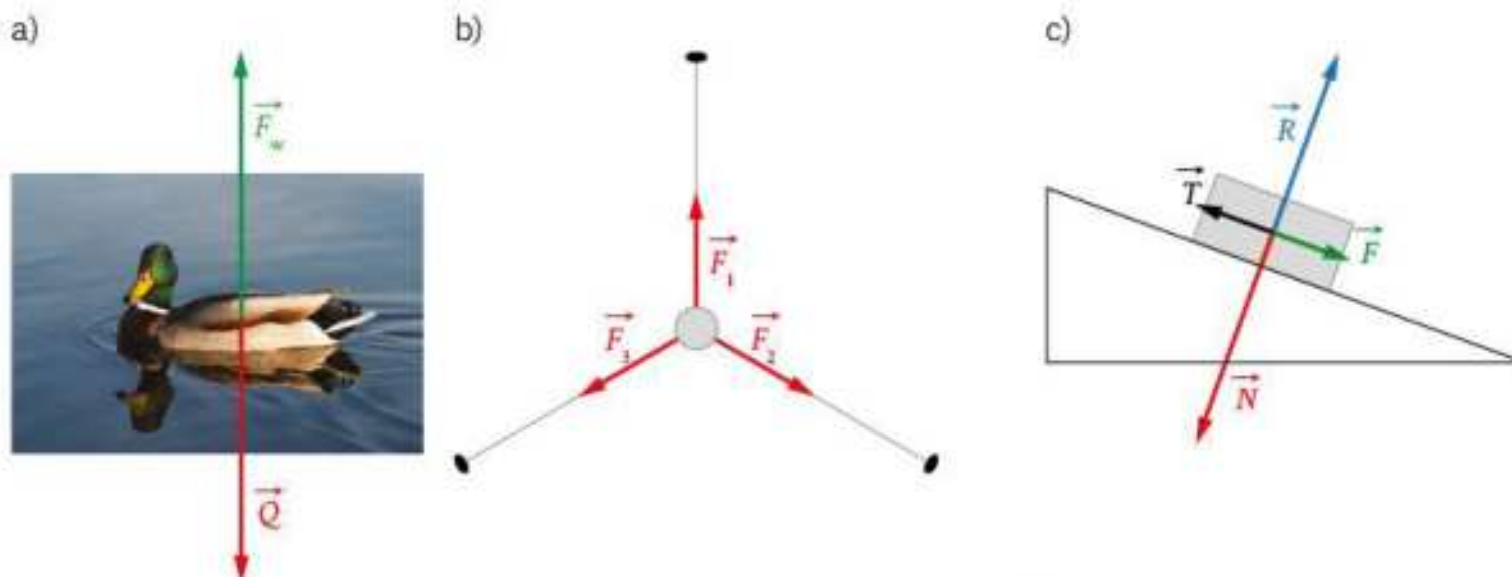
1. Jeśli to konieczne, przesuwamy wektory sił tak, by zaczynały się w tym samym punkcie. Często, jeśli mówimy o siłach przyłożonych do tego samego punktu, ten warunek jest już spełniony od początku.
2. Narysowane wektory traktujemy jako przylegające do siebie boki równoległoboku. Za pomocą dwóch ekiek przesuwamy je równolegle, aby dorysować dwa pozostałe boki tej figury.
3. Przekątna równoległoboku, która zaczyna się tam, gdzie wektory składowe, wyznacza siłę wypadkową.



Równowaga sił

stan równowagi

Może się tak zdarzyć (i jest to bardzo częsty przypadek), że wypadkowa wszystkich sił działających na dane ciało wynosi 0. Ciało to zachowuje się wtedy tak, jakby nie działała na niego żadna siła. Mówimy wtedy, że ciało takie znajduje się w **stanie równowagi**.



Rys. 9. Przykłady ciał będących w stanie równowagi. a) Ciężar kaczki $\vec{Q}$ jest zrównoważony przez siłę wyporu $\vec{F}_w$. b) Widok z góry na pionowy maszt anteny nadawczej i jej mocowanie za pomocą odciągów. Kąty między odciągami są jednakowe (120°), siły działające na liny mają jednakowe wartości i ich wypadkowa wynosi 0. Dzięki temu antena się nie przewraca. c) Kłosek leżący na równi o niewielkim nachyleniu. Siła nacisku kłosa na równię $\vec{N}$ jest zrównoważona przez siłę reakcji równi $\vec{R}$. Siła ściągająca kłosek z równi $\vec{F}$ jest zrównoważona przez siłę tarcia $\vec{T}$. Kłosek spoczywa.

Dzięki stanowi równowagi przedmioty znajdujemy na ogół tam, gdzie je zostawiliśmy. Na przykład książka leży na stole (i sama z siebie nie zmienia położenia), ponieważ jej ciężar jest równoważony przez siłę reakcji ze strony blatu stołu. Kaczka pływa na wodzie, ponieważ jej ciężar równoważy siła wyporu wody. Samolot leci ze stałą prędkością po poziomym torze, ponieważ jego ciężar jest równoważony przez siłę nośną skrzydeł, a siłę napędową silników równoważy siła oporu powietrza. Budynki i inne konstrukcje nie walą się, ponieważ wszystkie ich elementy znajdują się w stanie równowagi.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Barka jest ciągnięta na linach przez dwa holowniki. Kąt między linami wynosi 30° . Siły naprężenia lin są jednakowe. Naskicuj całą sytuację i wyznacz graficznie wektor siły wypadkowej napędzającej barkę.
2. Czterej chłopcy ciągną za cztery końce dwóch lin związanych w połowie długości na supeł. Antek ciągnie na północ z siłą 250 N, Benek na wschód z siłą 300 N, Jakub na południe z siłą 350 N a Damian na zachód z siłą 400 N. Naskicuj całą sytuację i wyznacz graficznie wektor siły wypadkowej działającej na supeł.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- Siła jest miarą oddziaływań. s. 60
- Oddziaływania dzielimy na bezpośrednie i na odległość. s. 60
- Skutki działania siły dzielimy na dynamiczne i statyczne. s. 60
- Stosuje się dwie metody dodawania wektorów: trójkąta i równoległoboku. s. 62
- Jeśli wypadkowa wszystkich sił działających na ciało wynosi 0, to ciało jest w stanie równowagi. s. 64

2. Bezwładność. Pierwsza zasada dynamiki

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się, czym jest bezwładność i jak się objawia;
- przypomnisz sobie pierwszą zasadę dynamiki Newtona i nauczysz się ją stosować do opisu zachowania się ciał.

Bezwładność

Doświadczenie 1.

Do doświadczenia potrzebne będą: deska, podpory o różnej wysokości, drewniane klocki lub inne elementy, z których można zbudować łatwą do zburzenia ściankę oraz mały wózek laboratoryjny dający możliwość dodatkowego obciążenia.

Z deski i podpory skonstruuj równię pochyłą (rys. 10.). U jej podnóża, ale w odległości większej niż długość wózka, zbuduj ścianę z drewnianych klocków. Na równi postaw wózek i pozwól mu się stoczyć tak, aby uderzył w ściankę. Oceń skalę zniszczeń ścianki.

Powtórz to doświadczenie wielokrotnie, zmieniając w różnych konfiguracjach następujące parametry:

1. kąt nachylenia równi,
2. miejsce na równi, z którego startuje wózek,
3. masę wózka.

Za każdym razem oceniaj skutki uderzenia wózka w ściankę z klocków. Co zauważyłeś/zauważyłaś?



Rys. 10. Układ doświadczalny do badania bezwładności.





Na równi pochyłej wózek poruszał się ruchem jednostajnie przyspieszonym. Po zjechaniu na blat stołu wózek znajdował się w stanie równowagi, ponieważ jego ciężar został w pełni zrównoważony przez siłę reakcji podłoża. Pomimo to wózek był w stanie kontynuować ruch i uszkodzić lub przynajmniej przesunąć ścianę. Zniszczenia były tym większe, im większa była prędkość wózka oraz jego masa. Wózek po zderzeniu wprawdzie się zatrzymywał, ale odbywało się to kosztem integralności ściany.

Jak zachowałby się wózek, gdyby nie napotkał na ścianę? Łatwo to sprawdzić, usuwając ją. Wózek po opuszczeniu równi będzie się toczyć coraz wolniej. Jeśli zapewnimy mu dostatecznie dużo miejsca, w końcu się zatrzyma.

Przez całe wieki panowało przekonanie, że aby ciało się poruszało, musi na nie działać siła. Wóz się poruszał dopóty, dopóki był ciągnięty przez konia. Jeśli koń przestawał ciągnąć, wóz się zatrzymywał. Obecnie wiemy, że wóz się zatrzymuje, ponieważ na niego *działa* niezrównoważona siła: **siła tarcia**. Ta sama siła powoduje zatrzymywanie się wózka w naszym doświadczeniu. A jak zachowa się wózek, jeśli wyeliminujemy wszelkie siły oporu?

Doświadczenie 2.

Do doświadczenia potrzebny jest idealnie wypoziomowany tor powietrzny z ogranicznikami oraz ślizgacz wyposażony w sprężyste zderzaki. Dobrym pomysłem jest zastąpienie mechanicznych zderzaków i ograniczników magnesami neodymowymi, zwróconymi ku sobie biegunami jednoimiennymi, tak by się odpychały. Ślizgacz wprawiamy w ruch. Odbija się on sprężysto od obydwu końców toru. Obserwujemy, jakim ruchem porusza się ślizgacz. Możemy też mierzyć czasy przemierzania toru pomiędzy kolejnymi odbiciami.

Jeśli tor był idealnie wypoziomowany, a kolejne zderzenia ślizgaczy doskonale sprężyste, to zauważymy, że ruch ślizgacza jest jednostajny. Na ślizgacz działa siła ciężkości skierowana pionowo w dół. Towarzyszy jej siła nośna poduszki powietrznej o tej samej wartości i skierowana pionowo w górę. W pionie obie siły znoszą się wzajemnie. W poziomie wyeliminowaliśmy siłę tarcia. Podczas ruchu na ślizgacz działa też siła oporu powietrza, ale przy małych prędkościach jest ona znikomo mała. Można więc uznać, że wypadkowa wszystkich sił działających na ślizgacz wynosi 0, a mimo to ślizgacz się porusza. Do kontynuowania ruchu nie jest więc potrzebna siła. Jest ona niezbędna tylko po to, by ciało wprawić w ruch lub je zatrzymać!

Odkrycia tego dokonał Galileusz już cztery wieki temu. Sformułowana przez niego zasada nosi nazwę zasady bezwładności. Trzeba pamiętać, że Galileusz nie dysponował taką aparaturą, jaką posługujemy się dzisiaj. Musiał sobie wyobrazić, jak przebiega ruch bez sił oporu, co wymagało nie lada geniuszu.

zasada
bezwładności
Galileusza

Zasada bezwładności Galileusza

Ciało pozostaje w spoczynku lub trwa w ruchu, dopóki jakaś siła zewnętrzna nie zmusi go do zmiany tego stanu.



Co sprawia, że ciało nie potrafi samo z siebie poruszyć się ani zatrzymać? Galileusz nazwał tę cechę bezwładnością. Bezwładność to opór, jaki ciało stawia, gdy próbujemy zmienić stan jego ruchu: przyspieszyć, zwolnić lub zatrzymać. Zauważyliśmy w doświadczeniu, że wózek o większej masie powodował większe uszkodzenia ściany z klocków, więc stawiał większy opór przy próbie zatrzymania go. Prowadzi to do wniosku, że miarą bezwładności jest masa ciała.

Bezwładność to opór materii przed zmianą stanu jej ruchu.

Miarą bezwładności jest masa.

bezwładność

Pierwsza zasada dynamiki

Odkrycia Galileusza uogólnił jeden z najwybitniejszych uczonych w dziejach ludzkości, Izaak Newton. Odkrył on, że zjawisko ruchu można wyjaśnić na podstawie trzech zasad, zwanych obecnie zasadami dynamiki Newtona, będącymi fundamentem mechaniki i w ogóle całej fizyki. Pierwsza z tych zasad jest niejako powtórzeniem zasady bezwładności Galileusza, ale wyrażonym innymi słowami.

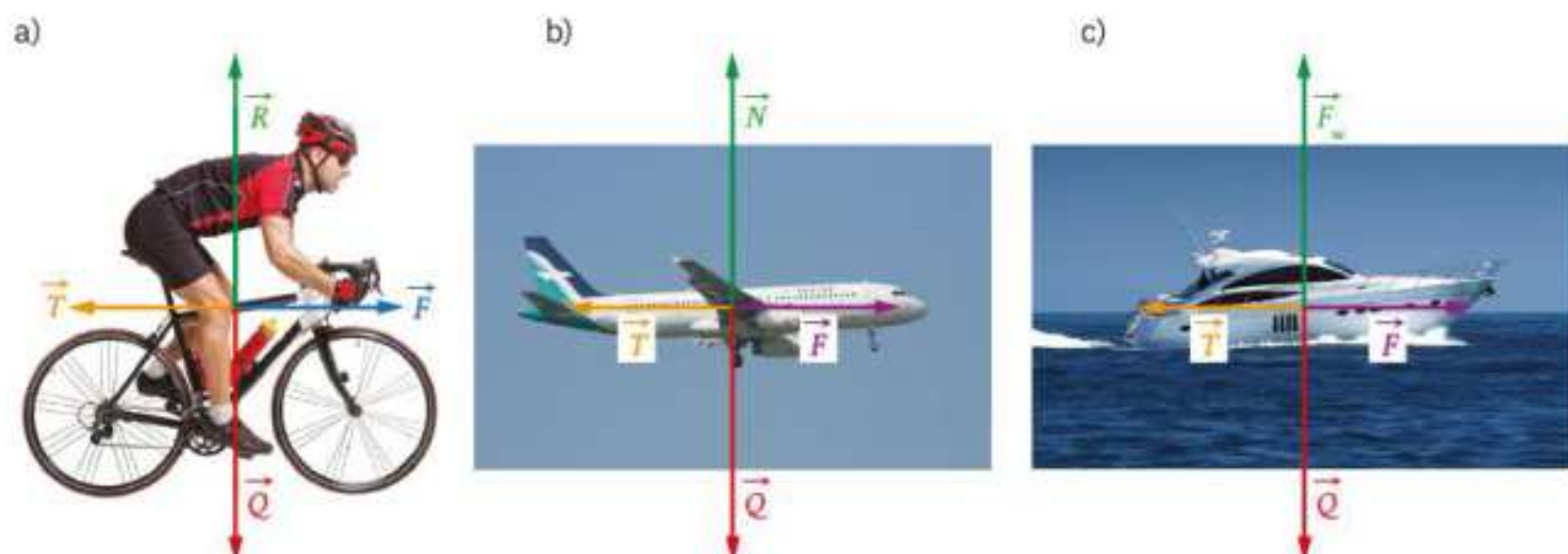
Pierwsza zasada dynamiki

Jeżeli na ciało nie działa żadna siła lub działające siły się równoważą, to ciało to pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym po linii prostej.

pierwsza zasada dynamiki

Pierwsza zasada dynamiki ostatecznie obaliła średniowieczny pogląd, że do utrzymania ruchu potrzebna jest siła. Siła jest potrzebna do zmiany stanu ruchu. Jeśli ciało już się porusza, to będzie tak czynić dalej bez żadnej dodatkowej przyczyny.

Rys. 11. Izaak Newton (1642–1727), wybitny angielski fizyk, matematyk i astronom. Na potrzeby fizyki stworzył podstawy rachunku różniczkowego i całkowitego – fundamentu matematyki wyższej. Sformułował zasady dynamiki i prawo powszechnego ciążenia, wyjaśnił ruch ciał niebieskich, dokonał ważnych odkryć w dziedzinie optyki. Jego dzieła do dziś stanowią fundament fizyki klasycznej.



Rys. 12. Przykłady ciał, które poruszają się zgodnie z I zasadą dynamiki. Znaczenie symboli zostało wyjaśnione w tekście poniżej.



Przeanalizujmy kilka przykładów ruchu jednostajnego. Na rysunku 12a ciężar rowerzysty $\vec{Q}$ równoważony jest przez siłę reakcji podłoża $\vec{R}$. Naciskając na pedały, rowerzysta działa na rower siłą napędową $\vec{F}$, która jest zrównoważona przez siły oporu $\vec{T}$, na które składają się siła tarcia kół o asfalt oraz siła oporu powietrza. Wypadkowa wszystkich sił wynosi 0 i rowerzysta jedzie ruchem jednostajnym. Gdyby chciał przyspieszyć, musiałby mocniej naciskać na pedały i siła $\vec{F}$ stałaby się niezrównoważona. Rowerzysta nie może jednak przyspieszać bez końca. W miarę wzrostu prędkości rośnie siła oporu powietrza i ustali się nowy stan równowagi. Rowerzysta znowu będzie jechał ruchem jednostajnym, z większą prędkością i większym wysiłkiem, gdyż będzie się musiał przeciwstawiać większym siłom oporu.

Samolot na rysunku 12b leci ruchem jednostajnym, gdyż w pionie ciężar samolotu $\vec{Q}$ równoważony jest przez siłę nośną skrzydeł $\vec{N}$, a w poziomie siłę napędową $\vec{F}$ równoważy siła oporu powietrza $\vec{T}$. Samolot może lecieć szybciej (do pewnych granic) kosztem większego zużycia paliwa, gdyż musiałby zwiększyć siłę napędową, aby zrównoważyć zwiększone siły oporu.

Statek na rysunku 12c porusza się jednostajnie, gdyż jego ciężar $\vec{Q}$ równoważy siła wyporu wody $\vec{F}_w$, a siłę napędową $\vec{F}$ – siła oporu ruchu w wodzie $\vec{T}$. Podobnie jak w poprzednich przypadkach, zwiększenie siły napędowej powoduje na chwilę brak równowagi i wzrost prędkości. Gdy rosnące siły oporu zrównają się z siłą napędową, prędkość ustala się na nowym poziomie.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

Rozrysuj (podobnie jak na rysunku 12) i nazwij wszystkie siły działające na następujące ciała:

- wahadło (kulkę na nitce) zwisające swobodnie w położeniu równowagi,
- samochód osobowy jadący ze stałą prędkością po poziomej drodze,
- nieruchomy balon unoszący się nad ziemią,
- łódź podwodną płynącą poziomo ruchem jednostajnym.

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 66

- Spoczywające ciało nie może bez powodu zacząć się poruszać, a poruszające się – bez powodu zatrzymać. Do tego jest potrzebna siła.

s. 67

- Opór ciała przeciwstawiający się zmianie stanu jego ruchu to bezwładność. Miarą bezwładności jest masa.

s. 67

- Jeżeli na ciało nie działają żadne siły, bądź działające siły się równoważą, to ciało pozostanie w spoczynku (jeśli wcześniej spoczywało) lub będzie się poruszać ruchem jednostajnym prostoliniowym (jeśli wcześniej się poruszało).



3. Druga zasada dynamiki

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie jedno z najbardziej fundamentalnych praw fizyki – drugą zasadę dynamiki Newtona oraz definicję jednostki siły;
- będziesz stosować drugą zasadę dynamiki do opisu zachowania się ciał.

Doświadczenie

Do doświadczenia będzie nam potrzebny wózek do doświadczeń z mechaniki, nieruchomy blok mocowany do krawędzi stołu, zestaw obciążników z haczykami, obciążniki do wózka i sznurek. Montujemy układ przedstawiony na rysunku 13. Należy zwrócić uwagę, by odcinek sznurka między wózkiem a blokiem przebiegał poziomo. W przeciwnym wypadku kąt działania siły na wózek będzie się zmieniać w trakcie eksperymentu, co zaburzy wyniki obserwacji.



Rys. 13. Układ doświadczalny do badania zależności przyspieszenia układu ciał od jego masy i działającej siły.

Doświadczenie polega na obserwacji ruchu wózka pod wpływem ciężaru obciążników zawieszonych na sznurku przerzuconym przez blok. Pomiary możemy wykonywać jakościowo (tzn. tylko przyglądać się ruchowi i zapamiętywać swoje obserwacje) lub ilościowo (mierzyć drogę wózka i czas ruchu, a następnie obliczać przyspieszenia ze wzoru $a = \frac{2s}{t^2}$ i zapisywać wyniki). Wykonujemy kilka wersji eksperymentu:

1. Ustalamy masę wózka i prowadzimy obserwacje/pomiary dla kilku różnych obciążeń zawieszonych na sznurku.
2. Ustalamy ciężar zawieszony na sznurku i kilkakrotnie zmieniamy masę wózka.

Tak zaprojektowane doświadczenie nie daje szans na wyznaczenie ścisłej zależności pomiędzy przyspieszeniem wózka a jego masą i siłą działającą na wózek, między innymi ze względu na trudną do ustalenia rolę sił tarcia oraz bezwładność bloku. Może się na przykład zdarzyć, że jeśli masa wózka będzie duża, a obciążenie na sznurku małe, wózek w ogóle nie ruszy z miejsca. Niemniej obserwacja jakościowa prowadzi do następujących wniosków:

1. Pod wpływem działającej siły wózek porusza się ruchem przyspieszonym.
2. Im większa siła, tym większe przyspieszenie wózka.
3. Im większa masa wózka, tym jego przyspieszenie jest mniejsze.





Aby uzyskać ściśle liczbowe rezultaty, należałoby zastąpić wózek na przykład ślizgaczem na torze powietrznym. Dokładne badania prowadzą do wniosku sformułowanego przez Newtona, znanego jako druga zasada dynamiki.

druga zasada dynamiki

Druga zasada dynamiki

Jeżeli na ciało działa niezrównoważona siła, to porusza się ono ruchem zmiennym z przyspieszeniem wprost proporcjonalnym do działającej siły i odwrotnie proporcjonalnym do masy ciała. Kierunek i zwrot przyspieszenia są zgodne z kierunkiem i zwrotem siły.

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

Powyższe równanie stanowi podstawę wszelkich obliczeń dotyczących zachowania się ciał pod wpływem sił. Często przedstawiamy je też w innej postaci:

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

Taki zapis drugiej zasady dynamiki posłużył do zdefiniowania jednostki siły, którą nazwano na cześć Izaaka Newtona – niuton.

niuton – jednostka siły

1 niuton jest to siła, która ciału o masie 1 kilograma nadaje przyspieszenie $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

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

Przykład 1.

Ile na Ziemi wynosi ciężar masy 1 kg?

Rozwiązanie:

Ziemia nadaje wszystkim masom znajdującym się w jej pobliżu przyspieszenie ziemskie g równe $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Ciężar masy 1 kg wynosi więc:

$$F = m \cdot g, \quad F = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,81 \text{ N}$$

Zwróćmy uwagę, że pierwsza zasada dynamiki jest szczególnym przypadkiem drugiej. Jeśli bowiem przyjmiemy, że wartość wypadkowej siły działającej na ciało wynosi 0, to przyspieszenie również będzie miało wartość 0, a więc ruch będzie jednostajny. Z matematycznego punktu widzenia pierwsza zasada dynamiki nie wnosi nic nowego. Niemniej wyodrębnia się ją z przyczyn historycznych oraz ze względu na to, że uświadamia ona fakt nie dla wszystkich oczywisty: ruch jednostajny prostoliniowy nie potrzebuje przyczyny.

Przykład 2.

Jaką siłą lokomotywa powinna działać na 20-tonowy wagon, aby w ciągu minuty rozpędzić go do prędkości $27 \frac{\text{km}}{\text{h}}$? Pomijamy siły oporu ruchu.

Rozwiązanie:

Dane:

$$m = 20 \text{ t} = 20\,000 \text{ kg}$$

$$\Delta v = 27 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



$$\Delta t = 1 \text{ min} = 60 \text{ s}$$

Szukane:

$$F = ?$$

$$F = m \cdot a = m \frac{\Delta v}{\Delta t}, F = 20000 \text{ kg} \cdot \frac{7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{60 \text{ s}} = 2500 \text{ N}$$

Przykład 3.

Do ślizgacza o masie 200 g umieszczonego na poziomym torze powietrznym przyczepiono nitkę, którą przerzucono przez obracający się swobodnie krążek o pomijalnie małej masie. Do drugiego końca nitki przywiązano ciężarek o masie 50 g. Oblicz przyspieszenie, z jakim będzie się poruszać ślizgacz.

Rozwiązanie:

Dane:

$$M = 200 \text{ g} = 0,2 \text{ kg}$$

$$m = 50 \text{ g} = 0,05 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Szukane:

$$a = ?$$

Siła działająca na układ będzie równa ciężarowi masy zawieszanej na nitce:

$$F = m \cdot g.$$

Siła ta będzie działać nie tylko na ślizgacz, ale również na zawieszoną masę (oba ciała będą się poruszać z takim samym przyspieszeniem), więc za masę układu ciał należy przyjąć $M + m = 250 \text{ g}$. Poszukiwane przyspieszenie będzie więc równe:

$$a = \frac{mg}{M+m}, a = \frac{0,05 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,25 \text{ kg}} = 1,96 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Samochód o masie 1200 kg rusza z miejsca. Siła, z jaką koła, trąc o asfalt, napędzają samochód, ma wartość 1500 N. Oblicz w zeszycie, jaką prędkość samochód osiągnie w ciągu 10 sekund. Pomijamy wszelkie siły oporu.
2. Silnik korekcyjny sondy kosmicznej o masie 400 kg ma siłę ciągu o wartości 100 N. Ile czasu potrzeba, aby po włączeniu silnika sonda przyspieszyła o $8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$?
3. Autobus wraz z pasażerami ma masę 16 ton i jedzie z prędkością $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Jaką wartość musi mieć siła tarcia kół o asfalt w czasie hamowania, aby autobus zatrzymał się w ciągu 25 sekund? Pozostałe opory ruchu autobusu pomijamy.
4. Na orbicie panuje stan nieważkości i używanie jakichkolwiek wag nie ma sensu. Kosmonauta, dysponując siłomierzem, znalazł jednak sposób na wyznaczenie nieznannej masy pewnej paczki. Umieścił ją przed sobą w powietrzu nieruchomo, przyczepił do niej siłomierz i zaczął ją ciągnąć za pośrednictwem siłomierza, cały czas uważając, by wskazanie siłomierza wynosiło 1 N. Kosmonauta stwierdził, że w ciągu sekundy paczka przesunęła się o 1 metr. Oblicz masę paczki.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 70 • Jeżeli na ciało działa niezrównoważona siła, to porusza się ono ruchem jednostajnie zmiennym z przyspieszeniem wprost proporcjonalnym do tej siły i odwrotnie proporcjonalnym do masy ciała. Jest to treść II zasady dynamiki.
- s. 70 • Jednostką siły jest niuton. 1 niuton jest to siła, która masie 1 kg nadaje przyspieszenie $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

4. Trzecia zasada dynamiki

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie trzecią zasadę dynamiki;
- będziesz stosować trzecią zasadę dynamiki do opisu zachowania się ciał.

Doświadczenie 1.

Weź do ręki dwa różne siłomierze i zaczepl jeden o drugi. Jeden trzymaj nieruchomo, a drugim pociągaj z różnymi siłami. Odczytuj wskazania obydwu siłomierzy. Co zauważyłeś/zauważyłaś?

Doświadczenie 2.

Teraz drugi siłomierz trzymaj nieruchomo, a pierwszym pociągaj drugi z różnymi siłami. Obserwuj wskazania obydwu siłomierzy. Co zauważyłeś/zauważyłaś?



Rys. 14. Dwa siłomierze rozciągające się nawzajem.

Doświadczenie 3.

Nadmuchaj balonik gumowy, a następnie puść go swobodnie, pozwalając powietrzu wydobywać się przez otwór. Zaobserwuj zachowanie się balonika.

Doświadczenie 4.

Rzuć piłeczką pingpongową lub kauczukową w lekką ściankę zbudowaną z drewnianych klocków lub kawałka styropianu. Zaobserwuj zachowanie się ściany i piłeczki.



Doświadczenie 5.

Na dwa jednakowe drewniane klocki pływające w pewnym oddaleniu od siebie w naczyniu z wodą połów lekkie magnesy skierowane do siebie przeciwnymi biegunami. Zaobserwuj zachowanie się „łódek” z magnesami.

W doświadczeniach z siłomierzami przekonujemy się, że obojętnie który z nich jest „sprawcą” oddziaływania, wskazania obydwu są zawsze jednakowe. Jeśli jeden siłomierz działa na drugi, to ten drugi działa na pierwszy siłą o tej samej wartości i tym samym kierunku, ale przeciwnym zwrocie.

W doświadczeniu z balonikiem występuje oddziaływanie pomiędzy cząsteczkami powietrza w baloniku a jego powłoką. Cząsteczki powietrza odepchnięte od jego wewnętrznej ścianki opuszczają balonik przez otwór, a sam balonik przemieszcza się w przeciwną stronę, gdyż jest odpychany przez powietrze.

Pileczka uderzająca w ściankę działa na nią siłą – ścianka się przewraca. Jednocześnie ścianka działa też siłą na pileczkę, która ulega odbiciu.

W doświadczeniu z magnesami żadna z łódek nie pozostała nieruchoma. Pierwszy magnes przyciągnął drugi w takim samym stopniu, jak drugi magnes przyciągnął pierwszy.

Siedząc na niewygodnym krześle, niewątpliwie działamy na niego siłą spowodowaną naszym ciężarem. Jednocześnie krzesło nas uwiera – też działa na nas siłą.

Karateka uderzający pięścią w deskę może ją złamać. Jednocześnie sam odczuwa ból. Nie tylko ręka oddziałuje na deskę, ale również deska na rękę.

Wszystkie te przykłady prowadzą do jednego wniosku: **oddziaływania pomiędzy ciałami są zawsze wzajemne**. Siły zawsze występują parami. Jeśli jedno ciało działa na drugie pewną siłą, zwaną **siłą akcji**, to drugie oddziałuje na pierwsze siłą o tej samej wartości i tym samym kierunku, ale przeciwnym zwrocie, zwaną **siłą reakcji**. Siły te się nie równoważą, ponieważ mają różne punkty przyłożenia. Jest to treść trzeciej zasady dynamiki Newtona.

wzajemność
oddziaływań

siła akcji i reakcji

Trzecia zasada dynamiki

Nie istnieją w przyrodzie pojedyncze siły. Siłę $\vec{F}_{AB}$, z jaką ciało A działa na ciało B , zawsze towarzyszy siła reakcji $\vec{F}_{BA}$, z jaką ciało B działa na ciało A . Siły te mają jednakowe wartości i wspólny kierunek, lecz przeciwne zwroty i różne punkty przyłożenia.

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

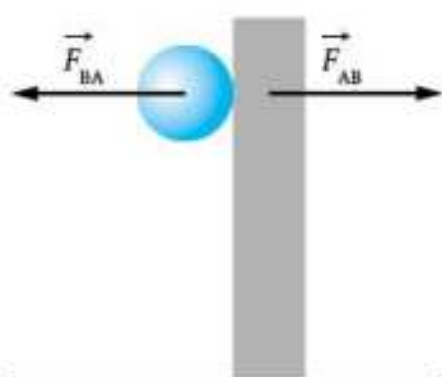
trzecia zasada
dynamiki



**wnioski z trzeciej
zasady dynamiki**

Z trzeciej zasady dynamiki możemy wysnuć kilka ważnych wniosków:

1. Siła zawsze musi mieć jakieś źródło: ciało, które w jakiś sposób tę siłę wywiera.
2. Musi też istnieć drugie ciało, na które ta siła działa. Nie istnieje siła, która na nic nie działa. Pamiętamy, że siły poznajemy po skutkach. Tym skutkiem jest reakcja ciała, na które siła działa.
3. Siły akcji i reakcji działają jednocześnie, ale się nie równoważą, gdyż są przyłożone do różnych ciał. Oznacza to, że każda z tych sił wywołuje swój niezależny skutek.



Rys. 15. Piłeczka uderza w klocek, a klocek działa na piłeczkę siłą reakcji. Za chwilę piłeczka się odbije, a klocek przewróci.

Działanie pierwszego siłomierza w doświadczeniu powodowało rozciągnięcie drugiego. Działanie drugiego siłomierza powodowało rozciągnięcie pierwszego. Nacisk cząsteczek powietrza na ścianki balonika powodował ruch balonika. Nacisk ścianek na cząsteczki powietrza powodował ruch cząsteczek powietrza. Piłeczka uderzająca w ściankę przewraca ją. Ścianka, działając siłą reakcji, odbija piłeczkę.

To z powodu trzeciej zasady dynamiki wypadki komunikacyjne są takie groźne. Gdy samochód uderzy w drzewo, pojawiają się siły akcji i reakcji. Mają one te same wartości i kierunki oraz przeciwne zwroty. Ale ich wypadkowa nie wynosi 0. Obie siły powodują określone skutki, więc uszkodzeniu ulega zarówno drzewo, jak i samochód. W przypadku zderzeń wektory siły nie mogą być traktowane jako wektory swobodne.

Nie należy przez to sądzić, że trzecia zasada dynamiki jest szkodliwa. Wprost przeciwnie, umożliwia nam normalne funkcjonowanie. Dzięki niej możliwe jest na przykład chodzenie. Stawiając kroki, odpychamy podłogę „do tyłu”. Podłoga odpowiada nam siłą reakcji i przesuwa nas do przodu. Na zasadzie sił akcji i reakcji między kołami a jezdnią samochód może przyspieszyć lub zahamować, jak również pokonać zakręt.

Dzięki trzeciej zasadzie dynamiki możliwe jest pływanie. Z jednej strony siła wyporu stanowi reakcję na ciężar ciała zanurzonego w wodzie. Z drugiej strony – jeśli chcemy się przemieścić, wymachujemy odpowiednio rękami. Odpychamy wodę do tyłu, a sami przemieszczamy się do przodu.



Przykład z balonikiem ilustruje zasadę działania silnika odrzutowego, powszechnie stosowanego w lotach kosmicznych, podczas których nie ma się od czego odepchnąć. Gazy spalinowe o wysokiej temperaturze i ciśnieniu naciskają na przednią ściankę silnika. Na skutek sił akcji i reakcji gazy wylatują do tyłu, a rakieta przyspiesza do przodu.

Rys. 16. Silnik odrzutowy wykorzystuje III zasadę dynamiki.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Księżyc ma masę 81 razy mniejszą niż Ziemia. Jak sądzisz, co jest większe: siła, z jaką Ziemia przyciąga Księżyc, czy siła, z jaką Księżyc przyciąga Ziemię?
2. Oblicz w zeszycie, z jaką siłą Twoje ciało przyciąga Ziemię.
3. Podaj pięć istotnie różnych (i niewymienionych w tej książce) przykładów zjawisk, w których dominującą rolę odgrywa trzecia zasada dynamiki.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Wszystkie oddziaływania są wzajemne, a siły między ciałami zawsze występują parami. s. 73
- Każdej sile akcji towarzyszy siła reakcji. Siły te mają jednakowe wartości i kierunki, przeciwne zwroty i różne punkty przyłożenia. s. 73
- Siły akcji i reakcji nie równoważą się wzajemnie. Każda z nich wywołuje odrębny skutek. s. 73
- Gdyby nie trzecia zasada dynamiki, wiele zjawisk, które obserwujemy na co dzień, nie mogłoby przebiegać w znany nam sposób. s. 74

5. Inercjalne i nieinercjalne układy odniesienia. Siły bezwładności

NA TEJ LEKCJI

- uświadomisz sobie, że zasady dynamiki mają ograniczony zakres zastosowań;
- dowiesz się, co to są i skąd się biorą siły bezwładności.

Inercjalne układy odniesienia

Dzięki zasadom dynamiki świat wydaje się przewidywalny. Znając położenia i prędkości ciał oraz działające na nie siły, można przewidzieć, co się będzie z tymi ciałami działo w przyszłości. Zasady dynamiki wykorzystują na przykład bilardiści. Dobierając odpowiednio siłę i kąt uderzenia, potrafią sprawić, że bile będą się poruszać po z góry zaplanowanych trajektoriach, odpowiednio się zderzać i wpadać do odpowiednich otworów (luz). Czy gra byłaby przewidywalna, gdyby podłoga zaczęła drżeć z powodu wstrząsów tektonicznych albo stół bi-



Rys. 17. Aby gra w bilard była przewidywalna (i w ogóle możliwa), stół bilardowy musi się znajdować w układzie inercyjnym.



układy inercjalne

lardowy został ustawiony na obracającej się platformie karuzeli? Otóż okazuje się, że zasady dynamiki nie są spełnione bezwarunkowo we wszystkich układach odniesienia, a jedynie w niektórych, zwanych **układami inercjalnymi**. Tylko w takim układzie ciało, które dotąd spoczywało, będzie nadal spoczywać, a ciało, które się poruszało, nie zmieni stanu swojego ruchu.

Uogólniona postać pierwszej zasady dynamiki

Istnieje układ odniesienia, w którym ciało, na które nie działa żadna siła (lub działające siły się równoważą), będzie pozostawać w spoczynku lub poruszać się ruchem jednostajnym po linii prostej. Taki układ odniesienia nazywamy **układem inercjalnym**.

Tak więc ogólniejsza postać pierwszej zasady dynamiki zakłada istnienie układów inercjalnych, w których obowiązują prawa opisane na ostatnich lekcjach. Jak takie układy znaleźć?

W praktyce najczęściej przyjmuje się, że takim układem jest powierzchnia Ziemi. Jest to założenie słuszne, pod warunkiem że nie będziemy zbyt dociekliwi. Ziemia wiruje bowiem wokół swojej osi i istnieją subtelne zjawiska pozwalające ten ruch wykryć. Płaszczyzny drgań wahadeł, które w układach inercjalnych powinny być ustalone, się przekręcają. Rzeki, które płyną na północ lub południe, niesymetrycznie podmywają brzegi. Wiatry, które wieją w kierunkach południkowych, na skutek ruchu obrotowego Ziemi zakręcają, tworząc cyklony. Niemniej przeprowadzając „zwykłe” eksperymenty w laboratorium na powierzchni Ziemi, nie stwierdzimy odstępstw od zasad dynamiki ani żadnych innych praw fizyki, które będziemy badać. Można więc rzeczywiście przyjąć, że Ziemia jest dobrym przykładem układu inercjalnego.

Jeśli znajdziemy choć jeden inercjalny układ odniesienia, to znaczy, że mamy ich nieskończenie wiele. Każdy układ odniesienia, który porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym względem układu inercjalnego, również jest układem inercjalnym. Układem inercjalnym będzie więc autobus poruszający się ze stałą prędkością po idealnie prostej drodze, samolot lecący również ze stałą prędkością w obszarze, gdzie nie ma turbulencji, czy transatlantyk gładko sunący po spokojnych wodach. W każdym z tych układów stwierdzimy, że zasady dynamiki są spełnione, a gra w bilard możliwa.

przykład układu inercjalnego

zależność między układami inercjalnymi



alnie prostej drodze, samolot lecący również ze stałą prędkością w obszarze, gdzie nie ma turbulencji, czy transatlantyk gładko sunący po spokojnych wodach. W każdym z tych układów stwierdzimy, że zasady dynamiki są spełnione, a gra w bilard możliwa.

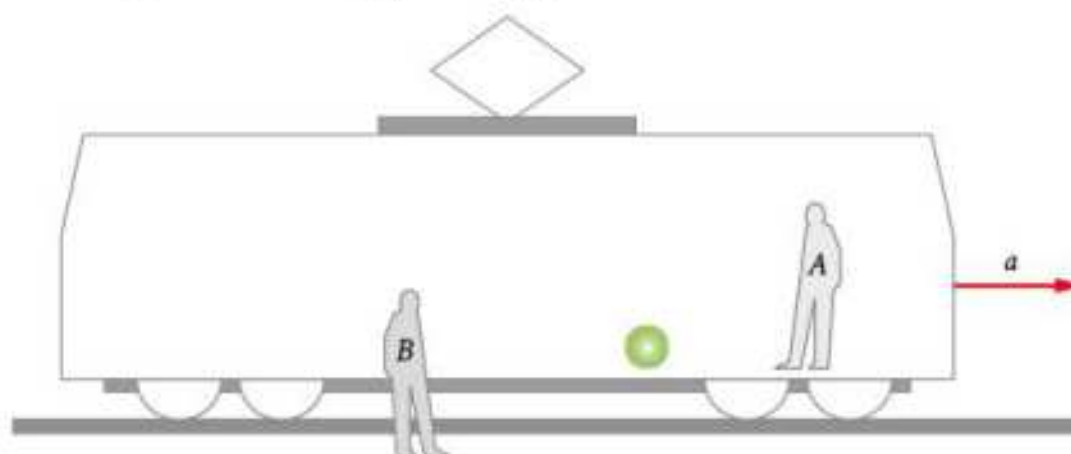
Rys. 18. Wahadło Foucaulta w paryskim Panteonie. Na skutek ruchu wirowego Ziemi płaszczyzna drgań wahadła zmienia swoją orientację.



Nieinercjalne układy odniesienia

Doświadczenie 1.

Położ na wypoziomowanym stole deskę symbolizującą na przykład podłogę tramwaju. Na desce postaw stabilny klocek. Będzie on symbolizował układ odniesienia związany z deską. Oznaczmy go literą *A*. Możemy sobie wyobrazić, że jest to pasażer tramwaju, Antek. Obok Antka połącz na desce kulkę – wyobraźmy sobie, że jest to piłka leżąca na podłodze tramwaju. Obok piłki, ale bezpośrednio na stole, postaw drugi klocek. Niech to będzie obserwator związany z układem *B*, na przykład Benek. Po ustawieniu wszystkich elementów przesun deskę po stole. Zaobserwuj zachowanie się piłki względem Antka i Benka.



Rys. 19. Dwaj chłopcy obserwują zachowanie się piłki w ruszającym tramwaju.

W chwili gdy tramwaj rusza z miejsca, Antek wpatrujący się w leżącą na podłodze, dotąd nieruchomą piłkę, widzi coś niesamowitego. Piłka bez wyraźnej przyczyny zaczyna się poruszać ruchem przyspieszonym, tak jakby działała na nią jakaś tajemnicza siła. Jest to siła pozorna, gdyż nie można wskazać jej źródła. Nazywamy ją **siłą bezwładności**. Pojawiła się dlatego, że tramwaj rozpoczął ruch przyspieszony, a więc przestał być układem inercyjnym.

siła bezwładności

Każdy układ odniesienia, który względem układu inercyjnego porusza się ruchem przyspieszonym, nazywamy **układem nieinercyjnym**. Na ciała znajdujące się w tym układzie działa dodatkowa siła, zwana siłą bezwładności.

układy
nieinercyjne

Sily, którymi zajmowaliśmy się do tej pory i do których stosują się zasady dynamiki, nazywamy siłami rzeczywistymi. W przeciwieństwie do nich siły bezwładności wykazują następujące cechy:

cechy sił
bezwładności

1. Nie można wskazać ciała, które byłoby źródłem tych sił.
2. Nie mają pary, w związku z czym nie stosuje się do nich trzecia zasada dynamiki.
3. Powodują rzeczywiste skutki, na przykład wprawiają ciała w ruch jednostajnie przyspieszony lub powodują deformacje.





Jedynym powodem występowania sił bezwładności jest nieinercjalność układu odniesienia. Z punktu widzenia Benka, który obserwuje piłkę, stojąc na przystanku, piłka zachowuje się zgodnie z zasadami dynamiki. W doświadczeniu kulka uległa tylko lekkiemu przesunięciu względem stołu, co było spowodowane siłą tarcia kulki o deskę. Gdyby nie siła tarcia, kulka pozostałaby na swoim miejscu. Benek widzi, że piłka utrzymuje swój stan bezruchu, natomiast to podłoga tramwaju odjeżdża spod piłki ruchem przyspieszonym.

Doświadczenie 2.

Trzymając jednocześnie deskę i leżącą na niej kulkę, wprowadź obydwie ciała w ruch jednostajny po blacie stołu. Puść kuleczkę i w pewnym momencie zatrzymaj ruch deski. Zaobserwuj ruch kulki względem deski i względem blatu stołu.

To doświadczenie odpowiada sytuacji, w której Antek jedzie ze stałą prędkością tramwajem i obserwuje piłkę nieruchomą względem podłogi. W pewnym momencie tramwaj zwalnia, a piłka „sama z siebie” zaczyna przyspieszać w stronę przodu tramwaju. Znowu mamy do czynienia z siłami bezwładności, gdyż hamujący tramwaj nie jest układem inercyjnym. Z punktu widzenia obserwatora zewnętrznego piłka chce, zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki, utrzymać stan swego ruchu i przemieszczać się dalej ze stałą prędkością. Tramwaj zwalnia, więc piłka przemieszcza się względem niego ruchem przyspieszonym.

Zauważmy, że kierunek siły bezwładności jest taki sam, jak kierunek przyspieszenia układu nieinercyjnego, natomiast zwrot jest przeciwny. Gdy tramwaj przyspiesza, siły bezwładności popychają piłkę do tyłu. Gdy zwalnia – siły bezwładności działają do przodu. Gdy tramwaj skręca w lewo, pasażerowie przechylają się w prawo itd.

Wartość siły bezwładności jest różna dla różnych ciał i jest proporcjonalna do ich masy. Może być obliczona ze wzoru

$$F = m \cdot a_u,$$

gdzie m to masa ciała, natomiast a_u to przyspieszenie (lub opóźnienie) ruchu układu nieinercyjnego. Trzeba wobec tego pamiętać, aby w czasie podróży szczególnie skrupulatnie mocować pakunki o dużej masie. W czasie nagłego skrętu lub hamowania będzie na nie działać duża siła i mogą się przemieścić, wyrządzając szkodę.



Rys. 20. Podczas jazdy samochodem należy mieć zawsze zapięte pasy bezpieczeństwa.



siły bezwładności
a pasy
bezpieczeństwa
w aucie

Z powodu występowania sił bezwładności podczas jazdy samochodem należy stosować pasy bezpieczeństwa. Dzięki nim pasażer samochodu, który uległ wypadkowi, zatrzyma się wraz z samochodem. Jeśli pasy są niezapięte, samochód w czasie wypadku zatrzymuje się na przeszkodzie, natomiast pasażer, z powodu swojej bezwładności, będzie kontynuować ruch i doznawać dodatkowych obrażeń.

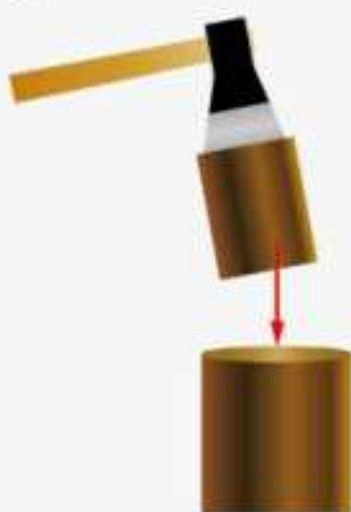
Pamiętaj: siły bezwładności są pozorne, ale skutki ich działania są rzeczywiste i mogą być tragiczne!

skutki działania sił
bezwładności

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Aby bez sztuczków wydobyć owoc, który przykleił się do dna głębokiego słoika, intuicyjnie wprawiamy go w ruch i uderzamy nim na przykład o otwartą dłoń. Wyjaśnij, dlaczego tak robimy.
2. Rysunek przedstawia dwa sposoby przerąbywania ciężkiego polana siekierą, która utkwiała w drewnie. Oceń, który sposób jest skuteczniejszy. Uzasadnij swój wybór.

a)



b)



3. Podaj trzy inne niż wymienione w rozdziale zastosowania sił bezwładności w życiu codziennym.
4. Wyjaśnij, dlaczego w windzie, która rusza do góry, czujemy się ciężsi.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Zasady dynamiki są spełnione tylko w niektórych układach odniesienia, zwanych układami inercyjnymi. s. 76
- Dowolny układ odniesienia poruszający się ruchem jednostajnym prostoliniowym względem układu inercyjnego też jest układem inercyjnym. s. 76
- Dobrym (lecz nie idealnym) przykładem układu inercyjnego jest Ziemia. s. 76
- Układ poruszający się z przyspieszeniem względem układu inercyjnego to układ nieinercyjny. s. 77
- W układach nieinercyjnych na ciała działają dodatkowe pozorne siły (siły bezwładności), powodujące rzeczywiste skutki. s. 77
- Siły bezwładności nie mają źródła ani pary – nie podlegają trzeciej zasadzie dynamiki. s. 77
- Podczas jazdy samochodem należy mieć zapięte pasy bezpieczeństwa. Działanie sił bezwładności podczas wypadku może być groźne w skutkach. s. 79



6. Siły w ruchu po okręgu

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się, jaka siła jest przyczyną ruchu po okręgu;
- zbadasz, jak ta siła zależy od masy i prędkości ciała oraz promienia okręgu;
- poznasz siłę bezwładności występującą w ruchu po okręgu.

Siła dośrodkowa

ruch jednostajny
po okręgu jest
ruchem zmiennym

Jak wspomnieliśmy wcześniej, ruch jednostajny po okręgu jest naprawdę ruchem zmiennym, gdyż zmienia się kierunek wektora prędkości. Zgodnie z drugą zasadą dynamiki, ze zmianą prędkości zawsze związana jest jakaś siła. Jeśli siła ta ma kierunek wektora prędkości chwilowej, powoduje ona zmianę tej prędkości co do wartości (a więc przyspieszenie albo opóźnienie ruchu). Kąt między siłą a torem (a więc i wektorem prędkości chwilowej) może być jednak dowolny. Taka siła zmienia prędkość zarówno co do wartości, jak i kierunku. W skrajnym przypadku siła może być prostopadła do toru. Zmienia ona wtedy tylko kierunek wektora prędkości, zmuszając ciało do ruchu po okręgu. Wektor siły jest stale skierowany wzdłuż promienia, a więc w stronę środka okręgu, stąd nazwa – **siła dośrodkowa**.

Na drodze rozważań teoretycznych można wykazać, że siła dośrodkowa wyraża się wzorem:

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

Jak widać, siła dośrodkowa działająca na ciało poruszające się po okręgu jest proporcjonalna do masy tego ciała i kwadratu jego prędkości oraz odwrotnie proporcjonalna do promienia okręgu (w ogólności: promienia krzywizny toru). Siła ta nie zmienia wartości prędkości, tylko jej kierunek, i jest zwrócona do środka okręgu, po którym odbywa się ruch.

siła dośrodkowa

Siła zmuszająca ciało do ruchu po okręgu nazywa się **siłą dośrodkową**, gdyż działa w kierunku środka okręgu (a więc prostopadle do kierunku ruchu). Siła ta jest proporcjonalna do masy ciała i kwadratu jego prędkości oraz odwrotnie proporcjonalna do promienia krzywizny toru. Siła dośrodkowa zmienia kierunek wektora prędkości, ale nie zmienia jego wartości.

O istnieniu siły dośrodkowej i jej roli w ruchu po okręgu łatwo się przekonać, wprawiając w ruch wirowy kulkę plasteliny przyczepioną do kawałka sznurka. Jeśli puścimy sznurek, kulka natychmiast przestanie podlegać sile dośrodkowej i polecą na bok, opuszczając swój dotychczasowy tor.



Doświadczenie 1.

Wartość siły dośrodkowej można zmierzyć w sposób pokazany na rysunku 21. Przez pustą rurkę (na przykład od długopisu) przewlekamy nitkę, na końcu której przyczepiamy obciążenie (ze względów bezpieczeństwa powinno to być coś miękkiego, na przykład plastelina). Do drugiego końca nitki przywiązujemy siłomierz. Następnie wprawiamy nitkę z plasteliną w ruch wirowy. Odczytujemy na skali siłomierza wartość siły dośrodkowej dla różnych prędkości.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że odczyt wartości siły będzie zafalszowany przez siłę tarcia nitki o krawędź rurki.

Opisane powyżej doświadczenie ma charakter jakościowy. Pozwala wykryć sam fakt istnienia siły dośrodkowej i stwierdzić, że rośnie ona wraz z częstotliwością ruchu, natomiast nie umożliwia ścisłego potwierdzenia słuszności podanego wzoru na siłę dośrodkową. Aby wykonać bardziej precyzyjne pomiary, najlepiej posłużyć się wirownicą z regulowaną prędkością i odpowiednim oprzyrządowaniem.



Rys. 21. Pomiar siły dośrodkowej.

Doświadczenie 2.

Wirownica szkolna (rys. 22.) wyposażona jest w regulator prędkości oraz dwa wrzeciona – jedno wirujące z pełną prędkością oraz drugie poruszające się z prędkością 10 razy mniejszą. Podczas pracy wyświetla liczbę obrotów na minutę wrzeciona szybszego. Aby obliczyć częstotliwość ruchu w hercach, wskazania na wyświetlaczu należy podzielić przez 60.

Do wolniejszego wrzeciona montujemy specjalny układ do pomiaru siły dośrodkowej, złożony z siłomierza zamontowanego wzdłuż osi obrotu i poziomej ry-nienki, po której może się toczyć kulka. Kulka przywiązana jest do siłomierza nitką przełożoną przez swobodnie obracający się blok, co minimalizuje problemy wynikające z występowania sił tarcia.



Rys. 22. Aparatura do pomiaru zależności siły dośrodkowej od masy ciała i parametrów jego ruchu.



Długość nitki ustalamy tak, by kulka znajdowała się mniej więcej w połowie odległości pomiędzy osią obrotu a końcem rynienki. Mierzymy tę odległość. Musimy wziąć pod uwagę, że w miarę wzrostu częstotliwości ruchu wirownicy promień toru kulki wzrasta, gdyż sprężyna w siłomierzu się wydłuża. Do zmierzonego na początku promienia musimy więc każdorazowo dodać odległość na skali siłomierza pomiędzy początkiem skali a wartością pokazywaną przez siłomierz podczas pomiarów. Zamieszczona niżej tabela uwzględnia ten fakt – zauważ, że im większa częstotliwość, tym dłuższy promień. Ważymy też kulkę. Wprawiamy wirownicę w ruch. Pomiary siły dośrodkowej wykonujemy dla kilku różnych częstotliwości ruchu wirownicy (częstotliwości te dobieramy z umiarem, aby nie spowodować groźnych skutków; z tego samego powodu używamy wrzeciona o małej prędkości). Za każdym razem zapisujemy częstotliwość ruchu i wskazania siłomierza. Jeśli dysponujemy kulką o innej masie, to ją ważymy i analogicznie powtarzamy pomiary.

Przykładowe wyniki pomiarów przedstawia tabela. F_z oznacza siłę wskazywaną przez siłomierz, a F_t przewidywaną wartość teoretyczną siły dośrodkowej, obliczoną na podstawie pomiaru masy, prędkości liniowej kulki i promienia jej toru. Dla mniejszej masy siły były mierzone siłomierzem o dokładności 0,05 N, a dla większej masy – z dokładnością 0,1 N.

$m_1 = 0,0526 \text{ kg}$						$m_2 = 0,0985 \text{ kg}$					
$\frac{\text{obr}}{\text{min}}$	$f, \text{ Hz}$	$F_z, \text{ N}$	$r, \text{ m}$	$v = 2\pi r f, \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$F_t = \frac{mv^2}{r}, \text{ N}$	$\frac{\text{obr}}{\text{min}}$	$f, \text{ Hz}$	$F_z, \text{ N}$	$r, \text{ m}$	$v = 2\pi r f, \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$F_t = \frac{mv^2}{r}, \text{ N}$
51	0,85	0,1	0,056	0,301	0,084	65	1,08	0,4	0,097	0,658	0,441
71	1,18	0,15	0,059	0,442	0,173	75	1,25	0,5	0,098	0,772	0,597
77	1,28	0,2	0,063	0,505	0,214	85	1,42	0,8	0,103	0,920	0,806
81	1,35	0,25	0,066	0,558	0,249	93	1,55	1	0,107	1,039	0,997
88	1,47	0,3	0,069	0,635	0,308	104	1,73	1,2	0,110	1,198	1,285
97	1,62	0,4	0,075	0,764	0,408	115	1,92	1,6	0,117	1,405	1,667
108	1,80	0,55	0,085	0,957	0,570	124	2,07	2,1	0,125	1,623	2,076
118	1,97	0,75	0,097	1,202	0,781	134	2,23	2,7	0,135	1,894	2,618
122	2,03	0,95	0,110	1,403	0,943	138	2,30	3	0,140	2,023	2,880

Jak widać, siły dośrodkowe wskazywane przez siłomierz (F_z) są w dużym stopniu zbieżne z przewidywaniami teoretycznymi wynikającymi ze wzoru (F_t). Drobne rozbieżności spowodowane są ograniczoną dokładnością wyników pomiarów, a w szczególności trudnościami w odczytywaniu siły z wirującego siłomierza. Przekonujemy się więc, że siła dośrodkowa jest rzeczywiście proporcjonalna do masy ciała, odwrotnie proporcjonalna do promienia okręgu i wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości liniowej.



Odśrodkowa siła bezwładności

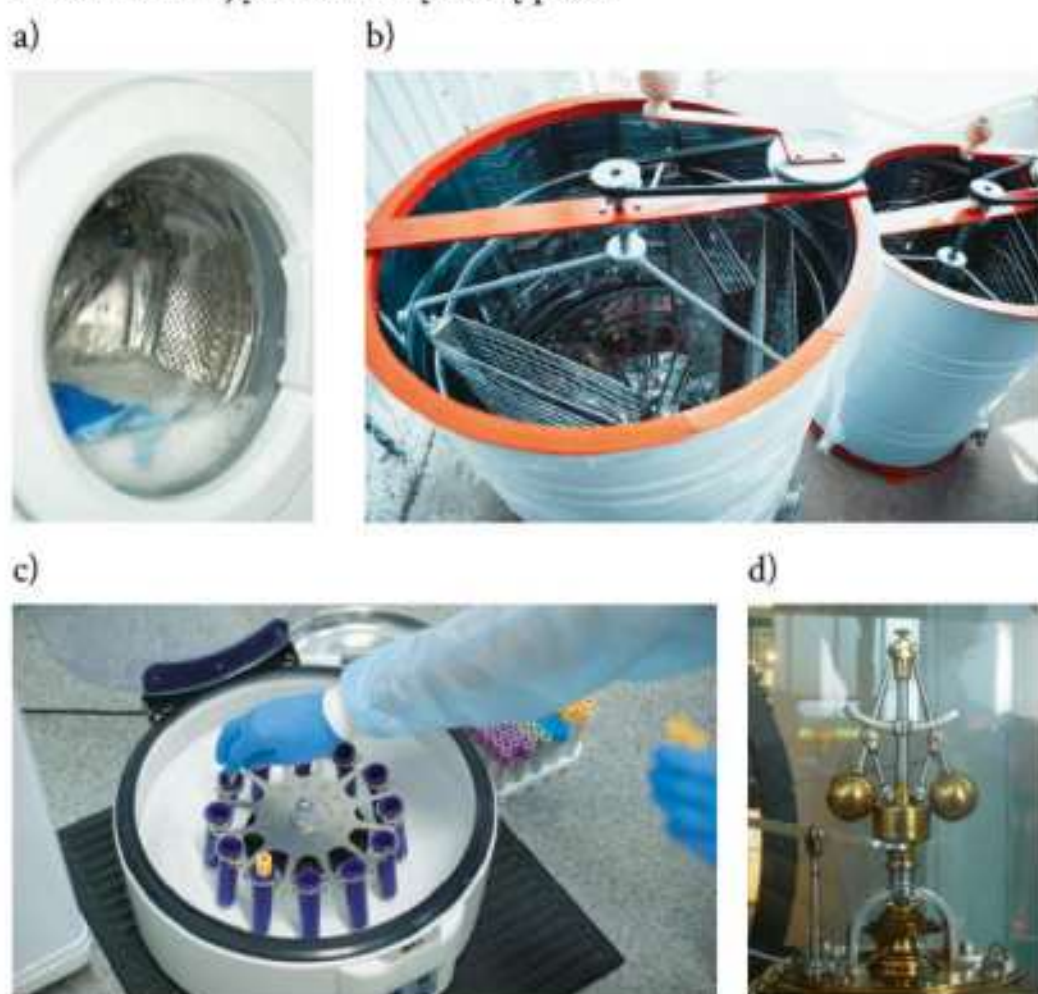
odśrodkowa siła
bezwładności

Układ związany z ciałem poruszającym się po okręgu jest układem nieinercyjnym (zmienia się kierunek wektora prędkości). W takim układzie działa siła bezwładności skierowana przeciwnie do siły dośrodkowej, czyli na zewnątrz okręgu. Jest to siła pozorna, wynikająca z faktu, że nie pozwalamy ciału poruszać się ruchem bezwładnym po linii prostej, ale jej skutki w wirującym układzie odniesienia są całkiem realne. Siłę odśrodkową czujemy, kręcąc się na karuzeli albo jadąc autobusem, który nagle gwałtownie skręca. To ona między innymi powoduje, że Ziemia nie ma kształtu idealnej kuli, tylko spłaszcza się na biegunach.

Siła odśrodkowa utrudnia pokonywanie zakrętów. Jeśli siła tarcia pomiędzy kołami a jezdnią jest niewystarczająca (na przykład podczas gołoledzi), samochód wypada z zakrętu. Ponieważ wartość siły odśrodkowej jest proporcjonalna do kwadratu prędkości liniowej, kluczowym czynnikiem bezpieczeństwa podczas jazdy w trudnych warunkach jest znaczące ograniczenie prędkości.

Siła odśrodkowa ma liczne zastosowania praktyczne. Jest stosowana w laboratoriach i urządzeniach technicznych. Wykorzystuje się ją także we wszelkiego rodzaju wirówkach. Za jej pomocą można suszyć pranie, wydobywać miód z plastrów, oddzielać poszczególne składniki krwi itd. Działający na zasadzie siły odśrodkowej regulator Watta służy między innymi do regulacji obrotów maszyny parowej. W stacjach kosmicznych może być wykorzystywany do wytwarzania „sztucznej grawitacji”. Montowane w samochodach bezwładnościowe pasy bezpieczeństwa pozwalają na wykonywanie przez pasażera powolnych ruchów powodujących wydłużenie tych pasów. Gwałtowny ruch (na przykład podczas wypadku drogowego) powoduje, że w zwijaczu pod wpływem siły odśrodkowej uruchamia się odpowiednia zapadka uniemożliwiająca rozwinięcie się pasa.

zastosowania siły
odśrodkowej



Rys. 23. Praktyczne zastosowania siły odśrodkowej:

- a) bęben wirówki do bielizny,
- b) wirówka do miodu,
- c) wirówka laboratoryjna,
- d) regulator Watta.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wskaż te siły, które pełnią funkcję siły dośrodkowej w następujących przykładach ruchu krzywoliniowego: a) ruch krzeselka w karuzeli łańcuchowej, b) ruch Ziemi wokół Słońca, c) skręcanie samochodu na zakręcie, d) skręcanie samolotu przed podchodzeniem do lądowania, e) ruch elektronu wokół jądra atomowego.
2. Oblicz w zeszycie siłę dośrodkową działającą na pasażera autobusu, który z prędkością $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ wchodzi w zakręt o promieniu 120 m. Masa pasażera wynosi 70 kg.
3. Wymień co najmniej trzy zastosowania siły odśrodkowej nieopisane w tym rozdziale. Sporządź krótką notatkę na ich temat.

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 80

- Ruch jednostajny po okręgu jest (wbrew nazwie) ruchem zmiennym, ponieważ zmienia się kierunek wektora prędkości.

s. 80

- Przyczyną ruchu jednostajnego po okręgu jest siła dośrodkowa. Jest ona zwrócona w kierunku środka okręgu, a jej wartość jest wprost proporcjonalna do masy ciała i kwadratu jego prędkości liniowej oraz odwrotnie proporcjonalna do promienia okręgu.

s. 83

- Układ odniesienia poruszający się po okręgu nie jest układem inercyjnym. Występuje w nim siła bezwładności zwana siłą odśrodkową. Ma ona tę samą wartość, co siła dośrodkowa, i ten sam kierunek, ale przeciwny zwrot (na zewnątrz okręgu).

s. 83

- Siła odśrodkowa ma liczne zastosowania praktyczne.

7. Siły oporu. Tarcie

NA TEJ LEKCJI

- poznasz szczegóły dotyczące różnych rodzajów sił oporu;
- poznasz negatywne skutki oraz praktyczne zastosowania sił oporu.

Opór ośrodka

Siły oporu są nieodłącznym elementem ruchu w ośrodku materialnym – cieczy lub gazie. To one sprawiają, że samochody, samoloty i statki nie mogą się poruszać dowolnie szybko. Jadąc na rowerze, wprawiamy w ruch otaczające nas cząsteczki powietrza. Działamy na nie siłą i przekazujemy im energię. To sprawia, że jeśli przestajemy pedałować, rower jadący po poziomym torze zwalnia.



Siły oporu są to siły przeciwstawiające się ruchowi. Mają one zwrot przeciwny do zwrotu wektora prędkości.

siły oporu

czynniki
wpływające na
wartość sił oporu

Zastanówmy się, jakie czynniki wpływają na wartość sił oporu. Na pewno będzie to **prędkość ciała względem ośrodka**. Jeśli chcemy szybciej jechać rowerem, to musimy mocniej naciskać na pedały. Im szybciej chcemy się poruszać, tym bardziej musimy rozpędzać przylegające do nas cząsteczki ośrodka i przekazywać im więcej energii. Maksymalna prędkość, jaką jesteśmy w stanie osiągnąć na rowerze, odpowiada sytuacji, w której nasza maksymalna siła napędowa w całości równoważy siłę tarcia (mechanizmów wewnątrz roweru i kół o jezdnię) oraz siłę oporu powietrza. Kierując samochodem, z pewnością zauważymy, że nadmierna prędkość powoduje znaczny wzrost zużycia paliwa. Skrajnym przykładem działania sił oporu są zjawiska towarzyszące wpadnięciu meteoroidów do ziemskiej atmosfery. Ich prędkości są tak wielkie (zazwyczaj kilkadziesiąt kilometrów na sekundę), że uderzając o cząsteczki powietrza, rozgrzewają się do tysięcy stopni i odparowują, czemu towarzyszą efekty świetlne.



Rys. 24. Meteory – ślady, jakie zostawiają na niebie meteoroidy. Świecenie meteoroidów związane jest z występowaniem siły oporu podczas ich ruchu w górnych warstwach atmosfery.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na wartość sił oporu jest rodzaj ośrodka, a w szczególności takie jego cechy, jak **gęstość** i **lepkość**. Prędkości samolotów w powietrzu są znacznie większe niż prędkości statków na wodzie z prostej przyczyny: powietrze jest znacznie rzadsze od wody. Masy powietrza, które samolot rozpędza podczas ruchu, są mniejsze od mas wody wprawianych w ruch przez płynący statek, dlatego może poruszać się szybciej.

Wspomniana lepkość jest parametrem charakteryzującym siłę oddziaływania pomiędzy ślizgającymi się po sobie warstwami tego samego ośrodka, jest to tzw. tarcie wewnętrzne. W ośrodku o dużej lepkości (takim jak miód czy gęsty olej) cząsteczki przylegające do poruszającego się ciała trudniej rozpędzić, ponieważ oddziałują z większą siłą z cząsteczkami z sąsiednich warstw. Dlatego w miodzie i gęstym oleju trudniej się poruszać niż w wodzie. Lepkość ośrodka maleje ze wzrostem temperatury. Zimny silnik trudniej uruchomić niż gorący, ponieważ zimny olej o dużej lepkości utrudnia ruch tłoka w cylindrze.

Ostatnia grupa czynników wpływających na wartość sił oporu związana jest z cechami samego poruszającego się ciała: jego **wielkością**, **kształtem** i **rodzajem powierzchni**. Opory ruchu są tym większe, im większe jest pole przekroju ciała prostopadłe do kierunku ruchu, bardziej skomplikowany kształt i chropowata powierzchnia.



3. DYNAMIKA

Aby obiekt mógł szybciej poruszać się w danym ośrodku, nadaje mu się **kształt aerodynamiczny**, który zmniejsza opór ośrodka podczas ruchu. Rakiety oraz kadłuby samolotów i kajaków są wydłużone i wąskie, pociągi wielkich prędkości mają szpiczaste „noski”. Projektanci samochodów prześcigają się w obniżaniu oporów aerodynamicznych, aby zminimalizować zużycie paliwa. Narciarze i pływacy podczas zawodów używają strojów ściśle przylegających do ciała i uszytych z wyjątkowo gładkich materiałów.



Rys. 25. Opory ruchu są mniejsze, gdy poruszający się obiekt ma kształt aerodynamiczny.

Aerodynamikę odkryła też natura. Ryby mają kształty opływowe – wrzecionowate i gładkie. Ciała niektórych ptaków są tak skonstruowane, że mogą one szybować na wielkie odległości bez znacznego wysiłku. Budowa ciała zwierząt szybko biegających też minimalizuje siły oporu.



Rys. 26. Zwierzęta mają opływowe kształty, by zminimalizować siły oporu ruchu.

Opór aerodynamiczny bywa pożyteczny i jest wykorzystywany w praktyce. W astronautyce używa się go do wytracania prędkości statków kosmicznych podczas lądowania. Przy skokach z dużej wysokości używa się spadochronów. Typowe ciało



ludzkie, spadające z dużej wysokości z zamkniętym spadochronem, rozpędza się do prędkości przekraczającej $50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (czyli niemal $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$). Uderzenie w ziemię z taką prędkością nie daje wielkich szans na przeżycie. Otwierając spadochron, znacząco zwiększamy powierzchnię ciała prostopadłą do kierunku ruchu. Siły oporu gwałtownie wzrastają, a prędkość spadania znacznie maleje.

Rys. 27. Opór aerodynamiczny wykorzystujemy między innymi podczas skoków spadochronowych.



Tarcie

Tarcie to zjawisko zachodzące pomiędzy dwiema powierzchniami ciała stałego, ze-
tkniętymi ze sobą. Objawia się pojawieniem siły oporu, gdy przemieszczamy jedną
powierzchnię względem drugiej lub próbujemy to zrobić.

tarcie

Doświadczenie 1.

Do doświadczenia potrzebny będzie klocek z haczykiem i siłomierz. Doświad-
czenie będzie bardziej udane, jeśli powierzchnia klocka i podłoża będą chropo-
wate, a masa klocka – znaczna.

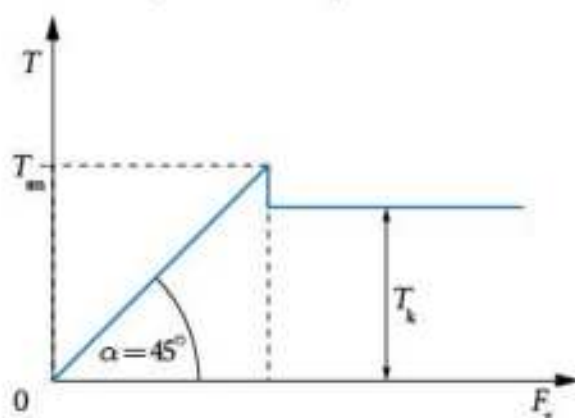
Klocek kładziemy poziomo na stole lub innym
podłożu, o haczyk zaczepiamy siłomierz i zaczy-
namy ciągnąć drugi koniec siłomierza, dbając o to,
by działająca siła była cały czas skierowana po-
ziomo. Rozpoczynamy od bardzo niewielkiej siły
i stopniowo ją zwiększamy, obserwując zachowa-
nie klocka.

Obserwacja:

W pewnym zakresie przyłożonych sił klocek pozostaje nieruchomy. Zgodnie
z pierwszą zasadą dynamiki, jeśli klocek pozostaje nieruchomy, to wszystkie
działające na niego siły muszą się równoważyć. W pionie na klocek działa siła
ciężkości, która jest równoważona przez siłę reakcji podłoża. W poziomie dzia-
łamy siłą wskazywaną przez siłomierz. Ponieważ klocek pozostaje nieruchomy,
musi być do niego przyłożona jeszcze jedna siła, o tej samej wartości, tym samym
kierunku i tym samym punkcie przyłożenia, ale przeciwnym zwrocie. Nazywa-
my ją siłą tarcia statycznego. Jej wartość może się zmieniać i jest ona zawsze rów-
na wartości siły, z jaką działamy na nieruchomy klocek.

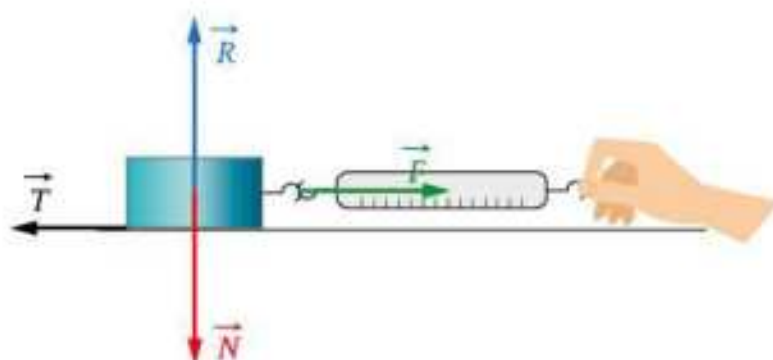
Po przekroczeniu pewnej wartości siły, klocek rusza z miejsca, a wskazanie siłomie-
rza maleje. Do kontynuowania ruchu ze stałą prędkością potrzebna jest mniejsza

siła, równoważąca tzw. siłę tarcia kinetycz-
nego. Wynika to stąd, że wprowadzenie ciała
w ruch wymaga większej siły niż utrzyma-
nie tego ruchu w warunkach tarcia.



Rys. 29. Zależność siły tarcia między
podłożem a klockiem od siły zewnętrznej
próbującej wprowadzić klocek w ruch.

Wyniki obserwacji ilustruje wykres na rysunku 29. Dopóki klocek pozostaje w miej-
scu, siła **tarcia statycznego** ma identyczną wartość jak siła zewnętrzna, dlatego
(jeśli obie osie wyskalowane są tak samo) wykres nachylony jest pod kątem 45° . Po
przekroczeniu maksymalnej wartości tarcia statycznego T_{sm} klocek rusza z miejsca,
a wartość siły spada do T_k – **tarcia kinetycznego**. W pewnym zakresie działającej



Rys. 28. Pomiar siły tarcia za pomocą siłomierza.

rodzaje tarcia
kinetycznego

siły zewnętrznej F_x wartość siły tarcia pozostaje stała i wykres w tym obszarze przebiega poziomo.

Aby opis rodzajów sił tarcia był kompletny, należy dodać, że tarcie kinetyczne ma dwie odmiany:

- **tarcie ślizgowe** – występujące wtedy, gdy jedną powierzchnię przesuwamy po drugiej,
- **tarcie toczne** – dotyczące brył obrotowych, które toczą się bez poślizgu po podłożu.

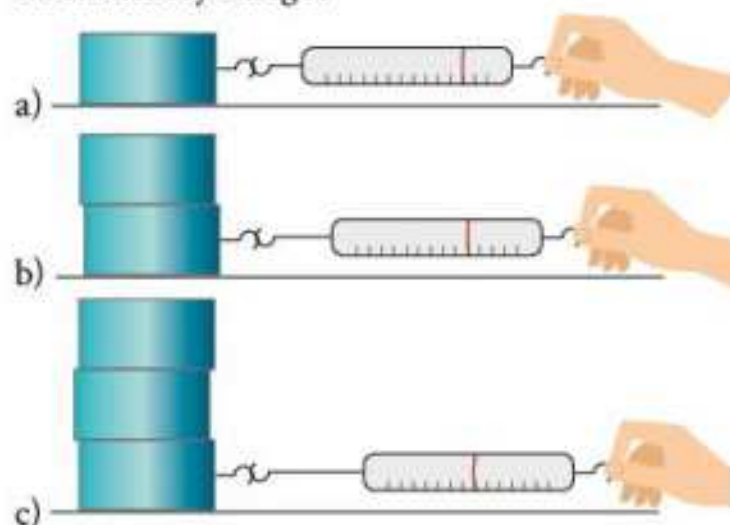
Siły tarcia tocznego są wielokrotnie mniejsze od sił tarcia ślizgowego, dlatego pojazdy wyposażone są w koła, a w łożyskach stosuje się stalowe kulki.

Wiesz już, jakie znamy rodzaje sił tarcia. Pora się zastanowić, od czego zależy wartość siły tarcia.

Doświadczenie 2.

Do doświadczenia potrzebne będą trzy jednakowe klocki (lub jeden klocek i komplet obciążników), pozioma powierzchnia (na przykład blat stołu) i siłomierz.

Do siłomierza przyczepiamy jeden klocek i pociągamy go poziomo za pomocą siłomierza tak, by poruszał się ruchem jednostajnym. Odczytujemy wartość siły tarcia kinetycznego.



Rys. 30. Im większa siła nacisku, tym większa siła tarcia.

Następnie na pierwszym klocku kładziemy drugi klocek lub obciążniki w takiej ilości, aby siła nacisku na podłoże się podwoiła. Za pomocą siłomierza wprawiamy klocek w ruch jednostajny i odczytujemy wskazania siłomierza. Obserwacja: wartość siły tarcia kinetycznego jest dwa razy większa.

Na koniec na obu klockach kładziemy trzeci klocek lub stosujemy obciążniki tak, by potroić siłę nacisku. Dokonujemy pomiaru siły tarcia kinetycznego. Stwierdzamy, że siła ta potroiła się w stosunku do początkowej wartości. Wysnuwamy stąd wniosek, że siła tarcia jest proporcjonalna do siły wzajemnego nacisku pomiędzy trącymi powierzchniami.



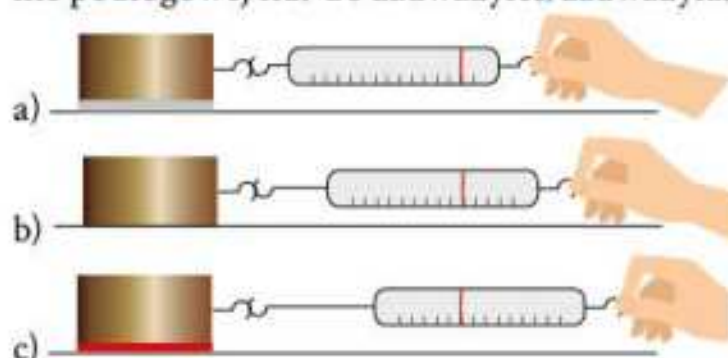
siła tarcia jest proporcjonalna do siły wzajemnego nacisku ciał

Siła tarcia jest proporcjonalna do siły wzajemnego nacisku pomiędzy trącymi powierzchniami.

Doświadczenie 3.

Przygotuj siłomierz oraz kilka klocków o jednakowych masach, oklejonych z jednej strony różnymi materiałami: filcem, papierem ściernym itd. Zmierz siłę tarcia kinetycznego tych klocków o blat stołu.

Inny wariant tego doświadczenia to przesuwanie za pomocą siłomierza tego samego klocka po różnych powierzchniach: blacie stołu, szybie, obrusie, wykładzinie podłogowej itd. Co zauważyłeś/zauważyłaś?



Rys. 31. a) klocek oklejony filcem, b) klocek drewniany, c) klocek oklejony papierem ściernym. Pomimo jednakowej siły nacisku, siły tarcia o blat stołu się różnią.

Obserwacja:

Przy jednakowej sile nacisku siły tarcia występujące pomiędzy odmiennymi rodzajami powierzchni się różnią.

Siła tarcia zależy od rodzaju trących powierzchni.

siła tarcia zależy od rodzaju trących powierzchni

Chcesz wiedzieć więcej?

Skoro siła tarcia (T) jest proporcjonalna do siły wzajemnego nacisku pomiędzy powierzchniami (N), to związek ten można zapisać następującym wzorem:

$$T = \mu \cdot N,$$

gdzie μ jest współczynnikiem proporcjonalności, zwanym współczynnikiem tarcia. Jest to wielkość bezwymiarowa, charakteryzująca rodzaj trących powierzchni. Można ją obliczyć na kilka sposobów, między innymi mierząc siłę tarcia (w sposób opisany w powyższych doświadczeniach) i siłę nacisku (czyli ciężar klocka) i podstawiając do wzoru:

$$\mu = \frac{T}{N}$$

W zależności od tego, czy trące powierzchnie spoczywają względem siebie, czy się ślizgają, wyróżniamy współczynnik tarcia statycznego i kinetycznego. Oczywiście niezależnie od rodzaju powierzchni, współczynnik tarcia statycznego jest zawsze większy od współczynnika tarcia kinetycznego.





Rola sił tarcia

Tarcie jest zjawiskiem tak powszechnym, że często nie uświadamiamy sobie wszystkich jego przejawów. Z jednej strony nam przeszkadza, z drugiej ułatwia, a czasami wręcz umożliwia normalne funkcjonowanie.

Bez tarcia nie moglibyśmy chodzić ani jeździć, nie utrzymalibyśmy w palcach żadnych przedmiotów. Nie trzymałyby gwoździe ani śruby. Nie działałyby hamulce.

Tarcie można zwiększyć na dwa sposoby: zwiększając siłę nacisku lub stosując odpowiednie powierzchnie. Pierwszy sposób wykorzystujemy na przykład w hamulcach, które są tak skonstruowane, by klocki hamulcowe maksymalnie dociskały poruszającą się powierzchnię. Podobnie działają śruby – ich mocne dokręcenie zapobiega samoczynnemu poluzowaniu się. Tarcie zwiększamy, posypując piaskiem oblodzony chodnik, stosując bieżniki w oponach i podeszwach butów oraz wykładając powierzchnię łazienki matami przeciwpoślizgowymi.

Z drugiej strony tarcie przeszkadza w działaniu mechanizmów. Powoduje wzrost zapotrzebowania na energię, przegrzewanie się i przedwczesne zużycie trących o siebie części. Jeśli chcemy je zmniejszyć, stosujemy smary. Gdzie to tylko możliwe, zastępujemy tarcie ślizgowe tarciem tocznym, którego siła może być nawet kilkaset razy mniejsza. Wynalazek koła był przełomowym momentem w rozwoju cywilizacji – umożliwił transport przedmiotów niemożliwych do udźwignięcia przez człowieka i zwierzęta dzięki małemu współczynnikowi tarcia tocznego.

a)



b)



Rys. 32. Przykłady mechanizmów, w których dążymy do tego, by siła tarcia była a) jak największa, b) jak najmniejsza.

Płozy sanek oraz narty wykonywane są z możliwie gładkich materiałów. Od wielu lat pracuje się nad pociągami magnetycznymi (tak zwanymi maglewami), które unosiłyby się nad torem. Zbudowane dotąd konstrukcje z łatwością przekraczają prędkość $400 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, gdyż ich siła napędowa musi przewyższać jedynie opór powietrza. Problem tarcia wyeliminowano również w torach powietrznych stosowanych w laboratoriach.



Rys. 33. Pociąg magnetyczny może rozwijać znaczne prędkości dzięki wyeliminowaniu tarcia o podłoże.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego krople deszczu, mimo że spadają z wysokości kilku kilometrów, nie rozpędzają się do ogromnych prędkości.
2. Jak należy się ubrać i jaką postawę przyjąć na rowerze, aby jak najmniejszym wysiłkiem jechać stosunkowo szybko?
3. Wyjaśnij (analizując kwestie tarcia kół o szyny), jak to możliwe, że lokomotywa jest w stanie wprowadzić w ruch kilkadziesiąt wagonów o łącznej masie wielokrotnie przekraczającej jej masę.
4. Wyjaśnij, na czym polega działanie ABS.
- 5*. Współczynnik tarcia statycznego płóz o śnieg wynosi 0,1, a współczynnik tarcia kinetycznego 0,04. Masa san z ładunkiem wynosi 80 kg. Jakiej siły należy użyć, aby ruszyć sanie z miejsca, a jakiej, by je później ciągnąć?

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Siły oporu występują podczas ruchu ciała w cieczy lub gazie. Zwrot siły oporu jest przeciwny do zwrotu wektora prędkości. s. 85
- Wartość siły oporu zależy od prędkości ciała względem ośrodka, właściwości tego ośrodka oraz cech poruszającego się ciała: jego wielkości, kształtu i rodzaju powierzchni. s. 85
- Tarcie to zjawisko zachodzące pomiędzy zetkniętymi ze sobą powierzchniami ciała stałego. Wy różniamy tarcie statyczne i kinetyczne, które dzieli się na ślizgowe i toczne. s. 87
- Siła tarcia zależy od rodzaju trących powierzchni i jest proporcjonalna do siły wzajemnego nacisku ciał. s. 89
- Tarcie jest nieodzownym elementem życia codziennego. Gdy nam pomaga, staramy się je zwiększyć, gdy przeszkadza – stosujemy smary, koła i łożyska, by je zminimalizować. s. 90



8. Praca i moc

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie definicję pracy i jej jednostki;
- dowiesz się, w jakich przypadkach praca jest dodatnia, równa 0 lub ujemna;
- przypomnisz sobie definicję mocy i jej jednostki.

Praca

Słowo *praca* często jest używane w mowie potocznej. Ludzie chodzą do pracy, obowiązuje ich Kodeks Pracy. W myśl jego przepisów urzędnik, który siedzi nieruchomo na krześle i czyta treść dokumentu – pracuje. W fizyce rozumienie tego słowa jest jednak inne.

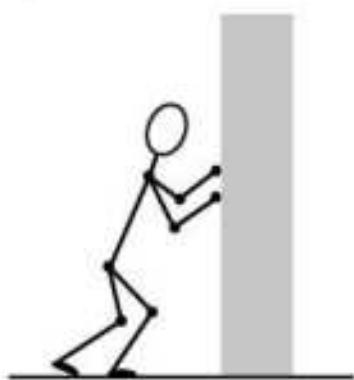
warunki
istnienia pracy

Aby mówić o pracy, muszą być spełnione dwie przesłanki:

1. musi działać jakaś siła,
2. ta siła musi spowodować przesunięcie lub odkształcenie.

Przesłanki te muszą być spełnione łącznie. Jeśli działamy siłą, nawet dużą, i się zmęczymy, ale nie spowoduje ona przesunięcia, z punktu widzenia fizyki nie wykonamy pracy. Podobnie dzieje się, jeśli występuje przesunięcie, ale niespowodowane działaniem siły (gdyż jest ona zrównoważona, a prędkość ruchu jest stała), praca jest równa 0.

a)



b)



Rys. 34. Przykłady sytuacji, w których nie jest wykonywana praca: a) chłopiec naciska z wielką siłą na ścianę, ale ściana pozostaje na swoim miejscu, b) krążek hokejowy przemieszcza się bez tarcia ruchem jednostajnym prostoliniowym po śliskim lodzie.

Pracę oznaczamy literą W (ang. *work*). Jeśli na ciało działa siła i powoduje ona przesunięcie, którego kierunek i zwrot jest zgodny z kierunkiem i zwrotem siły, to pracę obliczamy, mnożąc siłę i przesunięcie, zgodnie ze wzorem:

$$W = F \cdot s$$

Praca jest wielkością skalarną. Jednostkę pracy nazywamy *dżulem* – na cześć angielskiego fizyka Jamesa Prescottta Joule'a (1818–1889), który zajmował się badaniami naukowymi dotyczącymi ciepła, pracy i energii. Praca wynosi 1 dżul, jeśli siła o wartości 1 niutona spowoduje przesunięcie o wartości 1 metra: $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$.



Jeśli siła powoduje przesunięcie o kierunku i zwrocie tej siły, to **praca** jest iloczynem siły i przesunięcia:

$$W = F \cdot s$$

1 dżul jest to praca, jaką siła 1 niutona wykonuje na drodze 1 metra.

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

Doświadczenie

Polóż swój piórnik na podłodze. Zaczep o niego siłomierz i unieś piórnik na wysokość blatu biurka. Zmierz wysokość biurka. Oblicz pracę, jaką wykonałeś/ wykonałaś podczas podnoszenia piórnika.

Chcesz wiedzieć więcej?

W praktyce często się zdarza, że siła i przesunięcie mają różne kierunki. Wtedy obliczanie pracy jest bardziej skomplikowane.

Rozważmy sytuację, w której chłopiec ciągnie po podłodze skrzynię, działając na nią siłą $\vec{F}$ skierowaną pod pewnym kątem (rys. 35.). W takim przypadku siłę $\vec{F}$ musimy rozłożyć na dwie składowe: siłę $\vec{F}_1$ skierowaną wzdłuż wektora przesunięcia i siłę $\vec{F}_2$ prostopadłą do niego. Zastosowaliśmy tutaj metodę równoległoboku do wykonania czynności odwrotnej do dodawania wektorów: zauważ, że wektor $\vec{F}$ jest sumą wektorów $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$. $\vec{F}$ jest wektorem wypadkowym, a $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ to wektory składowe. Za przesunięcie skrzyni odpowiedzialny jest tylko wektor siły $\vec{F}_1$. Siła $\vec{F}_2$ nie bierze udziału w ruchu. Możemy więc zdefiniować pracę w przypadku ogólniejszym: obliczamy ją, mnożąc przesunięcie przez wartość tej składowej siły, która to przesunięcie spowodowała.



Rys. 35. Obliczanie pracy, gdy siła nie jest równoległa do przesunięcia.

Praca jest iloczynem przesunięcia i tej składowej siły, która to przesunięcie spowodowała.

$$W = F_1 \cdot s$$



zależność pracy
od kąta między siłą
a przesunięciem

Analizując zależność pracy od kąta pomiędzy wektorem siły i wektorem przemieszczenia, dochodzimy do następujących wniosków:

1. Im większy jest kąt α (ale mniejszy niż 90°), tym mniejsza jest praca. Jeśli chcemy w pełni wykorzystać posiadaną siłę do wykonania pracy, powinniśmy ją skierować dokładnie w kierunku przesunięcia.
2. Gdy $\alpha = 90^\circ$ (siła jest prostopadła do przesunięcia), praca wynosi 0. Na przykład na krążek hokejowy z rysunku 34 b) działa siła grawitacji skierowana pionowo w dół. Krążek porusza się poziomo. Siła grawitacji nie ma nic wspólnego z ruchem krążka, więc wykonana przez nią praca nad krążkiem wynosi 0. Podobnie się dzieje, jeśli niesiemy ciężką torbę, idąc poziomym chodnikiem. Działamy na torbę siłą skierowaną ku górze (równoważymy siłę ciężkości), ale przemieszczamy się w poziomie. Chociaż ta czynność może być bardzo męcząca, z punktu widzenia fizyki nie wykonujemy żadnej pracy. Żadnej pracy nie wykonuje też siła dośrodkowa, która jest zawsze prostopadła do kierunku ruchu.
3. Gdy kąt α jest rozwarty, składowa $\vec{F}_1$ siły ma zwrot przeciwny niż przesunięcie, więc przeciwstawia się ruchowi. Stawiamy przed nią znak minus, a obliczona praca staje się ujemna. W skrajnym przypadku $\alpha = 180^\circ$ (siła $\vec{F}$ ma ten sam kierunek, co wektor przesunięcia, ale ma przeciwny zwrot) i wtedy wykonana praca wynosi:

$$W = -F \cdot s$$

Taką pracę wykonują na przykład hamulce (a w ogólności wszystkie siły oporu). Wykonana przez nie praca jest ujemna, ponieważ powoduje utratę energii przez poruszające się ciało.

W zależności od kąta pomiędzy wektorem siły a wektorem przesunięcia, praca może być dodatnia, równa 0 lub ujemna.

Przykład 1

Żuraw budowlany podniósł paletę cegieł o masie 500 kg na wysokość 12 m, po czym obrócił się, przemieszczając paletę w poziomie na drodze 10 m. Gdy ładunek znalazł się nad punktem docelowym, opuścił paletę o 1 m, stawiając ją na budynku. Oblicz pracę wykonaną przez żuraw.

Rozwiązanie:

Dane:

$$h_1 = 12 \text{ m}$$

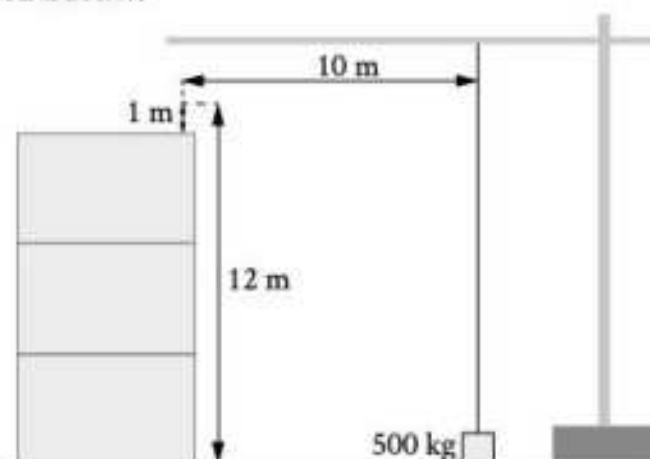
$$h_2 = 1 \text{ m}$$

$$m = 500 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Szukane:

$$W = ?$$





Przyjmujemy, że poza krótkimi momentami startu i zatrzymania ruch palety był jednostajny, co oznacza, że wszystkie siły działające na paletę cegieł się równoważyły. W szczególności siła nośna żurawia równoważyła siłę ciężkości palety z ceglami.

Praca żurawia podczas podnoszenia cegieł:

$$W_1 = F \cdot s = m \cdot g \cdot h_1 = 60\,000 \text{ J}$$

Podczas ruchu poziomego siła podtrzymująca paletę była prostopadła do kierunku ruchu. Żuraw nie wykonał żadnej pracy.

Podczas opuszczania cegieł żuraw cały czas działał na paletę siłą skierowaną ku górze, nie pozwalając ceglom spaść. Mimo to ładunek przesunął się w dół. Siła i przesunięcie miały przeciwne zwroty, więc wykonana praca jest ujemna.

$$W_2 = -m \cdot g \cdot h_2 = -5000 \text{ J}$$

Sumaryczna praca wykonana przez żuraw wynosi więc:

$$W = W_1 + W_2 = 55\,000 \text{ J}$$

Przykład 2.

Samochód o masie 1000 kg jechał z prędkością $36 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Kiedy naciśnięto na jego hamulec, zatrzymał się w ciągu 4 sekund. Oblicz pracę wykonaną przez siły tarcia kół o jezdnię w trakcie tego zdarzenia.

Rozwiązanie:

Dane:

$$m = 1000 \text{ kg}$$

$$v = 36 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

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

Szukane:

$$W = ?$$

Opóźnienie samochodu podczas hamowania wynosiło: $a = \frac{v}{t}$, $a = 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Siłę tarcia obliczamy z drugiej zasady dynamiki: $F = m \cdot a$, $F = 2500 \text{ N}$.

W trakcie hamowania samochód przejechał drogę $s = v \cdot t - \frac{1}{2} a \cdot t^2 = \frac{vt}{2}$, $s = 20 \text{ m}$.

Praca siły tarcia (z uwzględnieniem zwrotu siły) wynosi więc:

$$W = -F \cdot s, \quad W = -50\,000 \text{ J}$$

Alternatywne rozwiązanie:

Wzór końcowy przyjmuje postać:

$$W = -F \cdot s = -m \cdot a \cdot s = -m \cdot \frac{v}{t} \cdot \frac{vt}{2} = -\frac{mv^2}{2}, \quad W = -50000 \text{ J}$$

Do wyprowadzonego tu wzoru powrócimy na lekcji poświęconej energii kinetycznej.





Moc

Tę samą pracę możemy wykonać szybciej lub wolniej. W tym samym czasie możemy wykonać większą lub mniejszą pracę. W obu przypadkach oznacza to, że moc urządzenia wykonującego pracę może być większa lub mniejsza.

Moc jest miarą szybkości wykonywania pracy.

Moc oznaczamy literą P (ang. *power*). Moc jest tym większa, im większa praca zostanie wykonana w danym czasie lub w im krótszym czasie zostanie wykonana dana praca. Jest więc proporcjonalna do pracy i odwrotnie proporcjonalna do czasu jej wykonania. Jednostką mocy jest wat. Nazwę tej jednostki nadano na cześć angielskiego konstruktora maszyn parowych, Jamesa Watta (1736–1819), którego prace zapoczątkowały rewolucję przemysłową w Anglii. Urządzenie ma moc 1 wata, jeśli w ciągu 1 sekundy wykona pracę 1 dżula.

moc

Moc jest to stosunek pracy do czasu, w jakim została ona wykonana.

$$P = \frac{W}{t}, \quad 1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}}$$

1 wat jest to moc urządzenia, które w ciągu 1 sekundy wykonuje pracę 1 dżula.

Występujące w powyższych definicjach słowo *urządzenie* należy rozumieć szeroko – jako dowolny obiekt wykonujący pracę. Może to być na przykład urządzenie mechaniczne, elektryczne, człowiek lub zwierzę.

Przykład 3.

Jakub w ciągu 8 sekund wyciągnął wiadro z wodą o masie 10 kg ze studni o głębokości 5 metrów. Oblicz moc, z jaką pracował Jakub.

Rozwiązanie:

Dane:

$$t = 8 \text{ s}$$

$$h = 5 \text{ m}$$

$$m = 10 \text{ kg}$$

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

Szukane:

$$P = ?$$

Aby wyciągnąć wiadro ze studni, Jakub musi zrównoważyć jego ciężar $F = m \cdot g$. Wartość przesunięcia jest równa głębokości studni h , więc praca wykonana przy wyciąganiu wiadra wynosi $W = m \cdot g \cdot h$.

W takim razie moc, z jaką pracował Jakub, może zostać obliczona ze wzoru:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{mgh}{t}, \quad P = 62,5 \text{ W}$$



Przykład 4.

Oblicz moc samochodu, który jadąc po poziomej drodze z prędkością $108 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, pokonuje opory ruchu o wartości 2500 N.

Rozwiązanie:

Dane:

$$v = 108 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$F = 2500 \text{ N}$$

Szukane:

$$P = ?$$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot v, \quad P = 75\,000 \text{ W} = 75 \text{ kW}$$

Na podstawie ostatniego przykładu warto zapamiętać, że moc może zostać obliczona jako iloczyn siły i prędkości (o ile oba te wektory mają zgodne kierunki i zwroty).

**moc jako iloczyn siły
i prędkości**

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Podaj inne, niewymienione w tym rozdziale przykłady na pracę dodatnią, ujemną lub zerową.
2. Renifer ciągnął sanie po śniegu na dystansie 2 km, a następnie po ścieżce posypanej piaskiem na dystansie 100 m. Siła tarcia sań o śnieg wynosiła 30 N, a o piasek 200 N. Oblicz w zeszycie, jaką łączną pracę wykonał renifer.
3. Oblicz w zeszycie średnią moc renifera z poprzedniego zadania, jeśli całą trasę pokonał w 15 minut.
4. Jaką maksymalną prędkość może rozwinąć samochód o mocy 60 kW, jeśli opory ruchu przy tej prędkości mają wartość 2000 N?
5. Moc samochodów podaje się czasami w starych jednostkach – koniach mechanicznych (KM), przy czym $1 \text{ KM} = 735 \text{ W}$. Samochód o mocy 150 KM rozwija prędkość $160 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Oblicz w zeszycie wartość sił oporu działających na samochód przy tej prędkości.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- O pracy w fizyce mówimy tylko wtedy, gdy siła powoduje przesunięcie. s. 92
- Praca to iloczyn siły i przesunięcia, o ile oba te wektory mają jednakowy kierunek i zwrot. s. 93
- Jednostką pracy jest 1 dżul. Jest to praca, jaką siła 1 niutona wykonuje na drodze 1 metra. s. 93
- Jeśli kąt między siłą i przesunięciem jest ostry, to praca jest dodatnia, jeśli prosty – praca jest równa 0, jeśli rozwarty – praca jest ujemna. s. 94
- Moc jest to stosunek pracy do czasu jej wykonania. s. 96
- Jednostką mocy jest 1 wat. Jest to moc urządzenia, które w ciągu 1 sekundy wykonuje pracę 1 dżula. s. 96
- Jeśli skutkiem działania siły jest równoważenie sił oporu i utrzymywanie stałej prędkości, to moc może być obliczona jako iloczyn siły i prędkości. s. 97



9. Energia kinetyczna

NA TEJ LEKCJI

- przypomnisz sobie pojęcie i rodzaje energii;
- przypomnisz sobie pojęcie energii kinetycznej oraz jej związek z pracą.

Czym jest energia?

Doświadczenie 1.

Do doświadczenia potrzebne będą: młotek, gwóźdź i deska lub klocek drewniany. Połóż deskę na stole, przyłóż do niej gwóźdź i spróbuj z całej siły wcisnąć go w drewno, naciskając obuchem młotka na główkę gwoździa. Co zauważyłeś/zauważyłaś?

Obserwacja: mimo znacznego wysiłku efekt jest mizerny. Jeśli w ogóle dało się wcisnąć gwóźdź w drewno, to tylko na niewielką głębokość.

Teraz zamachnij się młotkiem i uderz nim w główkę gwoździa.

Obserwacja: bez wysiłku udało się zagłębić gwóźdź w drewno.

Co się stało, że ten sam młotek za pierwszym razem nie zdołał wbić gwoździa w drewno, a za drugim razem uczynił to z łatwością? Otóż, aby się zamachnąć, musieliśmy podziałać na młotek siłą, która spowodowała przesunięcie. Innymi słowy, wykonaliśmy nad młotkiem pracę. Praca nie poszła na marne, tylko spowodowała zmagazynowanie w młotku energii, w tym przypadku energii kinetycznej. Dzięki niej młotek, uderzając w gwóźdź, mógł zadziałać na niego znaczną siłą, która spowodowała przesunięcie – zagłębienie gwoździa w drewnie. Młotek był w stanie wykonać pracę nad gwoździem.

Rozpędzanie młotka nie jest jedynym sposobem magazynowania w nim energii.

Doświadczenie 2.

Młotek z poprzedniego doświadczenia unieś na pewną wysokość nad gwóźdź częściowo wbity do deski. Upuść młotek na gwóźdź.

Obserwacja: gwóźdź bardziej zagłębił się w drewno.

Podnosząc młotek, przezwyciężyliśmy jego ciężar – wykonaliśmy pracę przeciwko sile ciężkości. Spowodowało to zmagazynowanie w młotku innego rodzaju energii – energii potencjalnej grawitacji. Posiadając tę energię, młotek był w stanie wykonać pracę – wbić gwóźdź.



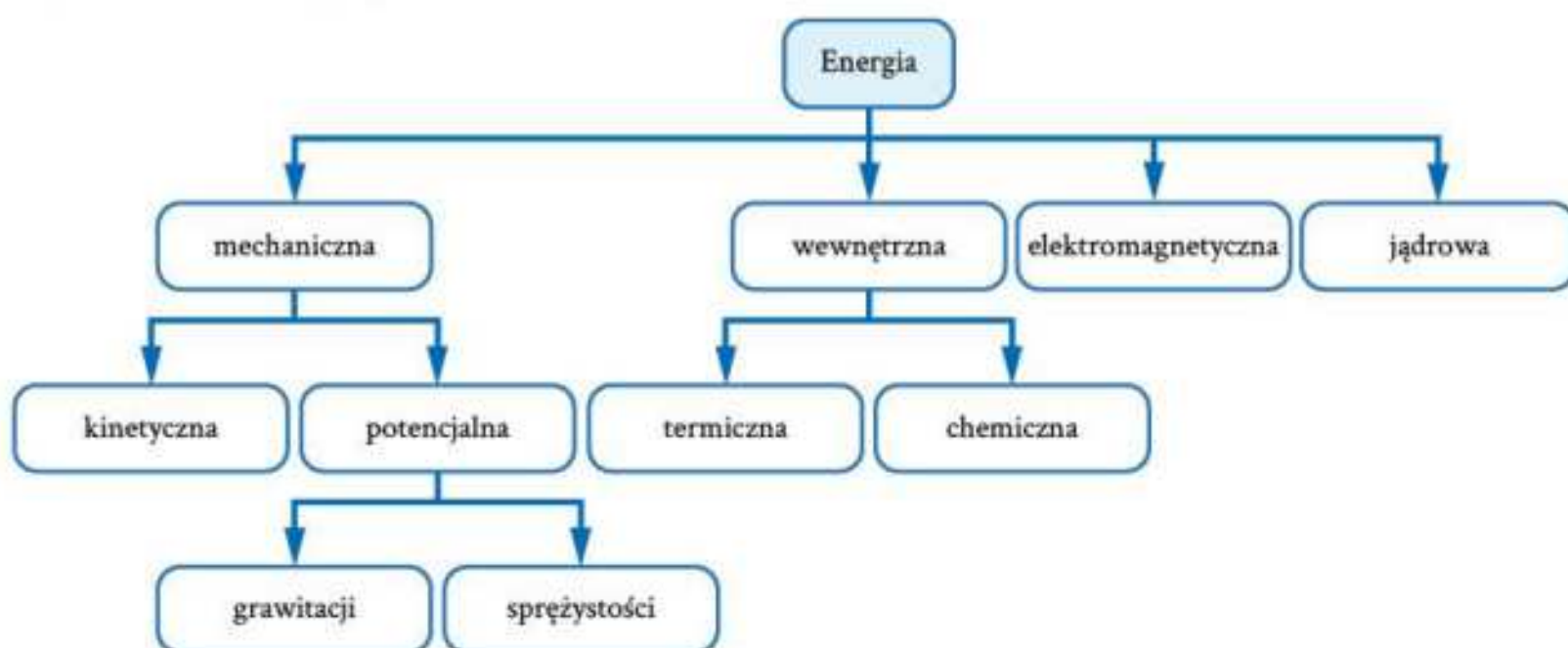
Rys. 36. a) rozpędzony młotek może wbić gwóźdź, ponieważ posiada energię kinetyczną, b) uniesiony młotek może wbić gwóźdź, bo ma energię potencjalną grawitacji.

Energia jest to zdolność ciała do wykonania pracy.

energia

Znamy wiele rodzajów energii. W szkole podstawowej poznałeś/poznałaś niektóre z nich. Poniższy diagram obrazuje te formy energii, które będą omawiane w liceum, w tym roku i w następnych latach nauki.

klasyfikacja energii



Rys. 37. Najczęściej spotykane formy energii.

W każdym przypadku energia może zostać zamieniona na pracę mechaniczną. Energia wewnętrzna sprężonej pary wodnej napędza silnik parowy. Energia zawarta w wiązaniach chemicznych składników benzyny i wydzielana w trakcie jej spalania, wprawia w ruch samochód. Energia elektryczna umożliwia działanie silnika elektrycznego. Energia jądrowa może zostać wykorzystana do napędzania łodzi podwodnych albo turbin w elektrowniach. Poza tym energia może zmieniać swoją postać, o czym będzie mowa niebawem.



Energia kinetyczna i jej związek z pracą

Obliczmy pracę, jaką wykonaliśmy, rozpędzając młotek o masie m do prędkości v . Zastosujemy znany nam już wzór na pracę:

$$W = F \cdot s$$

Siła, z jaką działamy na młotek, jest niezrównoważona, więc zgodnie z drugą zasadą dynamiki wprawia młotek w ruch jednostajnie przyspieszony z przyspieszeniem a :

$$F = m \cdot a$$

Przemieszczenie młotka można wyrazić jako drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym:

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

Łącząc powyższe wzory, otrzymujemy:

$$W = m \cdot a \cdot \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}m(at)^2$$

Jeśli młotek początkowo spoczywał, to jego prędkość końcowa może być zapisana jako:

$$v = a \cdot t$$

W takim razie otrzymujemy ostatecznie:

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

Przypomnijmy, że jest to praca potrzebna do rozpędzenia początkowo spoczywającego młotka o masie m do prędkości v . Praca ta została w całości zamieniona na energię związaną z ruchem – energię kinetyczną. Jej wartość będzie taka sama, jak wartość wykonanej pracy:

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

energia kinetyczna

Energia kinetyczna jest to energia związana z ruchem ciała. Jest ona proporcjonalna do masy ciała i do kwadratu jego prędkości.

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

Zwróćmy uwagę, że prędkość występuje w tym wzorze w drugiej potęgze. Oznacza to, że dwukrotny wzrost prędkości powoduje aż czterokrotny wzrost energii kinetycznej.

Jednostką energii kinetycznej jest 1 dżul.

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



Przykład 1.

Samochód jadący z prędkością $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ przyspieszył do $120 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. O ile procent wzrosła jego energia kinetyczna?

Rozwiązanie:

Nie obliczymy samej energii kinetycznej, ponieważ nie znamy masy samochodu. Na podstawie danych możemy jednak wyznaczyć stosunek energii końcowej do początkowej. W takim przypadku nie musimy zamieniać jednostek, ponieważ jakiegokolwiek by nie były, wystąpią w liczniku i mianowniku i się skrócą. Otrzymamy wynik bezwymiarowy.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{1}{2}mv_2^2}{\frac{1}{2}mv_1^2} = \frac{v_2^2}{v_1^2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 = \left(\frac{120 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}}\right)^2 = 1,2^2 = 1,44$$

$$E_2 = 1,44E_1 = 144\% \cdot E_1$$

Odpowiedź:

Energia kinetyczna samochodu wzrośnie o 44%.

Powyższy wynik skłania do refleksji związanych z przestrzeganiem przepisów drogowych. Skutki wypadków drogowych są proporcjonalne nie do prędkości pojazdów, ale do ich energii kinetycznych. Prędkość samochodu wzrosła jedynie o 20%. Wydaje się, że to niewiele. Ale podczas ewentualnego uderzenia samochodu w przeszkodę, wyzwolona energia będzie aż o 44% większa!

Ponieważ prędkość jest pojęciem względnym, **energia kinetyczna też jest względna** – zależy od wyboru układu odniesienia. Energia kinetyczna walizki leżącej obok pasażera jadącego pociągu względem pasażera wynosi 0. W układzie związanym z Ziemią jej energia może być jednak duża. Gdy pociąg gwałtownie zahamuje, walizka może kogoś uderzyć. Skłania to do dalszych refleksji dotyczących wypadków komunikacyjnych – przeanalizujmy zatem przykład 2:

względność energii kinetycznej

Przykład 2.

Dwa samochody o jednakowej masie jadą naprzeciwko siebie z prędkościami $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ względem Ziemi. Oceń skutki ich ewentualnego zderzenia czołowego w porównaniu z uderzeniem takiego samochodu w nieruchomą przeszkodę.

Rozwiązanie:

Zadanie jest podobne do poprzedniego. Gdy samochód uderza w nieruchomą przeszkodę, jego prędkość względem przeszkody wynosi $v_1 = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Gdy dochodzi do zderzenia czołowego dwóch takich samochodów, ich prędkość względna wynosi $v_2 = 200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Jest to tak, jakby w nieruchomy samochód uderzył drugi samochód jadący z prędkością $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Jeśli podstawimy te prędkości do wzoru z poprzedniego zadania, dochodzimy do wniosku, że skutki zderzenia czołowego będą czterokrotnie bardziej tragiczne.





Obliczając pracę potrzebną do rozpędzenia młotka, zakładaliśmy, że początkowo spoczywał on w wybranym układzie odniesienia. Jeśli młotek od początku się poruszał (miał energię kinetyczną początkową E_{kp}), wykonanie nad nim pracy spowoduje zmianę tej energii.

$$W = \Delta E_k = E_{kk} - E_{kp}$$

Wobec tego energia kinetyczna końcowa będzie równa energii kinetycznej początkowej zmienionej o wartość wykonanej pracy (ta praca może być dodatnia lub ujemna).

$$E_{kk} = E_{kp} + W$$

W szczególności wykonanie pracy może spowodować zatrzymanie się ciała. Wtedy jego energia kinetyczna końcowa będzie równa 0.

$$0 = E_{kp} + W \Rightarrow E_{kp} = -W$$

Jeśli praca wykonana nad ciałem ma znak minus, to znaczy, że to ciało wykonało pracę (tracąc przy tym energię). Po raz kolejny przekonujemy się, że ciało może wykonać tyle pracy, ile wcześniej miało energii.

energia kinetyczna
i praca

Energia kinetyczna ciała równa jest pracy, jaką jest ono zdolne wykonać, zanim się zatrzyma.

Przykład 3.

Samochód o masie 1200 kg jechał z prędkością $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Po naciśnięciu na pedał hamulca zatrzymał się po przejechaniu 50 metrów. Oblicz średnią wartość siły tarcia kół o jezdnię podczas hamowania.

Rozwiązanie:

Dane:

$$m = 1200 \text{ kg}$$

$$v = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$s = 50 \text{ m}$$

Szukane:

$$F = ?$$

Rozwiązywanie tego zadania z wykorzystaniem zasad dynamiki i wzoru na drogę w ruchu jednostajnie opóźnionym jest możliwe, ale byłoby dosyć żmudne. O wiele prościej jest zauważyć, że zmiana energii kinetycznej samochodu równa jest pracy sił tarcia. Obie te wielkości są ujemne, więc w rachunkach znak minus można obustronnie pominąć. Energia kinetyczna końcowa jest równa 0, więc zmiana energii kinetycznej jest równa (co do wartości bezwzględnej) energii kinetycznej początkowej.

$$\frac{mv^2}{2} = W = F \cdot s \Rightarrow F = \frac{mv^2}{2s}, F = 2700 \text{ N}$$

Odpowiedź:

Średnia wartość siły tarcia podczas hamowania samochodu wynosi 2700 N.



W życiu codziennym nieustannie wykorzystujemy energię kinetyczną, często bezwiednie. Dzieje się tak za każdym razem, gdy robimy coś „z rozpędu”. W technice energia kinetyczna była już stosowana od wieków, na przykład w machinach oblężniczych zwanych taranami (rys. 38.). Służyły one do rozbijania bram fortyfikacji za pomocą rozpędzonych ciężkich pali.

Rys. 38. Średniowieczny taran.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Sprawdź odpowiednim rachunkiem, czy jednostką energii kinetycznej jest 1 dżul.
2. Oblicz w zeszycie, co ma większą energię kinetyczną: czołg o masie 30 ton i prędkości $36 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ czy samochód dostawczy o masie 3,5 tony i prędkości $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.
3. Jaką prędkość musiałby mieć motocyklista ważący wraz z motocyklem 250 kg, aby mieć taką samą energię kinetyczną, co samochód o masie 1,5 tony jadący z prędkością $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$?
4. Ciężarówka o masie 12 ton jechała z prędkością $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. W pewnym momencie zaczęła hamować z siłą 16000 N. Oblicz w zeszycie drogę hamowania do całkowitego zatrzymania.
5. Pojazd o masie 4 ton jechał z prędkością $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. W pewnym momencie kierowca na kilkanaście sekund zdjął nogę z gazu. W tym czasie siły oporu wykonały nad pojazdem pracę 250 kJ. Oblicz w zeszycie nową prędkość pojazdu. Wynik podaj w $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Energia jest to zdolność ciała do wykonania pracy. s. 99
- Znamy wiele form energii. Mogą one zmieniać swoją postać. Energia badana przez mechanikę (energia mechaniczna) dzieli się na energię kinetyczną i energię potencjalną. s. 99
- Energia kinetyczna związana jest z ruchem ciała. Jest ona proporcjonalna do masy ciała i kwadratu jego prędkości. s. 100
- Energia kinetyczna jest względna, zależy od wyboru układu odniesienia. s. 101
- Wykonanie pracy nad ciałem powoduje zmianę jego energii. s. 102



10. Energia potencjalna

NA TEJ LEKCJI

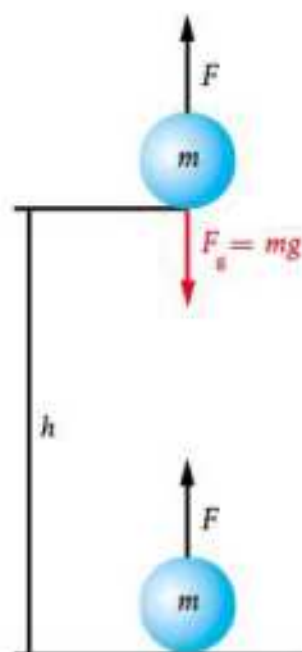
- przypomnisz sobie pojęcie energii potencjalnej grawitacji i potencjalnej sprężystości;
- dowiesz się o ograniczeniach stosowania wzoru na energię potencjalną, poznanego w szkole podstawowej;
- poznasz prawo Hooke'a dotyczące odkształceń sprężystych.

Energia potencjalna grawitacji

Energia kinetyczna związana jest z ruchem ciała. Energia potencjalna ma zawsze związek z położeniem ciała w obszarze działania pewnych sił. Obecnie zajmiemy się dwoma rodzajami takich sił: siłami grawitacji i siłami sprężystości. Wykonanie pracy przeciwko tym siłom powoduje przemieszczenie ciała i zmianę energii potencjalnej ciała o wartość wykonanej pracy.

Wróćmy do doświadczenia nr 2 z poprzedniej lekcji. Obliczmy pracę, jaką trzeba wykonać, by podnieść młotek (lub jakiegokolwiek inne ciało) o masie m na wysokość h .

Rys. 39. Podnosząc jednostajnie przedmiot o masie m na wysokość h , działamy stałą siłą równą co do wartości sile ciężkości działającej na to ciało.



Poza krótkimi momentami wprawiania w ruch i zatrzymywania, ciało porusza się ruchem jednostajnym, co oznacza, że wszystkie działające na nie siły się równoważą. Wobec tego siła, z jaką podnosimy ciało, jest co do wartości dokładnie równa sile ciężkości. Funkcję przesunięcia pełni wysokość. Kierunki i zwroty siły i przesunięcia są zgodne. W takim razie praca przy podnoszeniu ciała ma wartość:

$$W = F \cdot h = mgh$$

Podnosząc ciało, magazynujemy w nim energię potencjalną w takiej samej ilości, co wykonana praca. Ostatecznie wzór na energię potencjalną grawitacji przyjmuje postać:

$$E_p = mgh$$

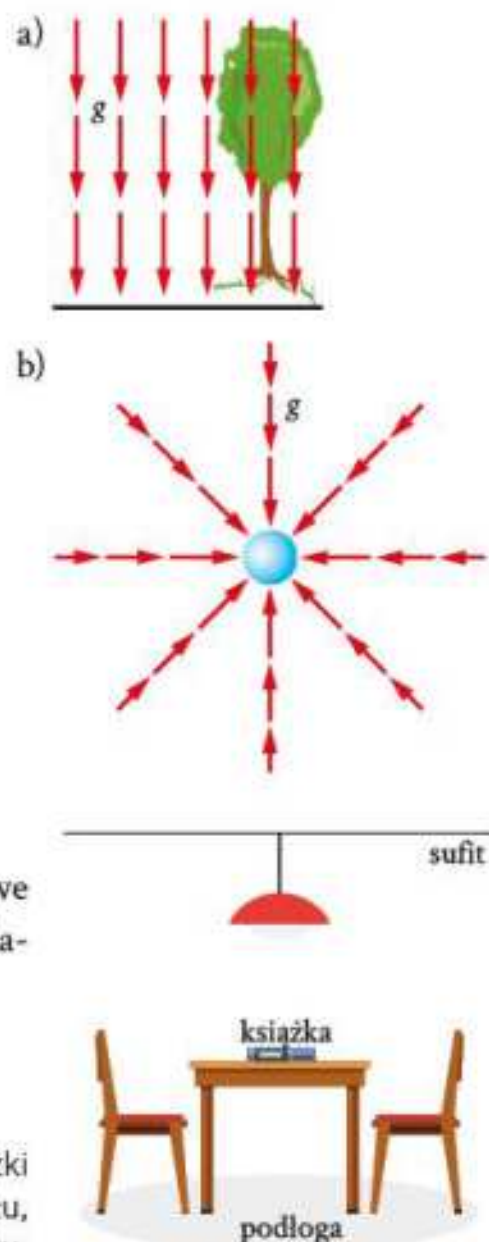
Wzór ten znasz już ze szkoły podstawowej. Musisz sobie jednak uświadomić, że zakres jego stosowania jest ograniczony.

warunki
stosowania wzoru
na energię
potencjalną
grawitacji



Przede wszystkim w naszych rozważaniach milcząco zakładaliśmy, że przyspieszenie grawitacyjne w każdym miejscu jest takie samo. Dopóki podnosimy ciało na niewielkie wysokości, znikome w porównaniu z rozmiarami Ziemi, założenie to jest prawdziwe. Ale wiemy, że w miarę oddalania się od Ziemi przyspieszenie grawitacyjne maleje. Ponadto kierunek przyspieszenia grawitacyjnego w Polsce jest inny niż na przykład w Australii. Dlatego powyższy wzór absolutnie nie nadaje się na przykład do wyznaczania parametrów lotów kosmicznych. Można go stosować jedynie w ograniczonym obszarze w pobliżu Ziemi, gdzie słuszne jest założenie, że przyspieszenie grawitacyjne ma stałą wartość i kierunek.

Rys. 40. a) W małej skali możemy uznać, że wektory przyspieszenia grawitacyjnego są do siebie równoległe i mają jednakowe wartości; b) w dużej skali kierunki wektorów przyspieszenia rozchodzą się promieniście, a ich długości maleją wraz z odległością od Ziemi.



Drugi problem związany jest z określeniem wysokości występującej we wzorze. Zastanówmy się, jaka jest energia potencjalna książki leżącej na blacie stołu (rys. 41.).

Rys. 41. Energia potencjalna książki jest różna względem blatu stołu, podłogi i sufitu.

Książka przylega do blatu stołu, więc jej energia względem tego blatu jest równa 0. Leżąc na stole, książka nie wykona żadnej pracy. Ale książka może spaść ze stołu, wywołując określone skutki. Względem podłogi książka znajduje się na pewnej wysokości i ma dodatnią energię potencjalną. Spadając, może wykonać pracę. Jeśli jako poziom odniesienia przyjmujemy sufit, okaże się, że musimy wykonać pracę, aby ją tam przenieść. Energia potencjalna książki względem sufitu jest ujemna! Jeszcze inna będzie na przykład względem powierzchni Ziemi.

Który poziom odniesienia jest zatem właściwy? Okazuje się, że jest to kwestia naszego wyboru. Energia potencjalna wyrażona wzorem $E_p = mgh$ jest pojęciem względnym. Każdorazowo musimy ustalić, względem jakiego poziomu odniesienia ją mierzymy.

Energia potencjalna grawitacji związana jest z położeniem ciała. Obliczamy ją ze wzoru $E_p = mgh$, gdzie m to masa ciała, g – przyspieszenie grawitacyjne, a h – wysokość względem poziomu odniesienia.

Wzór ten możemy stosować jedynie w ograniczonym obszarze w pobliżu Ziemi, w którym przyspieszenie grawitacyjne jest stałe.

Tak wyrażona energia potencjalna jest wielkością względną – zależy od wyboru poziomu odniesienia.

względność energii potencjalnej grawitacji

energia potencjalna grawitacji



W obszarach znacznie oddalonych od Ziemi obowiązuje inny, ogólniejszy wzór na energię potencjalną. Jest on pozbawiony ograniczeń związanych z niejednorodnością pola grawitacyjnego i wyborem poziomu odniesienia, ale jego omówienie wykracza poza zakres podstawowy.

Przykład

Podłoga parteru pewnego budynku znajduje się na wysokości 1 metra względem przyległego terenu, podłoga 1 piętra – na wysokości 4 metrów, a drugiego piętra – na wysokości 7 metrów. Na podłodze windy położono niewielką paczkę o masie 20 kg i przewieziono ją z pierwszego piętra na drugie.

A) Oblicz energię potencjalną paczki w chwili początkowej i chwili końcowej względem Ziemi, podłogi parteru, podłogi pierwszego i podłogi drugiego piętra.

B) Oblicz zmianę energii potencjalnej paczki mierzoną względem każdego z wymienionych poziomów odniesienia.

Rozwiązanie:

Paczka jest mała, więc przyjmujemy, że jej środek ciężkości znajduje się tuż przy podłodze.

W chwili początkowej paczka znajduje się na wysokości 4 m względem Ziemi, 3 m względem podłogi parteru, 0 m względem podłogi pierwszego piętra i -3 m względem podłogi drugiego piętra. Energia potencjalna początkowa paczki względem każdego z tych poziomów, obliczana ze wzoru $E_p = mgh$, będzie wynosić odpowiednio:

$$E_{pp1} = 800 \text{ J}, E_{pp2} = 600 \text{ J}, E_{pp3} = 0 \text{ J}, E_{pp4} = -600 \text{ J}.$$

Po dotarciu na drugie piętro, wysokość paczki wynosi: 7 m względem Ziemi, 6 m względem podłogi parteru, 3 m względem podłogi pierwszego piętra i 0 m względem podłogi drugiego piętra. Energia potencjalna końcowa dla każdego z tych poziomów przybiera wartość:

$$E_{pk1} = 1400 \text{ J}, E_{pk2} = 1200 \text{ J}, E_{pk3} = 600 \text{ J}, E_{pk4} = 0 \text{ J}.$$

Obliczmy zmiany energii potencjalnej paczki, zmierzone na każdym z wymienionych poziomów:

$$\text{Względem Ziemi: } \Delta E_1 = E_{pk1} - E_{pp1} = 1400 \text{ J} - 800 \text{ J} = 600 \text{ J}.$$

$$\text{Względem parteru: } \Delta E_2 = E_{pk2} - E_{pp2} = 1200 \text{ J} - 600 \text{ J} = 600 \text{ J}.$$

$$\text{Względem pierwszego piętra: } \Delta E_3 = E_{pk3} - E_{pp3} = 600 \text{ J} - 0 \text{ J} = 600 \text{ J}.$$

$$\text{Względem drugiego piętra: } \Delta E_4 = E_{pk4} - E_{pp4} = 0 \text{ J} - (-600 \text{ J}) = 600 \text{ J}.$$

Przykład ten uczy, że wprowadzić energię potencjalną jest wielkością względną, ale już zmiana tej energii – nie. Zmiana energii potencjalnej paczki jest w każdym układzie odniesienia równa pracy, jaką winda wykonała, podnosząc paczkę na wysokość 3 metrów. Wartość ta nie zależy od punktu obserwacji.

Wartość energii potencjalnej grawitacji ciała zależy od poziomu odniesienia. Zmiana energii potencjalnej grawitacji nie zależy od poziomu odniesienia i jest równa pracy, jaką trzeba wykonać, aby przenieść ciało z jednej wysokości na drugą.

$$\Delta E_p = mg\Delta h$$

związek między
energiami potencjalną
grawitacji a pracą



Rys. 42. Przykłady zastosowania energii potencjalnej grawitacji w praktyce: a) kafar, b) elektrownia szczytowo-pompowa.

Energia potencjalna jest szeroko stosowana w życiu codziennym i technice. Bardziej zaawansowaną wersją uniesionego młotka jest kafar służący do wbijania w grunt pali o wielometrowej długości. Elektrownie szczytowo-pompowe w czasie szczytu energetycznego pracują jak zwykłe elektrownie wodne. W okresie małego zapotrzebowania na energię wykorzystują nadmiar mocy w sieci do napędzania pomp tłoczących wodę do górnego zbiornika. W ten sposób elektrownia magazynuje w wodzie energię potencjalną. Gdy przychodzi znowu okres zwiększonego poboru mocy, woda przepływa z górnego zbiornika do turbin, gdzie energia potencjalna wody jest zamieniana na energię elektryczną.

Energia potencjalna sprężystości

Napięty łuk może wystrzelić strzałę. Trampolina pozwala wyskoczyć na znaczną wysokość. Lina bungee po maksymalnym rozciągnięciu unosi skoczka do góry. Są to trzy z wielu przykładów ciał, które zostały odkształcone, po czym wykonały pracę kosztem gromadzonej energii potencjalnej sprężystości.



Rys. 43. Odkształcając ciało, magazynujemy w nim energię potencjalną sprężystości, którą można wykorzystać do wykonania pracy.



Ze względu na właściwości mechaniczne, ciała stałe możemy podzielić na sprężyste, plastyczne i kruche. Pod wpływem przyłożonej siły ciała plastyczne ulegają trwałej deformacji, a kruche pękają. Jeśli przyłożona siła nie jest zbyt duża, odkształcone ciała sprężyste po ustaniu zewnętrznej siły deformującej powracają do pierwotnej postaci.

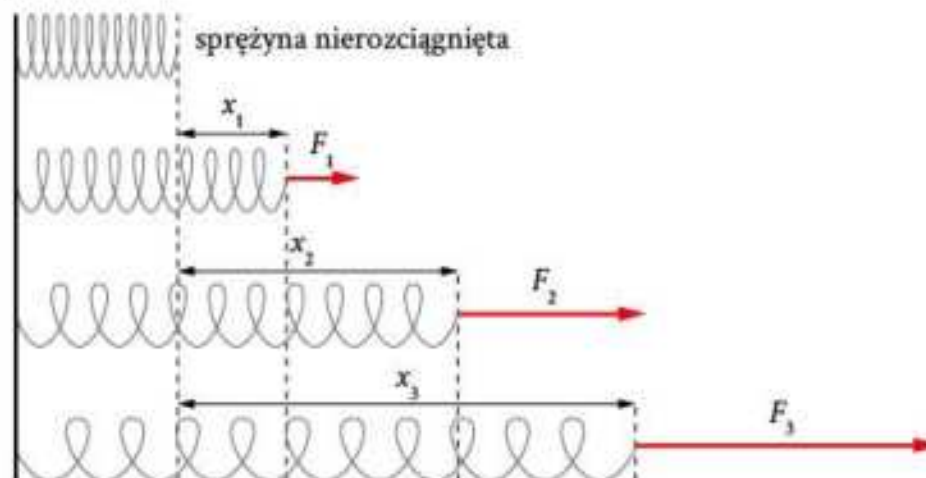
Już w 1660 roku wybitny fizyk angielski Robert Hooke (wymawiaj: Robert Huk; 1635–1703) odkrył, że deformacje ciał sprężystych są wprost proporcjonalne do wywołujących je sił. Będziemy się tym szczegółowo zajmować w klasie drugiej. W zależności od kształtu ciała i kierunku przyłożenia siły, deformacje mogą mieć różną postać (ściśnięcie, skręcenie itd.). My swoje rozważania będziemy odnosić do wydłużenia sprężyny (lub podobnego ciała, na przykład gumy).

prawo Hooke'a**Prawo Hooke'a**

W granicach sprężystości deformacje ciał sprężystych są proporcjonalne do wywołujących je sił.

$$F = k \cdot x$$

Występujący w prawie Hooke'a współczynnik proporcjonalności oznaczamy literą k i nazywamy współczynnikiem sprężystości. Litera x oznacza wydłużenie sprężyny (nie jej długość!).



Rys. 44. Wydłużenie sprężyny jest proporcjonalne do przyłożonej siły.

Sens współczynnika k łatwiej zrozumieć, przekształcając powyższy wzór:

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

Jednostką współczynnika sprężystości jest $1 \frac{\text{N}}{\text{m}}$. Współczynnik sprężystości ciała (na przykład sprężyny) wynosi $1 \frac{\text{N}}{\text{m}}$, jeśli pod wpływem siły 1 niutona ciało wydłuża się o 1 metr.

Rozciągając sprężynę, działamy siłą i powodujemy przesunięcie jej końca (punktu zaczepienia wektora siły). Wykonujemy więc pracę. Praca ta się nie marnuje, tylko zostaje zmagazynowana w postaci energii potencjalnej sprężystości.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Zrób krótką notatkę na temat przykładów wykorzystania energii potencjalnej grawitacji i energii potencjalnej sprężystości niewymienionych w tym rozdziale.
2. Młotek o masie 4 kg został podniesiony na wysokość 20 cm ponad główkę gwoźdź i swobodnie upuszczony. Na jaką głębokość wbił się gwoździe, jeśli założymy, że 50% początkowej energii potencjalnej młotka zamieniło się na pracę użyteczną, a siły oporu ruchu gwoźdź w desce mają wartość 1000 N?
3. Na swobodnie zwisającej sprężynie o współczynniku sprężystości $k = 32 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ powieszono ciężarek o masie 200 g. Oblicz w zeszycie:
 - a) o ile wydłużyła się sprężyna,
 - b) o ile zmieniła się energia potencjalna grawitacji ciężarka podczas rozciągania się sprężyny.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Energia potencjalna grawitacji zależy od masy ciała i jego położenia w polu grawitacyjnym. s. 105
- Wzór $E_p = mgh$ może być stosowany jedynie w pobliżu Ziemi, gdzie przyspieszenie grawitacyjne ma stałą wartość i kierunek. s. 104
- Energia potencjalna wyrażona powyższym wzorem jest względna – zależy od wyboru poziomu odniesienia. s. 105
- Deformacje ciał sprężystych są proporcjonalne do działających na nie sił. Jest to treść prawa Hooke'a. s. 108

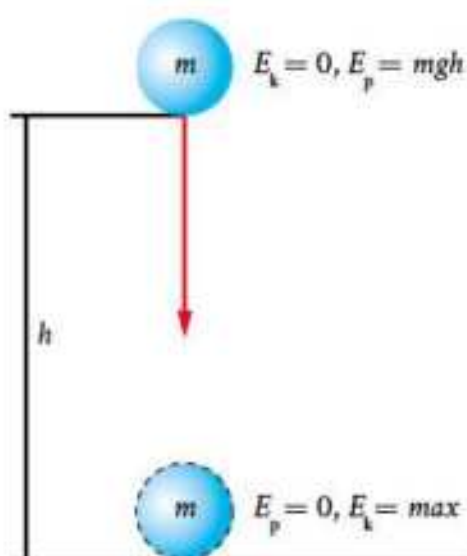


11. Zasada zachowania energii

NA TEJ LEKCJI

- poznasz jedną z najbardziej fundamentalnych zasad przyrody – zasadę zachowania energii;
- dowiesz się, jak znajomość zasady zachowania energii pozwala w prosty sposób rozwiązywać nawet pozornie trudne problemy.

Sformułowanie zasady zachowania energii



Rozważmy następującą sytuację: ciało o masie m podniesiono na wysokość h i upuszczono swobodnie (rys. 45.). W chwili upuszczenia ciało nie poruszało się, więc jego energia kinetyczna była równa 0. Energia potencjalna wynosiła $E_p = mgh$. Po upuszczeniu ciało zaczęło obniżać swoje położenie i przyspieszać. Jego energia potencjalna malała, a kinetyczna – rosła. W chwili dotarcia do poziomu odniesienia energia potencjalna zmniejszyła się do zera, a kinetyczna osiągnęła wartość maksymalną. Obliczmy tę wartość.

Rys. 45. Analiza przemian energii spadającego ciała.

Ruch spadającego ciała jest ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem ziemskim i zerową prędkością początkową. Obowiązują więc znane wzory na prędkość końcową i drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej. Drogą w tym ruchu jest wysokość, z jakiej spada ciało:

$$v = gt, h = \frac{1}{2}gt^2 \Rightarrow t^2 = \frac{2h}{g}$$

Energia kinetyczna końcowa przyjmuje więc wartość:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(gt)^2 = \frac{1}{2}mg^2t^2 = \frac{1}{2}mg^2 \cdot \frac{2h}{g} = mgh$$

Energia kinetyczna końcowa okazała się równa energii potencjalnej początkowej. W trakcie ruchu energia kinetyczna rosła, a potencjalna malała, ale ich suma pozostawała taka sama. Ubytek energii potencjalnej był w każdej chwili równy przyrostowi energii kinetycznej.



Zasada zachowania energii w swym najogólniejszym sformułowaniu odnosi się do wszelkich form energii i materii. Będziemy się tymi zagadnieniami zajmować w przyszłości. Teraz ograniczymy swoje rozważania do zjawisk czysto mechanicznych. W szczególności musimy się odnieść do sił oporu. Należą one do tzw. sił niezachowawczych. W ich obecności energia mechaniczna maleje, zamieniając się ostatecznie w energię wewnętrzną. Na skutek tarcia grzeją się trące powierzchnie, co wykorzystywali już nasi odlegli przodkowie do rozniecania ognia. Opór aerodynamiczny polega na wprawianiu w ruch cząsteczek ośrodka, co – jak wiemy – przekłada się na wzrost temperatury.

Siły, które nie rozpraszają energii mechanicznej poprzez zamianę jej na energię wewnętrzną, nazywamy **siłami zachowawczymi**. Zaliczamy do nich w szczególności siły grawitacji i siły sprężystości. Układ ciał, który nie wymienia energii z otoczeniem, nazywamy **układem izolowanym**.

Rozumiejąc powyższe pojęcia, możemy sformułować zasadę zachowania energii mechanicznej:

W układzie izolowanym, przy braku sił oporu, różne rodzaje energii mechanicznej mogą zmieniać swoją postać, ale ich suma pozostaje stała.

$$E_{kp} + E_{pp} = E_{kk} + E_{pk}$$

gdzie E_{kp} oznacza energię kinetyczną początkową, E_{pp} energię potencjalną początkową, E_{kk} energię kinetyczną końcową, a E_{pk} energię potencjalną końcową.

Zasada zachowania energii jest jednym z najbardziej fundamentalnych praw przyrody. Nadaje sens wszystkim zjawiskom. W szczególności wynika z niej, że energii nie można zniszczyć ani stworzyć z niczego. Jeden rodzaj energii można zamienić w inny. Kosztem energii można wykonać pracę mechaniczną. Wykonując pracę, można zmienić energię ciała. Ale w przyrodzie nic nie ginie ani nie pojawia się znikąd. Gdyby zasada zachowania energii przestała obowiązywać, świat stałby się nieprzewidywalny.

Obserwując otaczającą rzeczywistość, na każdym kroku doświadczamy przejawów zasady zachowania energii. Dziecko huśtające się na huśtawce nieustannie zamienia swoją energię kinetyczną na potencjalną, a potencjalną na kinetyczną. W piłce odbijającej się od podłogi następuje przemiana energii kinetycznej w energię potencjalną sprężystości. Zdeformowana piłka, prostując się, zmienia energię potencjalną sprężystości w energię kinetyczną. Unosząc się do góry, zamienia energię kinetyczną w energię potencjalną grawitacji. Napięty łuk, dzięki zgromadzonej energii potencjalnej sprężystości, wykonuje pracę nad strzałą, przekazując jej energię kinetyczną itd.

siły zachowawcze

układ izolowany

zasada zachowania
energii
mechanicznejwnioski z zasady
zachowania
energii
mechanicznej



Rys. 46. Przemiany energii w piłce rzuconej poziomo, a następnie odbijającej się od podłogi. A) Piłka ma maksymalną energię potencjalną grawitacji i niewielką energię kinetyczną związaną z ruchem w poziomie. B) Energia potencjalna maleje, a kinetyczna rośnie. C) Maksymalna energia kinetyczna zamieniła się w energię potencjalną sprężystości odkształconej piłki, a ta z powrotem w energię kinetyczną. D) Energia kinetyczna maleje, a potencjalna grawitacji rośnie. E) Energia kinetyczna przyjmuje minimum, a potencjalna grawitacji – maksimum.

W realnym świecie trudno sobie wyobrazić ruch bez sił oporu. Wprawione w ruch wahadło będzie drgać coraz słabiej. Odbijająca się od podłogi piłka będzie się wznosić na coraz mniejsze wysokości. Jeśli uwzględnimy siły oporu, do naszych rozważań musimy włączyć również inne formy energii. Zawsze się wtedy okaże, że w układzie izolowanym suma wszystkich rodzajów energii jest stała.

Przykłady zastosowań zasady zachowania energii

Zasada zachowania energii pozwala w łatwy sposób rozwiązać zadania, z którymi innymi metodami (na przykład z użyciem zasad dynamiki i wzorów z kinematyki) trudno byłoby się uporać.

Przykład 1.

Kamień podrzucono pionowo w górę z prędkością v . Oblicz wysokość, na jaką się wzniesie.

Rozwiązanie:

Stosując metody poznane na lekcjach kinematyki, potraktowalibyśmy ruch kamienia jako jednostajnie opóźniony (z opóźnieniem g), napisalibyśmy wzór na drogę w ruchu jednostajnie opóźnionym i na prędkość końcową. Następnie należałoby prędkość końcową przyrównać do zera, wyliczyć z równania czas, podstawić go do wzoru na drogę i ją wyliczyć, wyrażając wysokość przez prędkość końcową i przyspieszenie ziemskie. Jak widać, wymaga to znajomości kilku wzorów i konieczności dokonania kilku przekształceń.

Tymczasem, znając zasadę zachowania energii, wystarczy zauważyć, że energia potencjalna końcowa kamienia jest równa jego energii kinetycznej początkowej.

$$mgh = \frac{mv^2}{2}$$



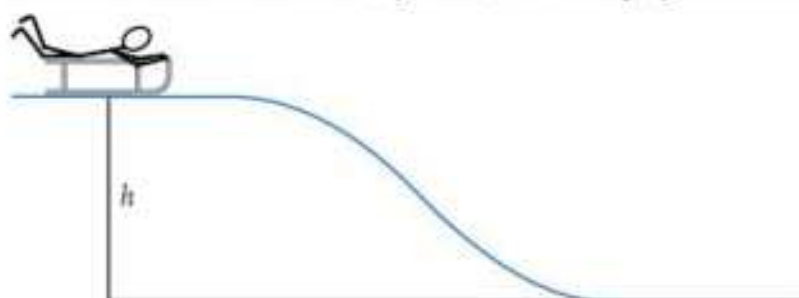
We wszelkich rozważaniach dotyczących ruchu ciał w polu grawitacyjnym masa ciała się zawsze upraszcza. Ruch ciała w polu grawitacyjnym nie zależy od jego masy, co zauważył Galileusz już 400 lat temu. Dzieląc powyższe równanie stronami przez g , otrzymujemy wyrażenie:

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

będące wzorem na poszukiwaną wysokość h .

Przykład 2.

Saneczkarz zjeżdża bez tarcia ze stoku o wysokości h i kształcie będącym połączeniem dwóch łuków (rys. 47.). Oblicz prędkość saneczkarza u podnóża stoku.



Rys. 47. Rysunek do przykładu 2.

Rozwiązanie:

Bez znajomości zasady zachowania energii powyższe zadanie jest nie do rozwiązania na poziomie szkoły średniej. Stok ma nieregularny kształt (musielibyśmy go opisać wzorami), więc zmienia się siła napędzająca saneczkarza (składowa siły ciężkości styczna do toru). Jego ruch jest niejednostajnie zmienny. Obliczenie prędkości z zasad dynamiki wymagałoby użycia metod matematyki wyższej.

Znając zasadę zachowania energii, możemy nie przejmować się kształtem toru ani szczegółowym przebiegiem całego zjawiska. Ponieważ ruch odbywał się bez tarcia, energia kinetyczna saneczkarza u podnóża góry będzie taka sama, jak energia potencjalna na jej szczycie, a ta zależy tylko od wysokości stoku.

$$\frac{mv^2}{2} = mgh$$

Masa znowu się skraca. Mnożąc równanie obustronnie przez 2 i pierwiastkując, otrzymujemy wyrażenie na poszukiwaną prędkość:

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

Powyższy przykład uczy, że zasada zachowania energii pozwala traktować proces jako „czarną skrzynkę” i nie wdawać się w szczegóły jego przebiegu, o ile tylko wiemy, że energia w tym procesie została zachowana. A jeśli tak, to wystarczy porównać stan końcowy ze stanem początkowym i przy użyciu prostych przekształceń wyliczyć interesującą nas zmienną.



**Przykład 3.**

Spadające swobodnie ciało na wysokości 30 metrów miało prędkość $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Oblicz, na jakiej wysokości jego prędkość będzie wynosiła $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Rozwiązanie:

Dane:

$$h_1 = 30 \text{ m}$$

$$v_1 = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_2 = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

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

Szukane:

$$h_2 = ?$$

Zarówno w chwili początkowej, jak i końcowej ciało ma obydwa rodzaje energii mechanicznej: kinetyczną i potencjalną. Musimy więc zastosować pełny wzór na zasadę zachowania energii mechanicznej.

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$$

Po wstawieniu wyrażeń na energię kinetyczną i potencjalną otrzymujemy:

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2$$

Masa w ruchu w polu grawitacyjnym jak zwykle się skraca:

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + gh_2$$

$$gh_2 = gh_1 + \frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2}$$

Dzieląc stronami przez g , otrzymujemy:

$$h_2 = h_1 + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}, \quad h_2 = 23,75 \text{ m}$$

Odpowiedź:

Prędkość $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ spadające ciało osiągnie na wysokości 23,75 m.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Dopóki ludzkość nie знаła zasady zachowania energii, przez całe wieki próbowano skonstruować urządzenie, które raz wprowadzone w ruch wykonywałoby pracę bez dostarczania energii z zewnątrz, tzw. *perpetuum mobile*. Znajdź w dostępnych źródłach przykładowy schemat takiego urządzenia i wyjaśnij, jaki błąd popełnili jego pomysłodawcy i dlaczego takie urządzenie nie może działać.
2. Spadające swobodnie ciało na wysokości 20 m miało prędkość $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Oblicz w zeszycie:
 - a) jaką prędkość będzie ono miało na wysokości 10 m,
 - b) z jakiej wysokości upuszczono to ciało,
 - c) z jaką prędkością ciało uderzy w ziemię.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- W układzie izolowanym suma wszystkich rodzajów energii nie ulega zmianie.
- Energii nie można stworzyć z niczego ani zniszczyć.

s. 111

s. 111

**PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM**

- s. 59 1. Dynamika jest nauką o przyczynach ruchu.
- s. 60 2. Siła jest miarą oddziaływań. Wyróżniamy oddziaływania bezpośrednie i zdalne, a ich skutki dzielimy na statyczne i dynamiczne.
- s. 62 3. Siła jest wielkością wektorową. Wektory można dodawać metodą trójkąta lub równoległoboku.
- s. 64 4. Jeśli suma wszystkich sił działających na ciało wynosi 0, to mówimy, że ciało jest w stanie równowagi.
- s. 67 5. Ciało stawia opór przed zmianą stanu swego ruchu, zwany bezwładnością.
- s. 67 6. Jeżeli na ciało nie działają żadne siły lub działające siły się równoważą, to ciało to pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym po linii prostej. Jest to treść pierwszej zasady dynamiki.
- s. 70 7. Jeżeli na ciało działa niezrównoważona siła, to porusza się ono ruchem zmiennym z przyspieszeniem wprost proporcjonalnym do siły i odwrotnie proporcjonalnym do masy ciała. Mówi o tym druga zasada dynamiki.
- s. 70 8. Jednostką siły jest 1 niuton. Jest to siła, która masie 1 kg nadaje przyspieszenie $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.
- s. 73 9. Każdej działającej rzeczywistej sile towarzyszy siła reakcji o tej samej wartości, tym samym kierunku, przeciwnym zwrocie i innym punkcie przyłożenia. To stwierdzenie jest treścią trzeciej zasady dynamiki.
- s. 76 10. Zasady dynamiki nie są spełnione we wszystkich układach odniesienia, lecz tylko w niektórych, zwanych układami inercjalnymi.
- s. 77 11. W układach nieinercjalnych pojawiają się dodatkowe siły, zwane siłami bezwładności.
- s. 80 12. Ruch po okręgu odbywa się pod działaniem siły dośrodkowej. Ruchowi temu towarzyszy odśrodkowa siła bezwładności.
- s. 85 13. Ruchowi ciała w cieczy lub gazie towarzyszą siły oporu. Zależą one od prędkości, wielkości i kształtu ciała oraz właściwości samego ośrodka.
- s. 87 14. Siła oporu występująca na styku ciał stałych to siła tarcia. Wyróżniamy tarcie statyczne i tarcie kinetyczne.
- s. 89 15. Siła tarcia zależy od rodzaju trących powierzchni i siły ich wzajemnego nacisku.
- s. 93 16. Praca to iloczyn siły i przesunięcia (o ile te wektory mają zgodne kierunki i zwroty).
- s. 93 17. Jednostką pracy jest 1 dżul. Jest to praca, jaką siła 1 niutona wykonuje na drodze 1 metra.
- s. 96 18. Moc jest to stosunek pracy do czasu jej wykonania.
- s. 96 19. Jednostką mocy jest 1 wat. Jest to moc urządzenia, które w ciągu 1 sekundy wykonuje pracę 1 dżula.
- s. 100 20. Energia kinetyczna jest związana z ruchem ciała. Jest to ilość pracy, jaką ciało jest zdolne wykonać, zanim się zatrzyma.
- s. 101 21. Energia kinetyczna jest proporcjonalna do masy ciała i kwadratu jego prędkości. Jest wielkością względną.
- s. 105 22. Energia potencjalna grawitacji związana jest z położeniem ciała w polu grawitacyjnym.
- s. 104 23. Wzór $E_p = mgh$ obowiązuje tylko w pobliżu Ziemi, a występująca w nim wysokość jest pojęciem względnym. Zmiana energii potencjalnej grawitacji nie zależy od wyboru poziomu odniesienia.
- s. 108 24. Prawo Hooke'a stwierdza, że deformacje ciał sprężystych są proporcjonalne do działających na nie sił.
- s. 111 25. Energii nie można stworzyć ani zniszczyć. W układzie izolowanym suma wszystkich rodzajów energii pozostaje stała. Jest to treść zasady zachowania energii.



W otaczającym nas świecie zachodzi mnóstwo różnych oddziaływań, ale wszystkie dają się sprowadzić do jednego z czterech tzw. oddziaływań fundamentalnych: grawitacji, elektromagnetyzmu oraz dwóch rodzajów oddziaływania jądrowego (tzw. słabego i silnego).

W niniejszym dziale zajmiemy się grawitacją, która jest najsłabszym oddziaływaniem fundamentalnym, ale ma największy zasięg. Odpowiada nie tylko za spadanie ciał na powierzchnię Ziemi, ale porządkuje strukturę całego Wszechświata. Dzięki grawitacji istnieją planety, gwiazdy i galaktyki. Planety krążą wokół gwiazd, a księżyce wokół planet. Prawo powszechnej grawitacji zostało wyprowadzone właśnie na podstawie obserwacji ruchów ciał niebieskich.

Po omówieniu prawa powszechnego ciążenia przejdziemy do ruchu satelitów i ciał niebieskich. Eksplorację kosmosu zaczniemy od najbliższego otoczenia Ziemi: Układu Słonecznego. Następnie omówimy budowę galaktyk i przejdziemy do wielkoskalowych struktur Wszechświata. Na końcu opowiemy o tym, jak Wszechświat powstał i jakie losy go czekają.

4. Grawitacja i elementy astronomii



- ▶ Prawo powszechnego ciążenia
- ▶ Ruch ciał niebieskich
- ▶ Przeciążenie i nieważkość
- ▶ Układ Słoneczny
- ▶ Świat galaktyk
- ▶ Ewolucja Wszechświata



1. Prawo powszechnego ciążenia

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się, co spadanie ma wspólnego z ruchem ciał niebieskich;
- poznasz podstawowe prawo rządzące oddziaływaniem grawitacyjnym;
- dowiesz się, skąd się bierze przyspieszenie ziemskie.

Sformułowanie prawa powszechnego ciążenia

Zjawisko spadania ciał znane było ludzkości „od zawsze”, ale przez całe wieki nie rozumiano jego przyczyny. Niezależnie od tego, od tysięcy lat obserwowano i próbowano opisać ruch ciał niebieskich. Tworzono różne teorie na ten temat, często błędne. Obowiązująca przez całe średniowiecze teoria geocentryczna zakładała, że Ziemia znajduje się w centrum Wszechświata, a Słońce i planety okrążają Ziemię po dość skomplikowanych orbitach. Za planetami, według wyobrażeń starożytnych i średniowiecznych uczonych, miała znajdować się sfera gwiazd stałych (firmament) – gigantyczna kopuła, do której gwiazdy były przytwierdzone. Dopiero nasz wielki rodak, **Mikołaj Kopernik (1473–1543)**, w 1543 roku opublikował pracę, w której stwierdził, że Słońce znajduje się w centrum Wszechświata, a planety, w tym Ziemia, obiegają Słońce ruchem jednostajnym po orbitach kołowych. Nie wyjaśnił natomiast przyczyny, dla której ciała niebieskie w ogóle się poruszają. Nawiasem mówiąc, w owych czasach panowało przekonanie, że zjawiska na niebie rządzą się innymi prawami niż te, które obowiązują na Ziemi.

a)



b)



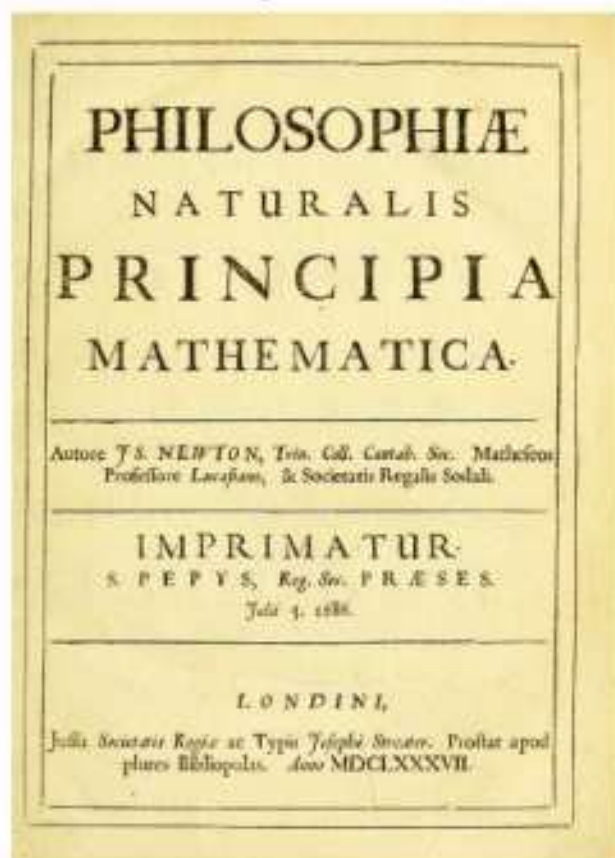
Rys. 1. a) system geocentryczny Ptolemeusza, b) system heliocentryczny Kopernika.

Obecnie wiemy, że Słońce wcale nie leży w centrum Wszechświata, tylko jest jedną z miliardów gwiazd i znajduje się na peryferiach niczym niewyróżniającej się galak-



tyki. Orbity planet nie są ściśle kołowe, tylko eliptyczne, a ruch planet jest jednostajny tylko w wielkim przybliżeniu. Firmament zaś jest złudzeniem – w rzeczywistości gwiazdy znajdują się w różnych odległościach od nas. Niemniej niewzruszona została najważniejsza teza Kopernika: planety krążą wokół Słońca – i ten fakt należało jakoś wyjaśnić.

Człowiekiem, który powiązał dwa pozornie odległe zjawiska: spadanie przedmiotów na Ziemi i ruch ciał niebieskich, był jeden z najwybitniejszych uczonych, wspomniany już angielski fizyk **Izaak Newton (1642–1727)**. Uświadomił on sobie, że Księżyc krąży wokół Ziemi pod wpływem tej samej siły (zwanej siłą grawitacji), która powoduje spadek ciał na powierzchnię Ziemi. Ponieważ Księżyc krąży po orbicie, którą w przybliżeniu można uznać za kołową (w rzeczywistości jest to elipsa, ale skomplikowane rachunki dotyczące elips prowadzą do tych samych wniosków końcowych), siła grawitacji pełni tutaj funkcję siły dośrodkowej. Połączenie wzoru na siłę dośrodkową z odkrytym wcześniej przez **Keplera (1571–1630)** prawem dotyczącym ruchu planet doprowadziło Newtona do sformułowania jednego z najważniejszych praw fizyki – **prawa powszechnego ciążenia**.



Rys. 2. Strona tytułowa *Matematycznych zasad filozofii naturalnej* – epokowego dzieła Newtona, w którym wyłożył cały aktualny stan wiedzy z fizyki, w tym zasady dynamiki i prawo powszechnego ciążenia.

Prawo powszechnego ciążenia

Każde dwa ciała w przyrodzie przyciągają się siłami grawitacji o wartościach wprost proporcjonalnych do iloczynu mas tych ciał i odwrotnie proporcjonalnych do kwadratu odległości między ich środkami.

$$F_g = G \frac{Mm}{r^2},$$

gdzie M i m to masy oddziałujących ciał, r – odległość między ich środkami, a G – współczynnik proporcjonalności, zwany stałą grawitacji.

Z powyższego wzoru możemy korzystać bez zastrzeżeń, gdy przyciągające się obiekty są małe w porównaniu z odległością między nimi lub gdy są kulami o sferycznym symetrycznym rozkładzie masy. Litera M często będzie oznaczać masę planety, a m – masę ciała znajdującego się w pobliżu tej planety. Jeśli analizujemy oddziaływanie mas o porównywalnych wartościach, często oznaczamy je m_1 i m_2 .

prawo
powszechnego
ciężenia



Stała grawitacji

Grawitacja jest zjawiskiem powszechnym i podlegają mu wszystkie ciała obdarzone masą. Przyciągają się wzajemnie nie tylko planety, lecz także wszystkie przedmioty wokół was. Dlaczego więc tego nie odczuwamy? Odpowiedź jest prosta: siła grawitacji działająca pomiędzy niewielkimi ciałami jest bardzo mała, ponieważ występujący we wzorze współczynnik, stała grawitacji, jest niezmiernie mały, tak mały, że za czasów Newtona nie było żadnych skutecznych metod jego pomiaru. Newton zmarł, nie poznawszy wartości tej stałej. Jego oszacowania, biorące pod uwagę rozmiary Ziemi i jej przewidywaną gęstość, okazały się bardzo niedokładne.

Pierwszym człowiekiem, który wyznaczył dokładnie wartość stałej grawitacji, był rodak Newtona, **Henry Cavendish** (wymawiaj: Henri Kawendis; 1731–1810), który w roku 1798 dokonał pomiarów przy użyciu niezwykle czułej aparatury, tzw. wagi skręceń, umieszczonej w specjalnym budynku. Oddziaływania grawitacyjne między kulami zawieszonymi na wadze obserwował z daleka za pomocą lunety, aby nie zakłócać przebiegu eksperymentu. **Stała grawitacji** okazała się rzeczywiście bardzo mała i wynosi:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

Oznacza to, że dwie kilogramowe kule oddalone 1 metr jedna od drugiej, będą się przyciągać siłą $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N}$, miliard razy mniejszą niż możliwa do zmierzenia za pomocą czułych siłomierzy. Nic więc dziwnego, że nie odczuwamy siły przyciągania grawitacyjnego ze strony drobnych przedmiotów ani nawet masywów górskich. Aby ta siła przybrała naprawdę odczuwalne wartości, przynajmniej jedna z mas musi być ogromna – wręcz kosmiczna. Na przykład musi być masą całej planety.

Zwróćmy uwagę, że Cavendish, wyznaczając stałą grawitacji, przy okazji „zważył” Ziemię. Bardzo łatwo jest zmierzyć siłę oddziaływania grawitacyjnego Ziemi i dowolnego przedmiotu – jest to po prostu jego ciężar. Znając ciężar i masę przedmiotu oraz przyjmując odległość środków ciał równą promieniowi Ziemi, można obliczyć, że **masa Ziemi** wynosi w przybliżeniu $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$.

Doświadczenie Cavendisha zaliczane jest dzisiaj do jednego z dziesięciu najbardziej udanych i owocnych eksperymentów w dziejach światowej nauki.

Przykład 1.

Oblicz siłę, z jaką przyciągają się dwa statki kosmiczne o masach 100 ton każdy, odległe o 50 m jeden od drugiego.

Rozwiązanie:

Dane:

$$m_1 = m_2 = 100 \text{ ton} = 10^5 \text{ kg}$$

$$r = 50 \text{ m}$$

stała grawitacji





Przyjmujemy, że statki kosmiczne są małe w porównaniu z ich wzajemną odległością lub mają kształt kulisty. Podstawiając do wzoru, otrzymujemy:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad F_g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{(10^5 \text{ kg})^2}{(50 \text{ m})^2} = 2,67 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

Jak widzimy, oddziaływanie grawitacyjne jest rzeczywiście bardzo słabe. Masy statków kosmicznych są dość znaczne, a siła ich wzajemnego przyciągania – znikoma.

Przyspieszenie ziemskie

Jeśli siła grawitacji jest jedyną (czyli niezrównoważoną) siłą działającą na ciało, to zgodnie z drugą zasadą dynamiki będzie się ono poruszać ruchem jednostajnie zmiennym z przyspieszeniem:

$$a = \frac{F_g}{m} = G \frac{M}{r^2}$$

Jak widzimy, masa ciała się skróciła. **Przyspieszenie grawitacyjne** zależy tylko od masy planety i odległości od jej środka. Jest to generalna cecha wszystkich ruchów pod wpływem siły grawitacji: ich przebieg nie zależy od masy poruszającego się ciała (o ile można przyjąć, że jest ona mała w porównaniu z masą planety). Oznacza to między innymi, że wszystkie ciała spadają z jednakowym przyspieszeniem, czego dowodził już Galileusz w XVI wieku.

Podstawiając do powyższego wzoru masę Ziemi ($5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) i jej promień (6371 km), uzyskujemy teoretyczną wartość przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni Ziemi – **przyspieszenie ziemskie**:

$$g = G \frac{M_Z}{R_Z^2}, \quad g = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{(6,371 \cdot 10^6 \text{ m})^2} = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

przyspieszenie
ziemskie

Chcesz wiedzieć więcej?

W rzeczywistości przyspieszenie ziemskie różni się nieznacznie w różnych punktach kuli ziemskiej. Wpływ na to mają dwa czynniki, wzajemnie się wzmacniające. Po pierwsze, Ziemia jest spłaszczona, w związku z czym na biegunach, mniej oddalonych od środka Ziemi, przyciąganie jest silniejsze. Po drugie, im bliżej równika, tym większy wpływ na ciężar ma siła odśrodkowa bezwładności, spowodowana ruchem wirowym naszej planety i skierowana do góry. W konsekwencji, lokalne przyspieszenie ziemskie zmienia się od około $9,83 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ na biegunie do około $9,78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ na równiku. Jako wartość standardową przyjmuje się przyspieszenie na 45° szerokości geograficznej, równe $g = 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Tak więc, jadąc w tropiki, automatycznie stajemy się o prawie 0,3% lżejsi!

Przyspieszenia ziemskiego (g) nie należy mylić ze stałą grawitacji (G). Po pierwsze, obie te wielkości wyrażają coś zupełnie innego. Po drugie, stała grawitacji jest fundamentalną stałą obowiązującą w całym Wszechświecie. Przyspieszenie ziemskie ma znaczenie tylko na Ziemi. Każda planeta ma inną wartość przyspieszenia grawitacyjnego.



**Przykład 2.**

Oblicz wartość przyspieszenia grawitacyjnego na wysokości 1000 km nad powierzchnią Ziemi.

Rozwiązanie:

$$M = 5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$R = R_z + 1000 \text{ km} = 7371 \text{ km} = 7,371 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$g = G \frac{M}{R^2}, \quad g = 7,33 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Odpowiedź:

Przyspieszenie grawitacyjne na wysokości 1000 km nad powierzchnią Ziemi wynosi $7,33 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, czyli o około 25% mniej niż na powierzchni Ziemi.

Przypomnij sobie nasze rozważania dotyczące zakresu stosowania wzoru na energię potencjalną grawitacji. Zastosowanie wzoru $E_p = mgh$ dla $h = 1000 \text{ km}$ wiązałoby się już ze sporym błędem. Z każdym kilometrem wysokości ciało staje się nieco lżejsze i podnoszenie go wymaga coraz mniejszej pracy.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Co jest większe: siła, z jaką Słońce przyciąga Marsa, czy siła, z jaką Mars przyciąga Słońce? Odpowiedź uzasadnij.
2. Jak się zmieni siła oddziaływania grawitacyjnego między dwoma ciałami, jeśli odległość między nimi wzrośnie trzykrotnie?
3. Oblicz w zeszycie, o ile procent jesteś „lżejszy”, lecąc samolotem na wysokości 10 km. Promień Ziemi wynosi 6370 km.
4. Oblicz w zeszycie siłę, z jaką Ziemia przyciąga Księżyc. Masa Księżyca jest 81 razy mniejsza od masy Ziemi. Średnia odległość pomiędzy środkiem Ziemi a środkiem Księżyca wynosi 384 400 km.

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 119

- Wszystkie ciała posiadające masę przyciągają się wzajemnie siłami grawitacji o wartości wprost proporcjonalnej do iloczynu mas tych ciał i odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między ich środkami.

s. 120

- Współczynnik proporcjonalności w prawie powszechnego ciężenia (stała grawitacji) jest bardzo mały, dlatego siła oddziaływania grawitacyjnego pomiędzy ciałami o małych masach jest nieodczuwalna.

s. 121

- Na skutek oddziaływania grawitacyjnego wszystkie ciała w pobliżu Ziemi spadają z jednakowym przyspieszeniem, zwanym przyspieszeniem ziemskim. Przyspieszenie to można obliczyć z prawa powszechnego ciężenia, jeśli znamy masę i promień Ziemi.



2. Ruch ciał niebieskich

NA TEJ LEKCJI

- zdobędziesz podstawowe wiadomości dotyczące ruchu ciał na orbitach;
- dowiesz się, co to jest pierwsza prędkość kosmiczna i ile ona wynosi dla Ziemi;
- zapoznasz się z pojęciem satelity geostacjonarnego.

Prędkość orbitalna i pierwsza prędkość kosmiczna

Prześledźmy rozumowanie, które doprowadziło Newtona do sformułowania prawa powszechnego ciążenia. Wyobraźmy sobie, że Ziemia jest idealnie gładką kulą pozbawioną atmosfery i wszelkich przeszkód terenowych, takich jak drzewa, góry i budynki. Na ziemi znajduje się tylko jedna góra, na szczycie której stoi Newton i rzuca poziomo kamieniami (rys. 3.). Im mocniej kamień zostanie rzucony, tym dalej upadnie.

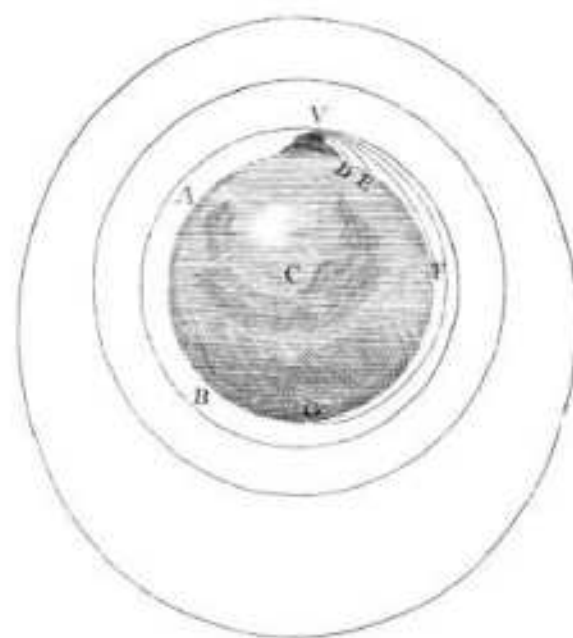
Zalóżmy teraz, że Newton potrafi rzucać kamieniami z dowolnie dużą prędkością. Ponieważ brak jest sił oporu ze strony atmosfery, można sobie wyobrazić, że rzucone odpowiednio mocno kamienie spadają na inne kontynenty. Newton zapostulował, że istnieje taka prędkość, przy której rzucone poziomo ciało nigdy nie spadnie na powierzchnię Ziemi, tylko będzie się poruszać po orbicie kołowej tuż nad jej powierzchnią. Tor ciała będzie się stale zakrzywiał, ale krzywizna Ziemi będzie ciała umykać.

Księżyc i sztuczne satelity Ziemi są takimi „rzuconymi poziomo” ciałami, które nieustannie „spadają” na Ziemię. Siła grawitacji działa prostopadle do kierunku prędkości, więc pełni rolę siły dośrodkowej. Zakrzywia ona tor, nie zmieniając wartości prędkości. W efekcie ciało porusza się po okręgu.

Prędkość satelity na orbicie kołowej nazywamy **prędkością orbitalną**. Znamy już postać siły grawitacji, więc możemy tę prędkość obliczyć. Ponieważ w ruchu po okręgu siła grawitacji pełni funkcję siły dośrodkowej, możemy obie te siły porównać:

$$F_t = F_g$$

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2}$$



Rys. 3. Góra Newtona. Oryginalny rysunek z pracy Newtona *Matematyczne zasady filozofii przyrody*.

siła grawitacji jako
siła dośrodkowa



Masa ciała i promień orbity skracają się, więc pozostaje:

$$v^2 = \frac{GM}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Jest to prędkość, z jaką satelita będzie okrążać planetę o masie M po orbicie kołowej o promieniu r .

prędkość orbitalna

Prędkość orbitalna satelity na orbicie kołowej jest ściśle określona i wynosi:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

gdzie M to masa planety (w ogólności – dowolnego ciała obieganego przez satelitę), a r to promień orbity.

Jak widać, prędkość orbitalna w ogóle nie zależy od masy satelity (ta się skróciła), zależy natomiast od masy ciała niebieskiego obieganego przez satelitę i od promienia orbity. Im większy jest promień orbity, tym satelita jest słabiej przyciągany i prędkość orbitalna jest mniejsza.

Przykład 1.

Oblicz, z jaką prędkością Księżyc obiega Ziemię. Średnia odległość od środka Ziemi do środka Księżyca wynosi 384 400 km.

Rozwiązanie:

Dane:

$$M = 5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$r = 384400 \text{ km} = 3,844 \cdot 10^8 \text{ m}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \quad v = 1018 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Odpowiedź:

Średnia prędkość orbitalna Księżyca wynosi $1018 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Minimalny promień orbity satelity jest równy promieniowi ciała centralnego. W takim przypadku satelita będzie się poruszać tuż nad powierzchnią tego ciała. Prędkość orbitalną takiego satelity nazywamy **pierwszą prędkością kosmiczną**. Jest to najmniejsza prędkość, jaką trzeba nadać ciału, aby nie spadło, tylko weszło na orbitę o minimalnym promieniu.

pierwsza prędkość kosmiczna

Pierwszą prędkością kosmiczną nazywamy prędkość, jaką trzeba nadać ciału, aby poruszało się po orbicie kołowej tuż nad powierzchnią planety:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

gdzie M to masa planety, a R – jej promień.



Dla Ziemi $v_1 = \sqrt{\frac{GM_Z}{R_Z}}$, $v_1 \approx 7,9 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Spróbuj sobie wyobrazić, jak wielka jest to prędkość! Nic dziwnego, że do lotów kosmicznych używamy potężnych rakiet!

Przykład 2.

Księżyc jest w przybliżeniu 4 razy mniejszy od Ziemi i ma masę około 81 razy mniejszą niż Ziemia. Oszacuj pierwszą prędkość kosmiczną dla Księżyca.

Rozwiązanie:

Dane:

$$R_K \approx \frac{1}{4} R_Z$$

$$M_K \approx \frac{1}{81} M_Z$$

Szukane:

v_1 dla Księżyca

Unikniemy mnożenia bardzo dużych lub bardzo małych liczb (takich jak stała grawitacji i masa Księżyca), porównując poszukiwaną wartość z pierwszą prędkością kosmiczną dla Ziemi:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM_K}{R_K}} = \sqrt{\frac{G \frac{1}{81} M_Z}{\frac{1}{4} R_Z}} = \frac{2}{9} \sqrt{\frac{GM_Z}{R_Z}}, \quad v_1 = \frac{2}{9} \cdot 7,9 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 1,76 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Odpowiedź:

Szacunkowa wartość pierwszej prędkości kosmicznej dla Księżyca wynosi $1,76 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

(Uwaga: podstawienie dokładnych wartości daje wynik $1,68 \frac{\text{km}}{\text{s}}$).

Loty kosmiczne

Ruchem ciał w przestrzeni kosmicznej zajmuje się dział fizyki zwany **mechaniką nieba**. Jest to dział trudny i mało intuicyjny, a niektóre fakty dotyczące ruchu ciał na orbitach bywają dla laika zaskakujące.

Analizując wzór na prędkość orbitalną, dochodzimy do wniosku, że maleje ona odwrotnie proporcjonalnie do pierwiastka z promienia orbity. Jest to zrozumiałe, zważywszy, że wraz z odległością maleje też siła oddziaływania grawitacyjnego. Czy to oznacza, że aby umieścić satelitę na wyższej orbicie, trzeba go wystrzelić z mniejszą prędkością? Nic bardziej mylnego. Aby satelita znalazł się na dalszej orbicie, jego prędkość początkowa musi być większa od pierwszej prędkości kosmicznej. W miarę oddalania się od Ziemi jego energia potencjalna będzie rosła kosztem energii kinetycznej. Ostatecznie prędkość orbitalna ustabilizuje się na niższej wartości, ale suma energii kinetycznej i potencjalnej odleglejszego satelity będzie większa niż na orbicie o minimalnym promieniu. Oznacza to, że prędkość początkowa takiego satelity musi być większa. Jeśli satelita włączy silniki, aby przyspieszyć, wejdzie na wyższą orbitę i tak naprawdę zwolni. Jeśli będzie hamować – obniży lot i przyspieszy.





Umownie przyjmuje się, że atmosfera ziemska kończy się na wysokości około 100 km. Występują tam jeszcze znikome ilości powietrza, które wpływają hamująco na ruch satelitów. Aby satelita mógł obiegać Ziemię przez długie lata, wysokość jego orbity powinna znacznie przekraczać 100 km nad powierzchnią Ziemi.

Z faktu, że pierwsza prędkość kosmiczna jest najmniejszą prędkością, którą trzeba nadać ciału, aby znalazło się na orbicie, wcale nie wynika, że nie można polecieć w kosmos, utrzymując małą prędkość. Wtedy trzeba mieć jednak cały czas włączone silniki. Gdy je wyłączymy, pojazd spadnie na Ziemię z powodu zbyt małej prędkości. Prędkości orbitalne, o których tutaj mowa, pozwalają na poruszanie się satelitów po orbitach bez żadnego napędu (tak jak Księżyc nie potrzebuje napędu, by poruszać się wokół Ziemi).



Rys. 4. Rakiety kosmiczne zbudowane są z wielu członów napełnionych paliwem. W miarę jego wyczerpywania się człony są odrzucane, by zmniejszyć masę rakiety.

Prędkości orbitalne są niewyobrażalnie wielkie. Podróż z Warszawy do Gdańska z pierwszą prędkością kosmiczną trwałaby zaledwie około 40 sekund. Rozpędzanie się do takich prędkości wymaga wielkich ilości paliwa. Aby zapewnić duże przyspieszenie, dążymy też do minimalizacji masy pojazdu. Dlatego do lotów kosmicznych używamy potężnych wieloczlonowych rakiet. Większość masy startowej takiej rakiety stanowi paliwo. W miarę jego wyczerpywania się puste człony rakiety są odrzucane, a silniki kolejnych członów przyspieszają już raketę o zmniejszonej masie.

Satelita geostacjonarny

Satelity okrążające Ziemię tuż nad atmosferą wykonują jeden pełny obrót w niecałe półtorej godziny, z kolei Księżyc znajdujący się w średniej odległości 384 000 km od Ziemi potrzebuje na jej obiegnięcie prawie całego miesiąca. Istnieje zatem orbita, której okążenie zajmie dokładnie dobę. Satelita umieszczony na takiej orbicie w płaszczyźnie równikowej będzie stale „wisiał” nad tym samym punktem powierzchni Ziemi. Ma to doniosłe znaczenie dla telekomunikacji,

gdyż stałe położenie nadajnika w kosmosie powoduje, że nie trzeba na przykład ciągle przekręcać anten telewizji satelitarnej, aby nadążyć za obrotem Ziemi wokół osi. Satelity tego typu nazywane są **satelitami geostacjonarnymi**. Wykorzystywane są również w nawigacji GPS.



Rys. 5. Satelita geostacjonarny obiega Ziemię z okresem równym jednej dobie. Dzięki temu stale „wisi” nad tym samym obszarem Ziemi.



Przykład 3.

Oblicz promień orbity geostacjonarnej.

Rozwiązanie:

Ziemia wykonuje jeden pełny obrót wokół osi w czasie doby gwiazdowej (obrot względem gwiazd). Doba słoneczna jest nieco dłuższa (równe 24 godziny), gdyż Słońce przemieszcza się pozornie względem gwiazd (wykonuje dodatkowy obrót raz na rok) i aby następnego dnia ustawić się identycznie względem Słońca, Ziemia musi obrócić się o więcej niż 360° . W rozwiązaniu tego zadania musimy użyć doby gwiazdowej.

Dane:

$$T = 1 \text{ doba gwiazdowa} = 23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s} = 86\,164 \text{ s}$$

$$M = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

Szukane:

$$r = ?$$

Prędkość orbitalna z jednej strony wyraża się wyprowadzonym wyżej wzorem, a z drugiej może być powiązana z okresem ruchu:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}, v = \frac{2\pi r}{T} \rightarrow \sqrt{\frac{GM}{r}} = \frac{2\pi r}{T} \rightarrow \frac{GM}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} \rightarrow r^3 = \frac{GMT^2}{4\pi^2}$$

Ostatecznie więc otrzymujemy:

$$r = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}, r = \sqrt[3]{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot 6 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 86164^2 \text{ s}^2}{4 \cdot 3,1416^2}} \approx 42\,200 \text{ km}$$

Odpowiedź:

Promień orbity geostacjonarnej wynosi około 42 200 km, a więc satelita geostacjonarny zawieszony jest około 35 830 km nad powierzchnią Ziemi.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Oblicz w zeszycie okres obiegu satelity krążącego w niewielkiej odległości od powierzchni Ziemi.
2. Z dala od wpływu innych sił można sobie wyobrazić działanie sił grawitacji w miniaturze. Szybujący w przestrzeni międzygalaktycznej glaz o masie 1 tony obiegany jest przez ziarenko piasku. Promień jego orbity wynosi 1 metr. Oblicz prędkość orbitalną tego ziarenka oraz okres obiegu wokół glazu.
3. Masa Marsa wynosi $6,4 \cdot 10^{23} \text{ kg}$, a okres obrotu wokół własnej osi to 24 godziny i 37 minut. Oblicz w zeszycie promień orbity „marsostacjonarnej”.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- W ruchu satelitów po orbitach kołowych siła grawitacji pełni funkcję siły dośrodkowej. s. 123
- Prędkość orbitalna satelity jest wprost proporcjonalna do pierwiastka z masy ciała obieganego i odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z promienia orbity. s. 124
- Minimalna prędkość niezbędna do wejścia ciała na orbitę to pierwsza prędkość kosmiczna. s. 124
- Satelita, którego okres obiegu wokół Ziemi jest równy dobie gwiazdowej, to satelita geostacjonarny. Jest on nieruchomy względem wybranego obszaru powierzchni Ziemi. s. 126



3. Przeciążenie i nieważkość

NA TEJ LEKCJI

- zrozumiesz pojęcia przeciążenia i nieważkości;
- poznasz warunki występowania tych zjawisk.

Zapewne nieraz doświadczyłeś/doświadczyłaś uczucia, że Twoje ciało waży mniej lub więcej niż zwykle. Tak się dzieje podczas startu i zatrzymywania się szybkojeżdżnej windy, ruchu na karuzeli i korzystania z wielu innych atrakcji wesołego miasteczka. Zastanówmy się, jaka jest tego przyczyna.

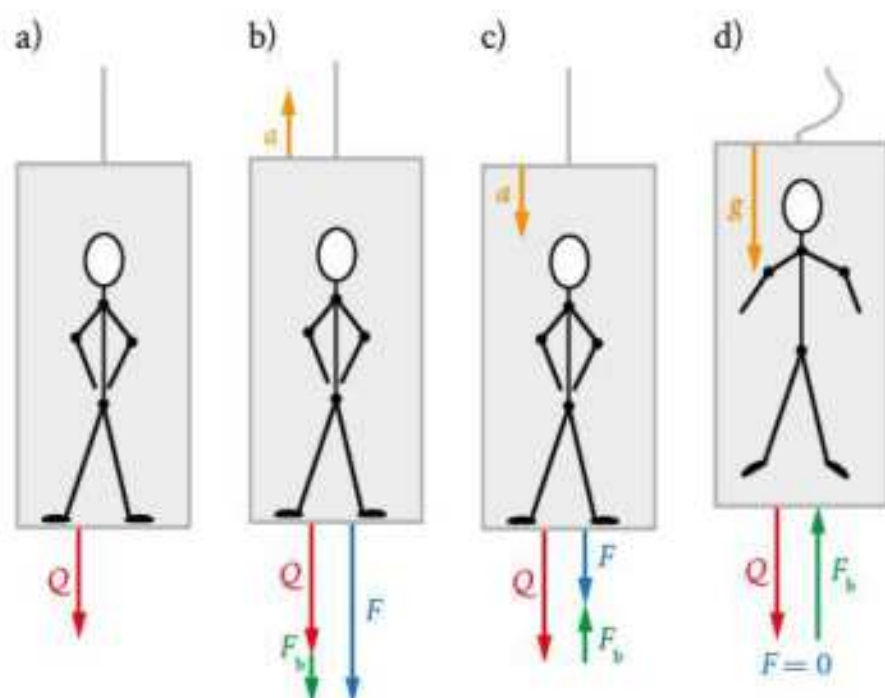
Oznaczmy przez m masę naszego ciała. Stojąc na podłodze windy nieruchomej lub poruszającej się ruchem jednostajnym (rys. 6a), naciskamy na jej podłogę siłą równą naszemu ciężarowi (działającej na nas sile ciężkości). Czujemy się tak, jakbyśmy stali na powierzchni Ziemi:

$$F = Q = mg$$

Gdy winda rusza w górę (lub jadąc w dół, zaczyna hamować z przyspieszeniem skierowanym w górę, rys. 6b), staje się układem nieinercyjnym. Pojawia się siła bezwładności skierowana w dół i zwiększająca siłę nacisku pasażera na podłogę windy. Stan taki nazywamy **przeciążeniem**:

$$F = Q + F_b = Q + ma = m(g + a)$$

Podlegają mu między innymi astronauta podczas startu rakiety kosmicznej. Jak już wiesz, rakietę podczas startu musi w krótkim czasie rozpędzić się do ogromnych prędkości. Dlatego przyspieszenie takiej rakiety może kilkakrotnie przewyższać przyspieszenie ziemskie – astronauta czują się wtedy kilkakrotnie ciężsi niż zazwyczaj i muszą siedzieć w specjalnych fotelach, aby nie ulec kontuzji (naciskają na fotel kilkakrotnie mocniej).



Rys. 6. Siła nacisku pasażera na podłogę windy, czyli jego odczuwalny „ciężar”, jest wypadkową prawdziwego ciężaru Q i siły bezwładności F_b spowodowanej przyspieszeniem windy. Siła bezwładności ma zwrot przeciwny do przyspieszenia układu odniesienia.

a) Winda jest nieruchoma lub porusza się ruchem jednostajnym (układ inercyjny) – pasażer nie odczuwa żadnych zmian.

b) Winda porusza się z przyspieszeniem skierowanym w górę. Nacisk pasażera na podłogę wzrasta o wartość siły bezwładności.

c) Winda porusza się z przyspieszeniem skierowanym w dół. Pasażer czuje się lżejszy o wartość siły bezwładności (nacisk maleje).

d) Winda spada z przyspieszeniem ziemskim. Siła bezwładności równoważy ciężar pasażera. Pasażer znajduje się w stanie nieważkości – nie naciska na podłogę windy.



Analogiczna sytuacja zachodzi w przypadku, gdy winda przyspiesza, jadąc w dół, lub hamuje, jadąc w górę, rys. 6c). Wtedy siła bezwładności działa w górę i nacisk stóp na podłogę jest mniejszy. Zjawisko to nazywamy **niedociążeniem**:

$$F = Q - F_b = Q - ma = m(g - a)$$

Skrajnym przypadkiem niedociążenia jest **nieważkość** (rys. 6d), zachodząca wtedy, gdy winda przyspiesza w dół z przyspieszeniem ziemskim, czyli po prostu spada. Siła nacisku pasażera na podłogę windy jest wtedy równa 0:

$$F = Q - F_b, \quad a = g, \quad F = Q - mg = m(g - g) = 0$$

Dzieje się tak dlatego, że winda i pasażer spadają z jednakowym przyspieszeniem, w związku z czym nie naciskają na siebie. Pasażer ma wrażenie, że nic nie waży.

Wiele osób błędnie interpretuje nieważkość jako brak oddziaływań grawitacyjnych, twierdząc, że kosmonauci na orbicie nie są przez Ziemię przyciągani. Nic bardziej mylnego. Gdyby statek kosmiczny i kosmonauci nie byli przyciągani, nie krążyliby po orbicie, tylko oddalili się od Ziemi ruchem jednostajnym po linii prostej. Wiemy już, że ruch po orbicie wywołany jest obecnością siły grawitacji i jest tak naprawdę niekończącym się spadaniem z pewną prędkością początkową skierowaną poziomo. Nieważkość możemy też zinterpretować jako stan równowagi pomiędzy siłą ciężkości a odśrodkową siłą bezwładności wynikającą z ruchu po orbicie.

Ty również możesz na chwilę wprawić się w stan nieważkości, zeskakując z muru lub drzewa (byłe niezbyt wysokiego). Jeśli podrzucimy w górę pęk kluczy, również zauważymy, że podczas lotu znajdują się one w stanie nieważkości – nie zwisają, tylko każdy kieruje się w przypadkową stronę (rys. 7.). Spadające klucze nic nie ważą, ponieważ na nic nie naciskają. Nieważkość można też zasymulować w samolocie lecącym po torze parabolicznym (leci on tak, jakby spadał, rys. 8). Stan nieważkości wywołuje się w ten sposób na krótko, niemniej loty paraboliczne wykorzystywane są do trenowania kosmonautów oraz podczas kręcenia realistycznych filmów o lotach kosmicznych.



Rys. 7. Spadające klucze znajdują się w stanie nieważkości.



Rys. 8. Stan nieważkości uzyskany w samolocie poruszającym się po paraboli (symulacja spadania).

**nieważkość**

Nieważkość jest stanem, w którym jedyną niezrównoważoną siłą działającą na ciało jest siła grawitacji (czyli spada ono swobodnie).

Przykład

Oblicz ciężar Maćka o masie 60 kg w windzie poruszającej się w górę z przyspieszeniem $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Rozwiązanie:

Dane:

$$m = 60 \text{ kg}$$

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

$$a = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Szukane:

$$F = ?$$

Poszukujemy oczywiście siły nacisku Maćka na podłogę windy, którą obliczymy ze wzoru:

$$F = m(g + a)$$

Podstawiając do wzoru, otrzymujemy wartość:

$$F = 60 \text{ kg} \cdot 12 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 720 \text{ N}$$

o 20% większą niż „normalnie”.

Odpowiedź:

Ciężar Maćka w przyspieszającej windzie wyniesie 720 N.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Na podstawie literatury popularnonaukowej lub zasobów internetowych sporządź listę błędnych sądów ludzi dotyczących stanu nieważkości. Wyjaśnij na każdym z przykładów, na czym polega błąd w rozumieniu tego pojęcia.
2. Oblicz w zeszycie, z jakim przyspieszeniem (i jak skierowanym) powinna się poruszać winda, abyś czuł się w niej o 10% lżejszy.

PODSUMOWANIE LEKCJI

s. 128,
129

- Przeciążenie i niedociążenie są stanami związanymi z ruchem zmiennym pojazdu, w którym znajdują się pasażerowie. Do ciężaru pasażera dodaje się siłę bezwładności skierowaną przeciwnie niż przyspieszenie, któremu podlega pojazd.

s. 130

- Stan nieważkości występuje wtedy, gdy jedyną siłą działającą na ciało jest siła ciężkości. Odczuwamy go w układach odniesienia, które spadają, na przykład samolot w locie parabolicznym, statek kosmiczny znajdujący się na orbicie itp.



4. Układ Słoneczny

NA TEJ LEKCJI

- poznasz definicję jednostki astronomicznej i roku świetlnego;
- dowiesz się, z jakich obszarów zbudowany jest Układ Słoneczny, jakie w nim panują warunki i jakie znajdują się w nim obiekty.

Jednostki długości stosowane w astronomii

Skale odległości w Kosmosie wymykają się naszym codziennym doznaniom. Któż potrafi w pełni wyobrazić sobie na przykład miliard kilometrów, skoro nigdy nie doświadczył podróży na taką odległość? Używanie kilometrów do określania odległości we Wszechświecie jest wprawdzie możliwe, ale rzadko praktykowane, gdyż jest mało intuicyjne i nieprzemawiające do wyobraźni.

Astronomowie używają swoich własnych, wygodnych jednostek, do których zaliczamy między innymi jednostkę astronomiczną i rok świetlny. Jednostka astronomiczna (w skrócie AU) jest wygodną miarą odległości w Układzie Słonecznym. Jest ona zdefiniowana jako średnia odległość Ziemi od Słońca. Odległości innych planet od Słońca wyrażają się w jednostkach astronomicznych niewielkimi liczbami (na przykład średni promień orbity Merkurego ma około 0,4 AU, a średni promień orbity Neptuna około 30 AU), dzięki czemu łatwo je porównywać. Na potrzeby obliczeń przyjmujemy, że jedna jednostka astronomiczna to około 150 milionów kilometrów.

1 jednostka astronomiczna to średnia odległość Ziemi od Słońca.

$$1 \text{ AU} = 149\,597\,870 \text{ km} \approx 150\,000\,000 \text{ km}$$

jednostka
astronomiczna

Układ Słoneczny w skali całego Kosmosu jest mikroskopijny. Większe odległości (na przykład do gwiazd i galaktyk) zwykło się wyrażać w latach świetlnych (ly). Jeden rok świetlny to odległość, jaką światło w próżni pokonuje w ciągu roku. W ciągu sekundy światło przebywa dystans około 300 000 km (dokładnie 299 792 458 m). Rok trwa około 31,5 miliona sekund. Przemnożenie tych liczb daje odległość około 9,5 biliona kilometrów.

1 rok świetlny to odległość, jaką w ciągu roku przemierza światło w próżni.

$$1 \text{ ly} = 9\,460\,700\,000\,000 \text{ km}$$

rok świetlny

Używanie lat świetlnych niesie dodatkową korzyść. Informuje, ile czasu światło wysłane przez dany obiekt potrzebuje, by dotrzeć do naszego oka.

Wzajemne przeliczniki tych jednostek są następujące: $1 \text{ ly} = 63\,241 \text{ AU}$, $1 \text{ AU} = 0,000\,016 \text{ ly}$.



W poniższej tabeli przedstawiono niektóre odległości w kosmosie w kilometrach, jednostkach astronomicznych i latach świetlnych. Przedostatnia kolumna informuje, ile czasu światło potrzebuje na przebycie podanego dystansu. W ostatniej kolumnie zawarty jest czas potrzebny na przejechanie tego dystansu samochodem po wyimaginowanej autostradzie z maksymalną dopuszczalną prędkością $140 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, jadąc bez przerwy.

Tab. 1. Typowe odległości w kosmosie, wyrażone w różnych jednostkach.

	w km	w AU	w ly	Czas biegu światła	Czas jazdy samochodem
Odległość z Ziemi do Księżyca	384 000	0,00256	$4 \cdot 10^{-8}$	1,3 sekundy	114 dni
Odległość z Ziemi do Słońca	150 000 000	1	0,000016	8 min 20 s	122 lata
Odległość od Słońca do Neptuna	4,5 miliarda	30	0,00048	4 h 10 min	3669 lat
Odległość do najbliższej gwiazdy	40 bilionów	268 000	4,24	4,24 roku	32,7 miliona lat
Średnica Galaktyki	$9,46 \cdot 10^{17}$	6,32 miliarda	100 000	100 000 lat	770 miliardów lat
Odległość do obserwowanych krańców Wszechświata	$1,3 \cdot 10^{23}$	866 bilionów	13,7 miliardów	13,7 miliardów lat	$1,06 \cdot 10^{17}$ lat

Aby jeszcze lepiej uzmysłwić sobie ogrom Kosmosu, wyobraźmy sobie, że cały Wszechświat został zmniejszony miliard razy. Wtedy 1000 kilometrów kurczy się do 1 milimetra, a miliard lat świetlnych do 1 roku świetlnego.

W tej skali Ziemia byłaby kulką o średnicy ok. 12 mm. Księżyc (o średnicy 4 mm) okręzałby ją w odległości około 38 centymetrów. Słońce miałoby średnicę około 1,4 metra i znajdowałoby się w odległości 150 metrów. Jowisz (pileczka o średnicy 14 cm) okręzałby Słońce w odległości 780 m, a najdalsza planeta, Neptun (średnica – niecałe 5 cm) – w odległości około 4,5 kilometra.

W tej skali najbliższa gwiazda (**Proxima Centauri**) znalazłaby się w odległości 40 000 km, Galaktyka Andromedy w odległości 20 miliardów kilometrów, a najdalsze galaktyki – w odległości 100 bilionów kilometrów (dalej niż rzeczywista odległość od Słońca do Syriusza).

Budowa Układu Słonecznego

budowa Układu
Słonecznego

Układ Słoneczny to zespół wszystkich ciał niebieskich związanych oddziaływaniem grawitacyjnym ze Słońcem. Nie składa się tylko z samych planet i ich księżyców, lecz z miliardów obiektów o różnej wielkości, a jego granice wyznacza strefa wpływów oddziaływania grawitacyjnego Słońca, kończąca się (w dużym przybliżeniu) w połowie odległości do najbliższych gwiazd.

obszary Układu
Słonecznego

Cały Układ Słoneczny można podzielić na kilka stref różniących się panującymi tam warunkami i charakterem znajdujących się w nich obiektów. Jego centralne miejsce zajmuje oczywiście **Słońce**, skupiające niemal całą masę układu. Największa planeta – Jowisz – jest ponad 1000 razy lżejsza od Słońca, a wszystkie pozostałe planety

Słońce



razem wzięte mają masę ponad dwukrotnie mniejszą od masy Jowisza. Kolejne strefy Układu Słonecznego to obszar planet wewnętrznych zakończony pasem planetoid, obszar planet zewnętrznych, Pas Kuipera, dysk rozproszony i Obłok Oorta.

W obszarze do odległości około 3 AU od Słońca jest stosunkowo ciepło. Wysoka temperatura i intensywny wiatr słoneczny (strumień cząstek emitowanych przez Słońce z dużymi prędkościami we wszystkie strony) powodują wywiewanie lekkich gazów, dlatego znajdujące się tu ciała niebieskie mają charakter skalisty. Zbudowane są z minerałów o wysokiej temperaturze topnienia. Należą do nich tzw. **planety wewnętrzne (skaliste): Merkury, Wenus, Ziemia i Mars** oraz niezliczenie wiele mniejszych obiektów (planetoid) krążących między orbitami Marsa i Jowisza.

planety
wewnętrzne
(skaliste)

Planety wewnętrzne są dość małe i gęste (wśród nich Ziemia jest największa), mają stałą powierzchnię, na której można wylądować, i małą liczbę księżyców (Ziemia ma jeden księżyc, Mars dwa, a Merkury i Wenus – wcale). W przeciwieństwie do planet zewnętrznych nie posiadają pierścieni. Merkury pozbawiony jest atmosfery, pozostałe planety mają atmosfery złożone z gazów stosunkowo ciężkich. Atmosfera Wenus jest gęsta i składa się głównie z dwutlenku węgla. Efekt cieplarniany powoduje, że temperatura na powierzchni Wenus nigdy nie spada poniżej 400°C. Ziemia jest jedyną znaną planetą posiadającą warunki do występowania na powierzchni wody w stanie płynnym, co jest niezbędne do rozwoju życia w znanej nam postaci. Duże ilości wody wykryto również na Marsie, ale ze względu na niższą temperaturę i niewielkie ciśnienie atmosferyczne występuje ona w postaci lodu. Ukształtowanie powierzchni Marsa wskazuje, że kiedyś atmosfera tej planety była gęstsza, a woda występowała na jej powierzchni w stanie płynnym. Mars jest brany pod uwagę jako drugie (po Księżycu) ciało niebieskie, na którym mógłby wylądować człowiek.



Rys. 9. Panorama Marsa sfotografowana przez lądownik kosmiczny.

Średnice orbit poszczególnych planet układają się w dość regularny ciąg. Zgodnie z nim, pomiędzy Marsem a Jowiszem powinna istnieć jeszcze jedna planeta. Zamiast niej w tym obszarze odkryto setki tysięcy drobnych ciał, zwanych planetoidami. Przypuszczalnie nie doszło do utworzenia planety na skutek oddziaływania grawitacyjnego Jowisza, który nieustannie zmieniał orbity krążących tam okruchów materii. Okruchy te nabierały zbyt dużej prędkości względnej i podczas zderzeń, zamiast łączyć się w jedną całość, kruszyły na mniejsze fragmenty. **Pas planetoid** jest więc najprawdopodobniej materiałem na planetę, której nie udało się powstać. Największą planetoidą w tym pasie jest Ceres o średnicy około 950 km, zaliczana obecnie do tzw. planet karłowatych. Skupia ona w sobie około jednej trzeciej masy całego pasa.

pas planetoid

planety
zewewnętrzne

Za pasem planetoid jest już zdecydowanie zimniej (znacznie poniżej 150 K, czyli około -120°C). Cząsteczki lekkich gazów nie mają już w takiej temperaturze zbyt dużej energii kinetycznej i nie uciekają z atmosfery. Dlatego utworzyły się tam tzw. **planety zewnętrzne** zaliczane do gazowych olbrzymów: **Jowisz, Saturn, Uran i Neptun**. Dużą część ich objętości zajmuje gigantyczna i gęsta atmosfera złożona głównie z wodoru i helu, w proporcjach zbliżonych do tych na Słońcu. Skłania to do przypuszczenia, że Słońce i planety powstały w tym samym czasie i z tej samej materii.

Wszystkie te planety mają dużo księżyców, będących przeważnie niewielkimi przechwyconymi planetoidami. Większość z nich odkryta została niedawno, podczas misji bezzałogowych sond międzyplanetarnych lub obserwacji poczynionych przez krążący po wokółziemskiej orbicie **teleskop Hubble'a**. Otoczone są też pierścieniami okruchów materii, z której nie zdołał się uformować żaden księżyc. Pierścienie Saturna są okazałe i dobrze widoczne z Ziemi przez niewielki teleskop. Pierścienie pozostałych planet są bardzo wąskie i zostały odkryte w ostatnich latach.

Rysunek 11. przedstawia wygląd najważniejszych ciał Układu Słonecznego z zachowaniem proporcji ich rozmiarów (nie odległości między nimi), natomiast w tabeli 2. zestawiono podstawowe dane dotyczące planet.



Rys. 10. Zdjęcie Ceres wykonane przez przelatującą nieopodal sondę kosmiczną.



Rys. 11. Planety i niektóre inne obiekty Układu Słonecznego. Rysunek zachowuje proporcje rozmiarów planet, natomiast oczywiście nie zachowuje proporcji odległości (w tej skali rysunek musiałby mieć około kilometra długości).



Tab. 2. Charakterystyka planet Układu Słonecznego.

Planeta	Rodzaj	Odległość od Słońca, AU	Okres obiegu, rok	Średnica, km	Masa $M_{\oplus} = 1$	Temperatura powierzchni, °C	Skład atmosfery	Znane księżyce
Mer- kury	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

Za orbitą Neptuna, w odległości od 30 do 50 AU, rozciąga się tzw. **Pas Kuipera**, zawierający głównie obiekty skalno-lodowe. Odkryto w nim ponad tysiąc planetoid, w tym kilkanaście o średnicy ponad 1000 km. Szacuje się, że liczba mniejszych ciał może tam przekraczać setki tysięcy, ale są one trudne do obserwacji ze względu na olbrzymie odległości. Poza tym są to obiekty bardzo ciemne, gdyż znajdują się daleko od oświetlającego je Słońca. Temperatury w tych obszarach nie są większe niż kilkadziesiąt kelwinów, w związku z tym gazy mogące utworzyć ewentualną atmosferę po prostu zamarzają.

Pas Kuipera

Do Pasa Kuipera należy też **Pluton**, który przez kilkadziesiąt lat był zaliczany do grona planet. Ponieważ w tym rejonie odkryto więcej obiektów podobnej wielkości, w 2006 roku Międzynarodowa Unia Astronomiczna zdefiniowała nowy typ ciał niebieskich – planety karłowate – i zdegradowała Plutona. O tym, że nie jest on pełnowartościową planetą, świadczy również fakt, że nie krąży on wokół Słońca w tej samej płaszczyźnie, co wszystkie inne planety, tylko pod dużym kątem do niej, a jego orbita jest mocno wydłużona. Takie orbity są typowe dla małych obiektów przyciągniętych z dalszych obszarów Kosmosu.

Na zewnątrz Pasa Kuipera znajduje się tzw. **dysk rozproszony**, zawierający między innymi planetoidy rozproszone, tzn. wytrącone z wcześniejszego biegu przez oddziaływania planet zewnętrznych i skierowane na mocno wydłużone orbity, sięgające daleko na peryferia Układu Słonecznego.

dysk rozproszony

Najbardziej zewnętrzną warstwę Układu Słonecznego stanowi hipotetyczny **Obłok Oorta**, rozciągający się na obszarze od kilkuset do kilkudziesięciu tysięcy jednostek astronomicznych (niemal rok świetlny). Znajdujących się tam miliardów małych, ciemnych i zamarzniętych obiektów wprawdzie nie widzimy, ale domyślamy się ich istnienia. Są one bardzo słabo przyciągane przez Słońce i często poruszają się ruchem

Obłok Oorta



chaotycznym w różnych kierunkach. Niektóre z tych ciał przylatują przypadkowo w pobliże Słońca, gdzie rozmarzają i tworzą komety długookresowe, czyli takie, których okres obiegu wokół Słońca przekracza kilka tysięcy lat.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Przygotuj referat na temat wybranej planety Układu Słonecznego z wykorzystaniem literatury popularnonaukowej lub zasobów internetowych.
2. Wymień i scharakteryzuj poszczególne obszary Układu Słonecznego.
3. Wyjaśnij, z czego wynikają różnice w budowie planet wewnętrznych i zewnętrznych.
4. Wymień powody, dla których zdecydowano, że Pluton jednak nie jest planetą.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 131 • Jednostka astronomiczna to średnia odległość Ziemi od Słońca. Wynosi około 150 000 000 km.
- s. 131 • Rok świetlny to dystans, jaki światło przebiega w próżni w ciągu roku. Wynosi około 9,5 biliona kilometrów.
- s. 132 • W skład Układu Słonecznego wchodzi Słońce, 8 planet, kilka planet karłowatych, około 180 znanych księżyców planet i miliardy drobnych ciał, do których zaliczamy planetoidy, komety, meteoroidy i pył międzyplanetarny.
- s. 132 • Około 99,9% masy całego Układu skupia Słońce.
- s. 132 • Cały Układ Słoneczny można podzielić na następujące obszary:
 - s. 133 – strefa planet wewnętrznych (skalistych),
 - s. 134 – strefa planet zewnętrznych (gazowych),
 - s. 135 – Pas Kuipera, dysk rozproszony oraz Obłok Oorta.

5. Świat galaktyk

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się, czym jest Droga Mleczna;
- dowiesz się, gdzie jest zlokalizowany Układ Słoneczny;
- poznasz szczegóły budowy innych galaktyk.

galaktyka

Strukturą nadrzędną w stosunku do gwiazd i otaczających je układów planetarnych (które w świetle aktualnych badań stanowią zjawisko powszechne) są **galaktyki**. Liczbę galaktyk w obserwowanej części Wszechświata szacuje się na setki miliardów, a każda z nich zawiera od dziesięciu milionów do biliona gwiazd. Chociaż galaktyki obserwowano już od czasów użycia pierwszych teleskopów, dopiero w latach dwudziestych XX wieku uświadomiono sobie ich rozmiary, odległości i miejsce w strukturze całego Wszechświata.



Droga Mleczna

Gdy z dala od miejskich świateł spojrzymy w bezksiężycową noc na bezchmurne niebo, bez trudu dostrzeżemy jasną, nieregularną smugę przecinającą firmament. Jest to **Droga Mleczna**. Użycie teleskopu, a nawet lornetki, przekonuje, że jej wygląd jest efektem zlania się światel pochodzących z milionów gwiazd leżących na niebie blisko siebie. Droga Mleczna oplata **firmament** dookoła, a najbardziej intensywnie świeci w rejonie gwiazdozbioru Strzelca.

Droga Mleczna



Rys. 12. Panorama Drogi Mlecznej. Efekt montażu zdjęć wykonanych w różnych porach roku.

Istnienie Drogi Mlecznej interpretujemy w ten sposób, że wszystkie „pobliskie” gwiazdy grupują się w obrębie płaskiego dysku, który oglądamy od środka. Dysk ten nazywamy Galaktyką. Jej centrum znajduje się właśnie w gwiazdozbiorze Strzelca, gdzie obserwujemy największe zagęszczenie gwiazd. Patrząc prostopadle do dysku, widzimy tylko gwiazdy z najbliższej okolicy, za którymi znajduje się pusta przestrzeń międzygalaktyczna. Wszystkie obiekty na niebie, które dostrzegamy gołym okiem, poza ledwo widoczną „chmurką” w gwiazdozbiorze Andromedy, znajdują się w naszej Galaktyce (pisanej przez duże G, w odróżnieniu od innych galaktyk, o których będzie mowa za chwilę).

Nie jest łatwo ustalić, jak dokładnie wygląda nasza Galaktyka, bo widzimy ją od środka. Obserwacje fragmentów znajdujących się po przeciwnej stronie dysku utrudnia światło pochodzące od bliższych gwiazd oraz pochłanianie promieniowania przez wyjątkowo gęsty w centrum Galaktyki **pył kosmiczny** (tzw. ekstynkcja). Po wielu latach badań, polegających na ustalaniu dokładnych odległości do milionów gwiazd, stwierdzono, że Galaktyka ma charakter spiralny z poprzeczką (rys. 13.). Oznacza to, że z jej jądra w dwie przeciwległe strony rozciąga się jasny pas gwiazd, a z jego końców rozwijają się spiralne struktury.

Rys. 13. Przypuszczalny wygląd naszej Galaktyki z kierunku prostopadłego do jej płaszczyzny.





Średnicę Galaktyki oceniamy na około 100 000 lat świetlnych, a jej grubość na 12 000 lat świetlnych. Według różnych szacunków liczy ona od 100 do 400 miliardów gwiazd. W jej skład wchodzi również liczne mgławice oraz tzw. ciemna materia w postaci neutrin, gazu międzygwiazdowego i czarnych dziur. Masę całej Galaktyki szacuje się na 10^{12} mas Słońca, a jej wiek na niecałe 14 miliardów lat. Wiele gwiazd (w tym Słońce) jest znacznie młodszych, a proces ich formowania w obłokach gazowych trwa do tej pory.

W centralnym obszarze Galaktyki zagęszczenie materii jest znacznie większe niż w rejonie Słońca. W samym środku Galaktyki najprawdopodobniej znajduje się ogromna **czarna dziura** o masie przekraczającej 4 miliony mas Słońca. Pochłania ona otaczającą materię, która spadając w jej kierunku, rozgrzewa się do ogromnych temperatur. Zanim materia przekroczy granice czarnej dziury, emituje znaczne ilości promieniowania, które rejestrujemy na Ziemi.

Dysk Galaktyki otoczony jest kulistym halo, złożonym z pojedynczych starych gwiazd oraz gromad kulistych – gęstych skupisk wielkiej ilości starych gwiazd, powstałych jednocześnie i powiązanych grawitacyjnie. Promień halo może wynosić nawet 300 000 lat świetlnych.

Lokalizacja Układu Słonecznego

lokalizacja Układu
Słonecznego

Słońce znajduje się w jednym z mniejszych ramion spiralnych Galaktyki, w odległości około 27 000 lat świetlnych od jej środka. Obiega centrum Galaktyki ze średnią prędkością orbitalną około $200\text{--}260 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, a jeden obieg zajmuje ponad 200 milionów lat. Oznacza to, że podczas swojego istnienia Słońce okrążyło Galaktykę nieco ponad 20 razy. Galaktyka nie obraca się jak bryła sztywna, gdyż każda gwiazda ma własną prędkość orbitalną. Wynika z tego, że na przestrzeni milionów lat wygląd Galaktyki nieco się zmienia.

Grubość Galaktyki w miejscu, w którym znajduje się Słońce, szacuje się na 2000–3000 lat świetlnych, przy czym odległość Słońca od najbliższych krańców Galaktyki (mierzona prostopadle do płaszczyzny dysku) wynosi około 1000 lat świetlnych. Orbita Słońca wokół centrum Galaktyki jest niemal kolista.



Obszar, w którym znajduje się Układ Słoneczny, jest dość spokojny, co ma kapitalne znaczenie dla rozwoju życia na Ziemi. W rejonach o większym zagęszczeniu materii często dochodzi do wybuchów gwiazd, co wiąże się z emisją śmiertelnie niebezpiecznego promieniowania i potencjalnymi zmianami klimatycznymi. Nie wykluczone, że znane z geologii okresy masowego wymierania gatunków związane były ze zjawiskami zachodzącymi w Kosmosie.

Rys. 14. Lokalizacja Układu Słonecznego w Drodze Mlecznej.



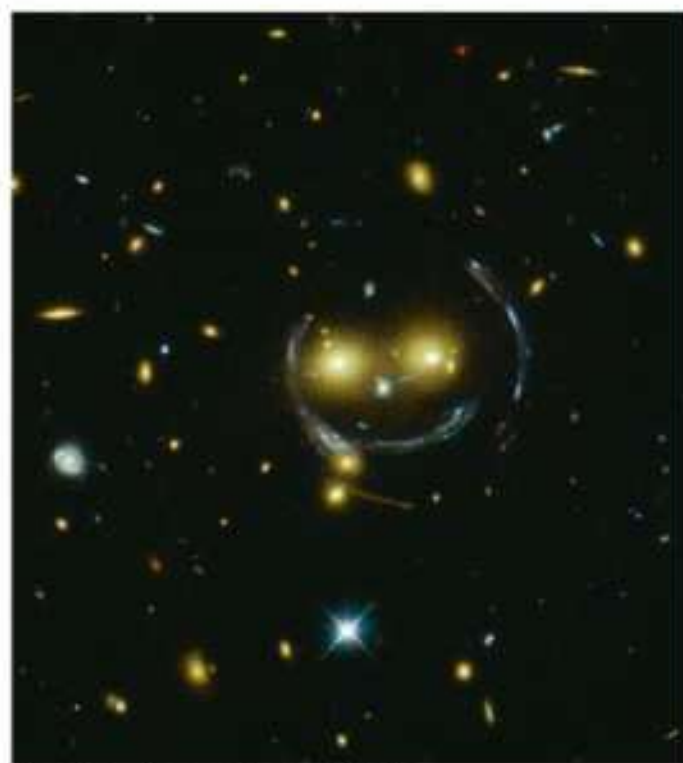
Inne galaktyki

Jedynymi obiektami spoza naszej Galaktyki, które można dostrzec na ziemskim niebie gołym okiem, są **Galaktyka Andromedy** (znana też jako M31, rys. 15) i **Galaktyka w Trójkącie** (oznaczona jako M33). Oba te obiekty wraz z Drogą Mleczną i kilkudziesięcioma galaktykami karłowatymi stanowią tzw. **Lokalną Grupę Galaktyk** – powiązaną grawitacyjnie i funkcjonującą w przestrzeni kosmicznej jako jedna całość.



Rys. 15. Galaktyka Andromedy: a) widok na niebie, b) zdjęcie wykonane w podczerwieni.

Badania galaktyk M31 i M33 doprowadziły do rewolucyjnych odkryć w historii astronomii. Do początku XX wieku uważano, że wszystkie znane galaktyki (tak ich wtedy nie nazywano) są zwykłymi mgławicami należącymi do Drogi Mlecznej, a ta stanowi cały Wszechświat. Sądzone więc, że granice Wszechświata są oddalone od Ziemi o kilkadziesiąt tysięcy lat świetlnych. W latach 1917–1924 odkryto w tych galaktykach pewne typy gwiazd – podobne do obserwowanych w bliższych rejonach Kosmosu, ale znacznie słabiej świecące. Na tej podstawie **Edwin Hubble** (wymawiaj: Edlin Habl; 1889–1953) obliczył, że mgławice w gwiazdozbiorach Andromedy i Trójkąta znajdują się kilkadziesiąt razy dalej niż dotychczas sądzono i z pewnością nie należą do Drogi Mlecznej. Tak powstała **koncepcja Wszechświata wyspowego** – złożonego z niezliczonej wielu galaktyk, do których należy też nasza Droga Mleczna.



Rys. 16. Gromada galaktyk.

Późniejsze badania wykazały, że grupy galaktyk łączą się w większe struktury, zwane **gromadami galaktyk**, liczącymi do kilku tysięcy obiektów i mierzącymi do 10 milionów lat świetlnych średnicy (rys. 16.). W 1929 roku Hubble odkrył, że gromady galaktyk oddalają się od siebie z prędkościami proporcjonalnymi do ich wzajemnej odległości. Doprowadziło to w konsekwencji do sformułowania **koncepcji rozszerzającego się Wszechświata i Teorii Wielkiego Wybuchu**.

Setki lub tysiące gromad i grup galaktyk tworzą struktury jeszcze wyższego rzędu – **supergromady galaktyk**, mające rozmiary liczone w setkach milionów lat świetlnych. Pomiedzy nimi występują wielkie pustki, zawierające co najwyżej nieliczne pojedyncze galaktyki. Oznacza to, że materia we Wszechświecie rozłożona jest nierównomiernie, co jest istotną przesłanką przy konstruowaniu teorii ewolucji Wszechświata.

gromady galaktyk

koncepcja
rozszerzającego się
Wszechświata
i Teoria Wielkiego
Wybuchu

supergromady
galaktyk



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Omów budowę naszej Galaktyki.
2. Zaprezentuj lokalizację Układu Słonecznego w Galaktyce.
3. W jaki sposób ukształtowały się współczesne poglądy na temat rozmiaru Wszechświata? Omów zagadnienie na podstawie treści zamieszczonych w podręczniku i innych dostępnych źródeł.
4. Zaprezentuj zwięźle budowę Wszechświata w największej skali.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 136 • Miliardy gwiazd krążących wokół wspólnego środka masy tworzą galaktyki.
- s. 137 • Nasza Galaktyka, ponieważ jest oglądana od środka, przybiera kształt smugi na niebie – Drogi Mlecznej.
- s. 138 • Układ Słoneczny znajduje się w znacznym oddaleniu od jądra Galaktyki i okrąża je z prędkością około $220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ raz na 200 milionów lat.
- s. 139 • Galaktyki łączą się grawitacyjnie w większe struktury: grupy i gromady galaktyk, a te – w supergromady.
- s. 139 • Gromady galaktyk oddalają się od siebie z prędkościami wprost proporcjonalnymi do ich wzajemnej odległości.

6. Ewolucja Wszechświata

NA TEJ LEKCJI

- dowiesz się o najważniejszych odkryciach kosmologii;
- poznasz szczegóły Teorii Wielkiego Wybuchu;
- zapoznasz się z możliwymi scenariuszami rozwoju Wszechświata.

Filozoficzne podstawy kosmologii

Zajmiemy się obecnie jedną z najciekawszych i najtrudniejszych dyscyplin współczesnej nauki – **kosmologią**. Słowo to pochodzi z języka greckiego i oznacza naukę o porządku świata. Kosmologia jest dziedziną rozwijającą się. Co jakiś czas odkrywamy nowe fakty, które każą weryfikować dotychczas obowiązujące teorie. Dotyka też problemów czysto filozoficznych oraz takich, w których znane nam prawa fizyki zawodzą. Eksperymenty prowadzone za pomocą największych na świecie akcelera-



torów cząstek elementarnych mają między innymi na celu odtworzenie warunków, jakie panowały we Wszechświecie w pierwszych ułamkach sekundy jego istnienia.

Na początku ustalmy, co w ogóle oznacza słowo **Wszechświat**. Definicja mówi, że jest to ogół form materii i energii, które możemy obserwować, wchodząc z nimi w jakąkolwiek interakcję. Pojęcie to obejmuje również czas i przestrzeń, w której ta materia i energia są zanurzone, oraz prawa fizyki, które porządkują zachowanie się materii i energii. W tym ujęciu rozważania typu „co jest na zewnątrz naszego Wszechświata?” (pisanego przez duże W), „czy istnieją wszechświaty alternatywne/ równoległe?” itp. są czystymi spekulacjami filozoficznymi. Gdyby bowiem istniał jakikolwiek sposób przekonania się o istnieniu innych wszechświatów, polegałby on na wejściu w jakąś interakcję z zawartą w nich materią. A wtedy, z definicji, należałoby je uznać za część naszego Wszechświata. Fizyka nie zajmuje się więc innymi wszechświatami, gdyż z natury rzeczy takiej wiedzy nie dałoby się zweryfikować doświadczalnie.

Wszechświat

Analizując budowę i zachowanie się Wszechświata, zakładamy słuszność tzw. **słabej zasady kosmologicznej**. Mówi ona, że Wszechświat oglądany z dowolnego punktu i w dowolną stronę jest mniej więcej taki sam. Ponadto w całym Wszechświecie obowiązują te same prawa fizyki, które nie zmieniają się w czasie, podobnie jak wartości fundamentalnych stałych fizycznych. Jest to bardziej kwestia naszej wiary, jakkolwiek brak jest przesłanek, które kazałyby nam w tę zasadę wątpić. Dzięki niej możemy wierzyć, że obserwowany fragment Wszechświata jest reprezentatywny dla jego całości, a uzyskane dla niego wyniki badań możemy uogólniać na cały Wszechświat. Pamiętajmy, że obojętnie, jak wielki jest Wszechświat, zobaczyć możemy tylko te jego rejony, z których światło zdążyło do nas dotrzeć podczas całego jego istnienia.

słaba zasada kosmologiczna

Zanim Edwin Hubble odkrył ucieczkę galaktyk, niektórzy fizycy (w tym Einstein) zakładali słuszność tzw. **mocnej zasady kosmologicznej**, twierdzącej, że Wszechświat jest niezmienny nie tylko w przestrzeni, ale również w czasie (tzw. Wszechświat stacjonarny). Późniejsze odkrycia wykazały, że Wszechświat ewoluuje i zasadę tę zarzucono.

Ekspansja Wszechświata

Podstawowym kosmologicznym faktem obserwacyjnym jest **ucieczka gromad galaktyk**, odkryta w 1929 roku przez Edwina Hubble'a. Związek między prędkością ucieczki a odległością do danej galaktyki określa słynne prawo Hubble'a:

Prawo Hubble'a

Gromady galaktyk oddalają się od siebie z prędkościami wprost proporcjonalnymi do ich wzajemnej odległości:

$$v = H \cdot r$$

gdzie v – prędkość ucieczki galaktyk, r – odległość między nimi, H – współczynnik proporcjonalności, zwany stałą Hubble'a.

prawo Hubble'a



Prawo Hubble'a interpretujemy jako rozszerzanie się przestrzeni, w której zanurzony jest Wszechświat. Jeśli na baloniku zaznaczymy w sposób chaotyczny dużą liczbę kropek, a następnie zaczniemy balonik nadmuchiwać, zauważymy, że kropki oddalają się od siebie, i to proporcjonalnie do ich początkowej odległości. Żadna kropka



nie jest pod tym względem wyróżniona – w myśl słabej zasady kosmologicznej ucieczka galaktyk obserwowana z dowolnej galaktyki wygląda tak samo.

Rys. 17. Edwin Hubble (1889–1953), słynny astronom amerykański. Zawdzięczamy mu zrozumienie właściwej struktury i rozmiarów Wszechświata. Badając gwiazdy zmienne (tzw. cefeidy), wykazał, że niektóre obiekty uważane wcześniej za mgławice są w istocie oddzielnymi galaktykami, a Droga Mleczna jest jedną z miliardów takich galaktyk. Udowodnił, że Wszechświat się rozszerza, i podał słynny wzór na prędkość ucieczki galaktyk.

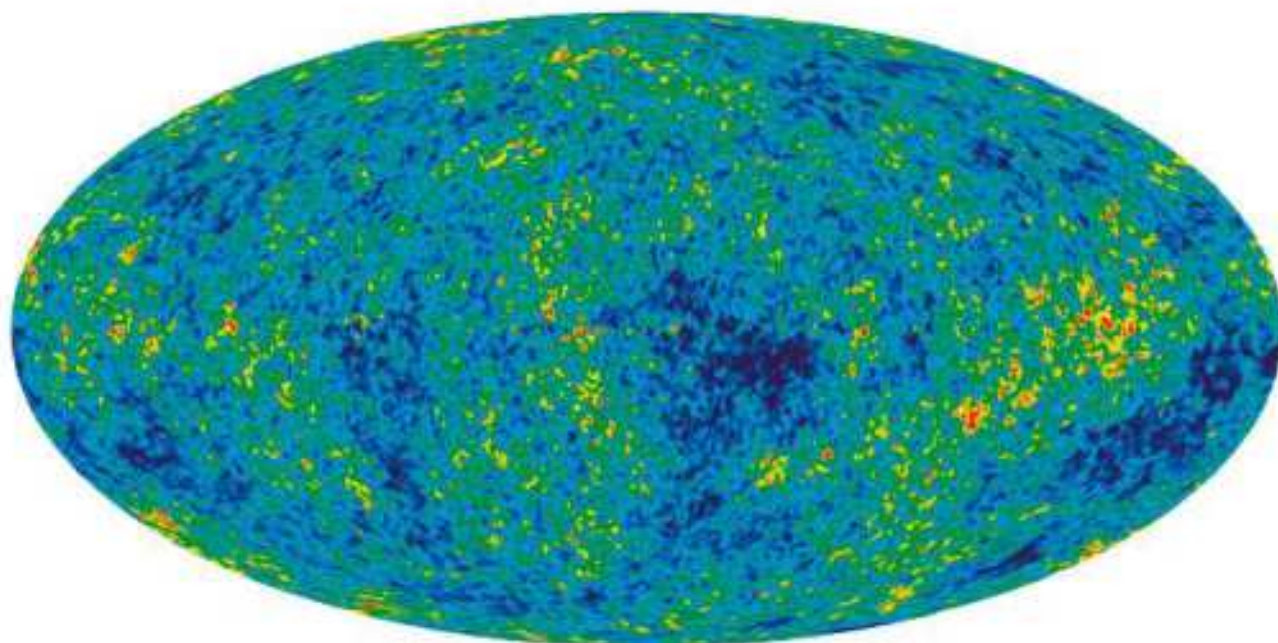
Skoro galaktyki się oddalają, to znaczy że kiedyś musiały być blisko siebie, w tym samym miejscu. Oczywiście materia nie mogła mieć wtedy postaci galaktyk, gdyż była skoncentrowana w bardzo małej objętości. Jest to najważniejsza przesłanka do sformułowania opisanej poniżej Teorii Wielkiego Wybuchu.

Promieniowanie reliktowe

Kolejnym odkryciem kosmologicznym było tzw. **promieniowanie reliktowe tła**, przewidziane teoretycznie już w latach czterdziestych XX wieku i zaobserwowane przypadkowo w 1965 roku przez Arno Penziasa (wymawiaj: Arno Penziasa; ur. 1933) i Roberta Wilsona (wymawiaj: Roberta Łilsona; ur. 1936) – laureatów Nagrody Nobla w 1978 roku. Wypełnia ono cały Wszechświat i dociera do nas ze wszystkich kierunków. Początkowo sądzono, że jest ono jednorodne i izotropowe (czyli takie samo, patrząc w każdą stronę), niemniej najnowsze badania wykazały, że występują w nim niewielkie fluktuacje temperatury (rys. 19.). Interpretuje się je jako niewielkie fluktuacje gęstości w początkowych stadiach rozwoju Wszechświata, które później zaowocowały powstaniem gromad galaktyk.



Rys. 18. Sonda kosmiczna WMAP, która w latach 2001–2010 stworzyła szczegółową mapę promieniowania reliktowego.



Rys. 19. Mapa promieniowania relikтового tła dla całego nieba. Różne kolory odpowiadają niewielkim różnicom temperatur.

Teoria Wielkiego Wybuchu

Wymieniowe wyżej zaobserwowane fakty od kilkadziesiąt lat skłaniają uczonych do przypuszczenia, że Wszechświat powstał kilkanaście (według najnowszych ustaleń: 13,7) miliardów lat temu w wyniku tzw. **Wielkiego Wybuchu** (ang. *Big Bang*). Pytanie „co było wcześniej?” należy do gatunku filozoficznych, bowiem „wcześniej” nie było czasu ani przestrzeni.

Teoria Wielkiego Wybuchu przewiduje, że na początku cała materia i przestrzeń Wszechświata skupiona była w jednym punkcie, tzw. osobliwości, o nieskończenie wielkiej gęstości i temperaturze, który z nieznanych przyczyn zaczął się rozszerzać. Żadna współczesna teoria fizyczna nie jest w stanie opisać zjawisk, jakie wówczas zachodziły. Warunków takich nie potrafimy wytworzyć w ziemskich laboratoriach. Nie istniały wtedy znane nam formy materii, ani nie obowiązywały znane obecnie prawa fizyki. Ten pierwszy etap w rozwoju Wszechświata trwał bardzo krótko (około 10^{-43} s, o ile możemy w ogóle mówić o czasie we współczesnym rozumieniu tego słowa) i nazywamy go erą Plancka. Po jej zakończeniu temperatura Wszechświata spadła do 10^{32} K, a gęstość do $10^{97} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (rys. 20.).

Od tego momentu możemy już stosować zwykłe prawa fizyki. Temperatura Wszechświata i jego gęstość szybko malały, a objętość rosła. Wyodrębniały się poszczególne rodzaje oddziaływań oraz cząstki elementarne. Początkowo poruszały się one z prędkościami bliskimi prędkości światła i nie tworzyły współczesnych form materii. W miarę spadku temperatury (poniżej 10^{14} K), powstały protony, neutrony i inne ciężkie cząstki. Nastąpiło to mniej więcej 10^{-5} s po Wielkim Wybuchu.

Nastąpiła era nukleosyntezy, trwająca około 3 minut. W całym Wszechświecie panowały wtedy warunki mniej więcej takie, jak obecnie we wnętrzu Słońca. W tych warunkach powstały (podobnie, jak to się dzieje obecnie w gwiazdach) jądra lekkich pierwiastków, w proporcjach podobnych do obserwowanych obecnie.

Teoria Wielkiego
Wybuchu

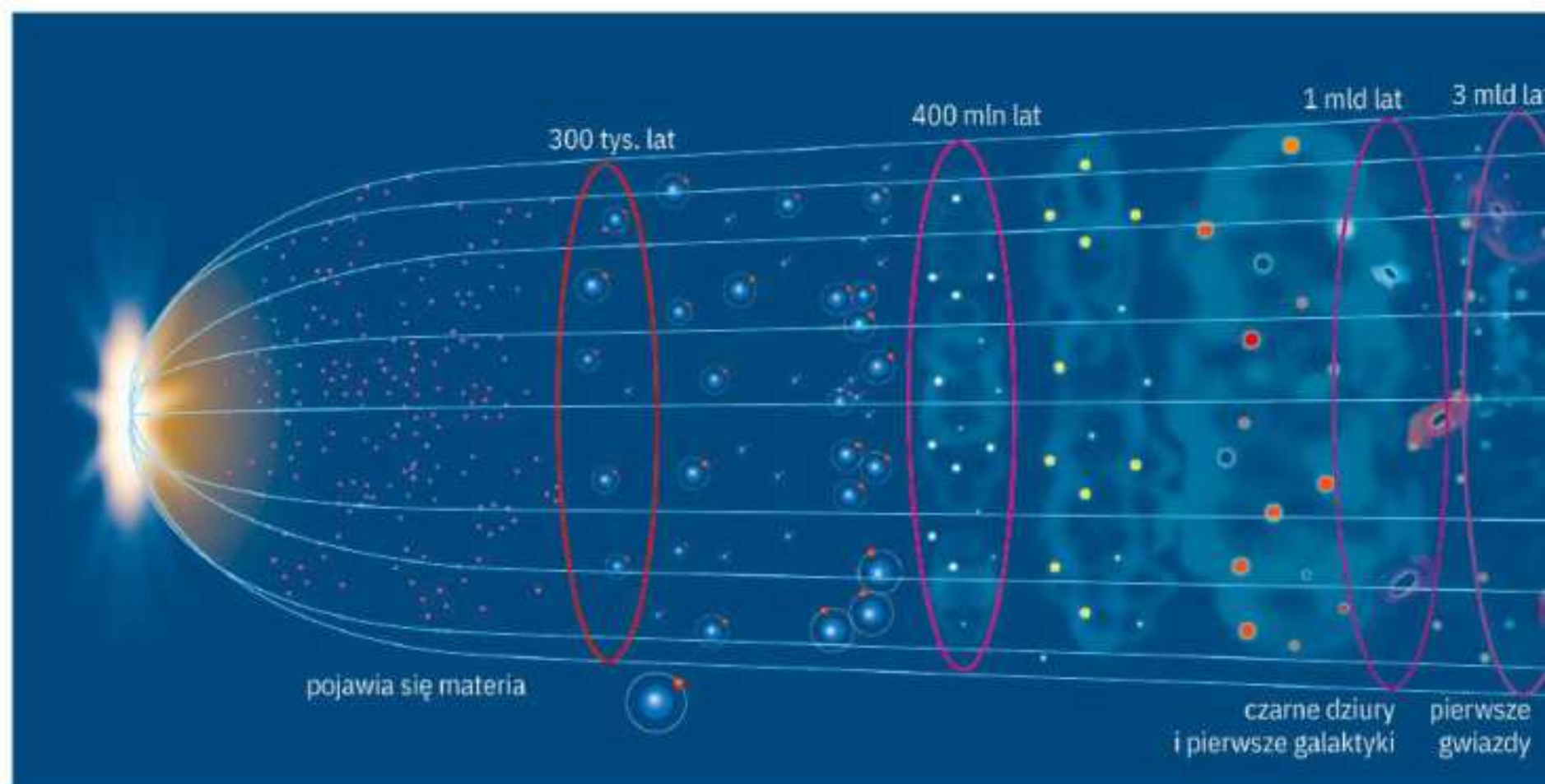


geneza
promieniowania
reliktowego

Skala czasowa następnych zjawisk kształtujących obecny wygląd Wszechświata znacznie się wydłuża. Kolejny epizod, zwany **erą promieniowania**, trwał ponad 300 000 lat. W tym czasie istniały już wszystkie znane współcześnie cząstki elementarne oraz jądra lekkich pierwiastków. Elektrony nie mogły się połączyć z jądrami z powodu zbyt wysokiej temperatury – materia występowała w stanie plazmy, tak jak to jest obecnie w gwiazdach. We Wszechświecie było za ciasno i za gorąco, by światło mogło się swobodnie rozchodzić, nie oddziałując natychmiast z gęstą materią.

Po ponad 300 000 lat nastąpiła era rekombinacji. Temperatura Wszechświata spadła do 3000 K. Elektrony coraz bardziej masowo zaczęły się trwale łączyć z jądrami, tworząc obojętne elektrycznie atomy. Świat stał się przezroczysty dla światła i zapłonęła w nim jasność. Wyzwolone światło przestało masowo oddziaływać z materią i w miarę rozszerzania się Wszechświata „stygło” zgodnie z prawami termodynamiki. Pamiątką z tamtych czasów jest promieniowanie reliktywne tła, którego aktualne parametry doskonale zgadzają się z teoretycznym modelem ewolucji Wszechświata. Dlatego też odkrycie tego promieniowania stanowiło rozstrzygający dowód słuszności Teorii Wielkiego Wybuchu.

Dalszy rozwój wypadków następował już powoli. W ciągu kolejnego miliarda lat z zagęszczeń materii (których odbicie znajdujemy w niejednorodności promieniowania reliktywego) ukształtowały się gromady galaktyk i same galaktyki, a w ich obrębie – pierwsze gwiazdy. Z wirujących dysków materii, które pozostawały po zapadnięciu się obłoków gazowych do postaci gwiazdy, powstawały układy planetarne i Wszechświat coraz bardziej przypominał swym wyglądem to, co obserwujemy obecnie. Nie mamy wątpliwości, jak Wszechświat wyglądał kilka miliardów lat temu, gdyż patrząc w rejony oddalone o kilka miliardów lat świetlnych, widzimy go właśnie takim.

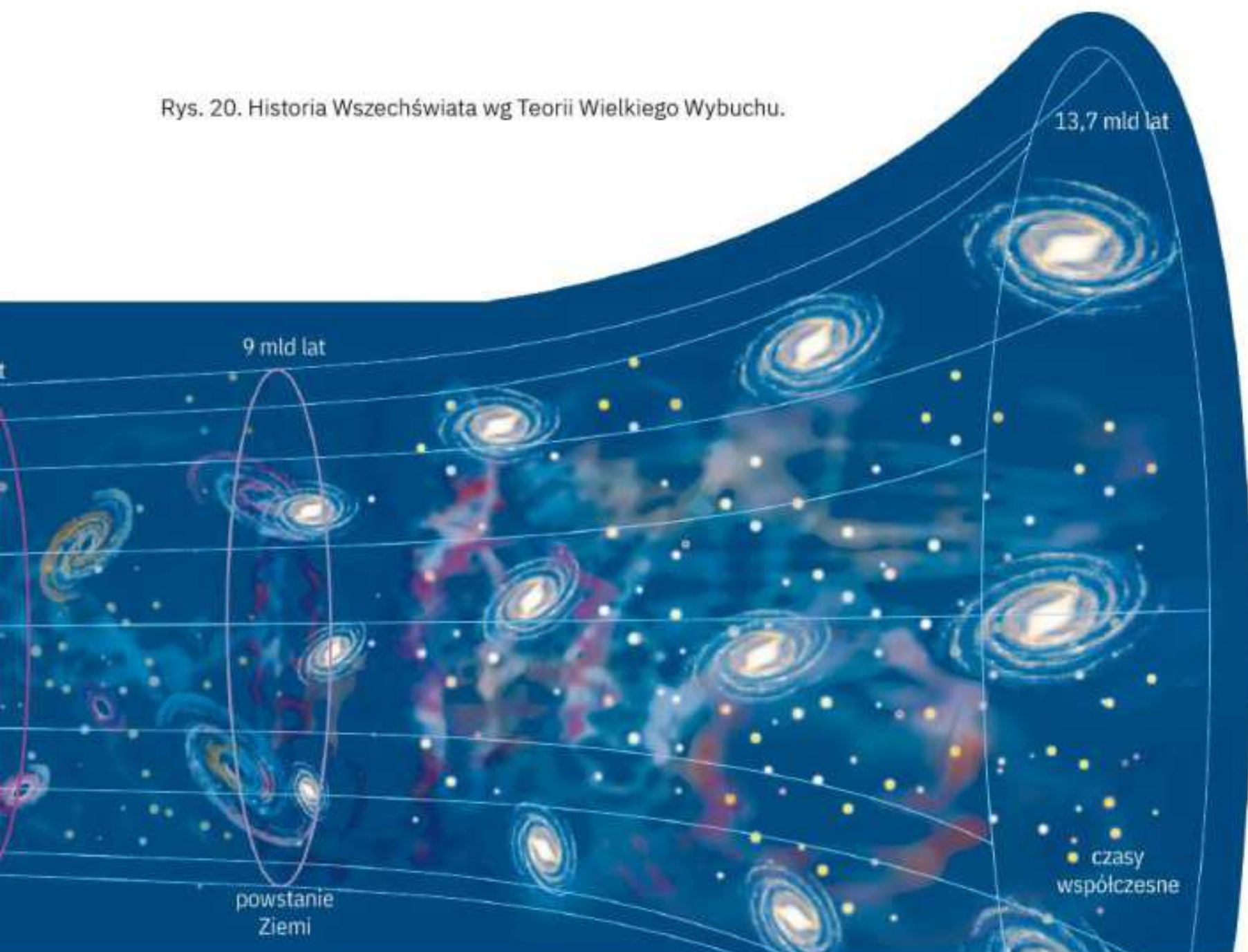




Chcesz wiedzieć więcej?

Uczni nie są zgodni co do dalszych losów Wszechświata. Do niedawna sprawa wydawała się stosunkowo prosta, gdyż uważano, że dominującą siłą działającą na kosmicznych dystansach jest siła grawitacji. Jeśli ilość materii we Wszechświecie jest odpowiednio duża, grawitacja powinna w końcu powstrzymać ekspansję i odwrócić jej bieg. Po jakimś czasie świat powinien się z powrotem zapaść do punktu materialnego, ponownie się rozgrzewając, a następnie tworząc osobliwość. Jeśli ilość materii jest zbyt mała, Wszechświat powinien się rozszerzać wiecznie, chociaż coraz wolniej. Po jakimś czasie wszystkie gwiazdy powinny zgasnąć, zamieniając się w różne formy kosmicznego popiołu: czarne karły, gwiazdy neutronowe lub czarne dziury. Świat powinien się pogrążyć w ciemności i wielkim chłodzie. Jako graniczny parametr wyboru jednego lub drugiego scenariusza przyjmowano tzw. **gęstość krytyczną**, równą około trzem atomom wodoru na metr sześcienny przestrzeni kosmicznej. Postawienie prognozy dotyczącej przyszłych losów Wszechświata sprowadzało się więc do precyzyjnego określenia rzeczywistej gęstości Wszechświata, uwzględniającej również materię niewidoczną, zawartą na przykład w czarnych dziurach i neutrinach.

Rys. 20. Historia Wszechświata wg Teorii Wielkiego Wybuchu.





Sytuacja znacznie skomplikowała się na początku XXI wieku, gdy pomiary przeprowadzone przez próbniki kosmiczne wykazały, że **ekspansja Wszechświata** nie spowalnia, tylko przyspiesza. Przestrzeń zachowuje się tak, jakby była rozdymana przez tajemniczą siłę odpychającą, którą nazwano **ciemną energią**. Nie znamy charakteru tej energii ani cząstek, które byłyby jej nośnikiem. Być może w grę wchodzi jakieś nieznane do tej pory ludzkości oddziaływanie fundamentalne.

Tak czy inaczej, zaobserwowane przyspieszenie ekspansji przesądza, że Wszechświat będzie się rozszerzał wiecznie, wszystkie źródła energii (na przykład gwiazdy) w końcu się wyczerpią i temperatura spadnie do mniej więcej zera bezwzględnego. Na szczęście stan taki (zwany **śmiercią cieplną**) nastąpi dopiero za wiele bilionów lat, gdy zgasną ostatnie, tłące się powoli czerwone karły.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, co to są zasady kosmologiczne i co z nich wynika.
2. Opisz narzędzia badawcze współczesnej kosmologii.
3. Opisz fakty obserwacyjne, które legły u podstaw Teorii Wielkiego Wybuchu.
4. Opisz poszczególne etapy rozwoju Wszechświata zgodnie z Teorią Wielkiego Wybuchu.
5. Przedstaw możliwe scenariusze dalszej ewolucji Wszechświata.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 141 • Wszechświatem nazywamy całą oddziałującą z nami materię, energię, czas i przestrzeń wraz z prawami fizyki, które określają właściwości powyższych pojęć.
- s. 141 • Zasięg obserwowalnej części Wszechświata ograniczony jest prędkością światła.
- s. 141 • Odkryto, że Wszechświat się rozszerza i jest wypełniony niemal jednorodnym promieniowaniem pochodzącym z wczesnych etapów jego ewolucji.
- s. 143 • Obowiązującym modelem rozwoju Wszechświata jest Teoria Wielkiego Wybuchu. Zgadza się ona dokładnie z danymi obserwacyjnymi, niemniej występuje w niej kilka niewiadomych.
- s. 146 • Ekspansja Wszechświata przyspiesza i nie wiemy, dlaczego tak jest. Jesteśmy świadomi faktu, że nie znamy jeszcze wszystkich praw fizyki i być może wszystkich rodzajów oddziaływań oraz form materii i energii.



PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

1. Oddziaływanie grawitacyjne jest zjawiskiem powszechnym i dotyczy wszystkich ciał obdarzonych masą. Ciała przyciągają się wzajemnie siłami grawitacji o wartości wprost proporcjonalnej do iloczynu mas tych ciał i odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między ich środkami. s. 119
2. Oddziaływanie grawitacyjne jest bardzo słabe, gdyż stała grawitacji jest bardzo mała. Staje się odczuwalne, gdy przynajmniej jedno z oddziałujących ciał ma ogromną masę (jest ciałem niebieskim). s. 120
3. Siła grawitacji powoduje spadanie ciał na powierzchnię planet. Przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni ciała niebieskiego jest proporcjonalne do jego masy i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu jego promienia. s. 121
4. Siła grawitacji wprawia ciała w ruch orbitalny. Pełni wtedy funkcję siły dośrodkowej. s. 123
5. Minimalna prędkość niezbędna do wejścia ciała na orbitę to pierwsza prędkość kosmiczna. s. 124
6. Jeśli układ nieinercyjny porusza się z przyspieszeniem skierowanym pionowo w górę, to siła bezwładności dodaje się do siły ciężkości. Stan taki nazywamy przeciążeniem. Jeśli układ porusza się z przyspieszeniem skierowanym w dół, to siła bezwładności odejmuje się od siły ciężkości i mamy do czynienia z niedociążeniem. s. 128
7. Skrajnym przejawem niedociążenia jest stan nieważkości. Pojawia się on w układach, w których jedyną działającą siłą zewnętrzną jest siła grawitacji. Sytuacja taka ma miejsce na przykład podczas spadku swobodnego lub ruchu po orbicie. s. 130
8. Jednostka astronomiczna to średnia odległość Ziemi od Słońca. Wynosi około 150 000 000 km. s. 131
9. Rok świetlny to dystans, jaki światło przebiega w próżni w ciągu roku. Wynosi około 9,5 biliona km. s. 131
10. W skład Układu Słonecznego wchodzi Słońce, 8 planet, kilka planet karłowatych, około 180 znanych księżyców planet oraz niezliczone ilości planetoid, komet i innych drobnych ciał. s. 132
11. Niemal całą masę Układu Słonecznego skupia Słońce. s. 132
12. Układ Słoneczny można podzielić na następujące obszary: strefa planet wewnętrznych (skalistych), strefa planet zewnętrznych (gazowych), Pas Kuipera, dysk rozproszony i Obłok Oorta. s. 132
13. Gwiazdy pod wpływem sił grawitacji grupują się w galaktyki, a te – w większe struktury: grupy i gromady galaktyk oraz w supergromady. s. 136
14. Nasza Galaktyka, ponieważ jest oglądana od środka, przybiera kształt smugi na niebie – Drogi Mlecznej. s. 137
15. Układ Słoneczny znajduje się w znacznym oddaleniu od centrum Galaktyki, w miejscu o małym zagęszczeniu gwiazd. Okrąża jądro Galaktyki z prędkością około $220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ raz na 200 milionów lat. s. 138
16. Wszechświatem nazywamy całą oddziałującą z nami materię, energię, czas i przestrzeń wraz z prawami fizyki, które określają właściwości powyższych pojęć. s. 141
17. Wszechświat się rozszerza. Gromady galaktyk oddalają się od siebie z prędkościami wprost proporcjonalnymi do ich wzajemnej odległości. s. 141
18. Najdalsze obserwowane fragmenty Wszechświata odległe są o około 13,7 miliarda lat świetlnych. Światło, aby dotrzeć stamtąd do naszych oczu, potrzebowało 13,7 miliarda lat – tyle, ile wynosi szacunkowy wiek Wszechświata. s. 143
19. Wszechświat jest wypełniony niemal jednorodnym promieniowaniem pochodzącym z wczesnych etapów jego ewolucji. s. 143
20. Według Teorii Wielkiego Wybuchu Wszechświat powstał na skutek eksplozji nieskończenie gęstego i gorącego punktu osobliwego. W miarę rozszerzania się i stygnięcia wyodrębniały się w nim kolejne oddziaływania oraz struktury materialne. s. 143
21. Kosmologia nie jest nauką zamkniętą. Odkryto, że ekspansja Wszechświata przyspiesza i nie potrafimy tego wyjaśnić na gruncie znanych praw fizyki. s. 146

Odpowiedzi do zadań

2.1.2. 5 km

2.1.3. $2,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$; $3,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ 2.1.4. $3,27 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

2.2.1. a) 5 minut; b) największa na odcinkach Krzeczowice – Kańczuga i Kańczuga – Łopuszka ($30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$), najmniejsza na odcinku Urzejowice – Krzeczowice ($20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$); c) $23,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

2.2.2. Pierwszy o 5 minut

2.2.3. $53,3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

2.2.4. 10 s, 50 m

2.3.1. $1,25 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

2.3.2. 32 m

2.3.3. $3,75 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

2.3.4. 62,5 m

2.4.1. 50 s, 375 m

2.4.2. 555,5 m; $13,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

2.5.1. Okres zmaleje dwukrotnie, częstotliwość się podwoi.

2.5.2. $12,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ 3.3.1. $12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

3.3.2. 32 s

3.3.3. 12,8 kN

3.3.4. 0,5 kg

3.6.2. 162 N

3.7.5. 80 N, 32 N

3.8.2. 80 kJ

3.8.3. 88,9 W

3.8.4. $30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

3.8.5. 2480 N

3.9.2. czołg (o 410 kJ)

3.9.3. $20,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 73,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

3.9.4. 150 m

3.9.5. $80,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

3.10.2. około 4 mm. Uwaga: przy dokładnym rozwiązaniu należy też uwzględnić ubytek energii potencjalnej młotka w trakcie zagłębiania się gwoźdźcia w drewno.

3.10.3. 6,25 cm; 0,125 J

3.11.2. $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; 21,25 m; $20,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

4.1.3. o 0,31%

4.1.4. $2 \cdot 10^{20}$ N

4.2.1. niecałe 85 minut

4.2.2. $0,258 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$; 6 godzin 46 minut

4.2.3. 20 400 km

4.3.2. $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; w dół

Indeks

B

- bezwładność 67
- Big Bang* 143
- błąd
 - bezwzględny 20
 - gruby 21

C

- Ceres 133
- ciało 9
- ciemna energia 146
- cyfry znaczące 23
- czarna dziura 138
- częstotliwość 56

D

- definicja 9
- droga 33, 53
- Droga Mleczna 137
- dynamika 59
- dysk rozproszony 135
- działka
 - elementarna 19
 - legalizacyjna 20
- dżul 93

E

- ekspansja Wszechświata 146
- ekstynkcja 137
- energia 99
 - kinetyczna 100, 102
 - potencjalna 105

F

- firmament 137

G

- galaktyka 136
- Galaktyka
 - Andromedy 139
 - w Trójkącie 139
- Galileusz (Galileo Galilei) 11
- gęstość krytyczna 145
- gromada galaktyk 139

H

- herc 56
- Hubble Edwin 139, 141

J

- jednostka
 - główna 17
 - podwielokrotna 17
 - wielokrotna 17
- jednostka astronomiczna 131
- jednostki
 - podstawowe 15
 - uzupełniające 16
- Jowisz 133, 134, 135

K

- kinematyka 31
- klasa dokładności 20
- kosmologia 140

L

- Lokalna Grupa Galaktyk 139

M

- M31 139
- M33 139
- Mars 133, 135
- Merkury 133, 135
- metoda
 - równoległoboku 63
 - trójkąta 62
- moc 96

N

- Neptun 134, 135
- niedociążenie 129
- nieważkość 129, 130
- niuton 70

O

- Obłok Oorta 135
- oddziaływania 73
 - bezpośrednie 60
 - zdalne 60
- okres 56
- opóźnienie 50
- oś
 - odciętych 25
 - rzędnych 25

P

- pas Kuipera 135
- pas planetoid 134
- Penzias Arno 142
- planety
 - wewnętrzne 133
 - zewnętrzne 134
- Pluton 135
- pomiar 19
 - bezpośredni (prosty) 20
 - pośredni (złożony) 20
- praca 93
- prawo
 - Hooke’a 108
 - Hubble’a 141
 - powszechnego ciążenia 119
- prawo fizyki 9
- prędkość
 - chwilowa 35
 - liniowa 56
 - orbitalna 123, 124
 - pierwsza kosmiczna 124
 - średnia 34
- promieniowanie
 - reliktove 142
- proporcjonalność prosta 27
- Proxima Centauri 132
- przeciążenie 128
- przyrząd pomiarowy 19
- przyspieszenie
 - chwilowe 36
 - grawitacyjne 121
 - średnie 35
 - ziemskie 121

R

- rok świetlny 131
- rozdzielczość 20
- ruch 32
 - jednostajnie opóźniony 33
 - jednostajnie przyspieszony 33
 - jednostajnie zmienny 33
 - jednostajny 33
 - po okręgu 56
 - prostoliniowy 40
 - krzywoliniowy 33
 - niejednostajnie zmienny 33
 - po okręgu 33
 - prostoliniowy 33
 - jednostajnie opóźniony 50
 - jednostajnie przyspieszony 45
 - zmienny 33

S

- satelita geostacjonarny 126
- Saturn 134, 135
- seria pomiarów 21
- siła 60
 - akcji 73
 - dośrodkowa 80
 - oporu 85
 - reakcji 73
 - składowa 61
 - tarcia 89
 - wypadkowa 61
 - zachowawcza 111
- skutki oddziaływań
 - dynamiczne 60
 - statyczne 60
- Słońce 132
- stała grawitacji 120
- stan równowagi 64
- substancja 9
- supergromada galaktyk 139
- system przedrostków metrycznych 16
- szybkość 33

Ś

- śmierć cieplna 146

T

- tarcie 87
 - kinetyczne 87
 - statyczne 87
 - ślizgowe 88
 - toczne 88
- Teleskop Hubble’a 134
- teoria 9
- Teoria Wielkiego Wybuchu 142, 143
- tor 32

U

- ucieczka galaktyk 141
- układ
 - inercjalny 76
 - izolowany 111
 - jednostek SI 15
 - nieinercjalny 77
 - odniesienia 32
- Układ Słoneczny 132, 138
- Uran 134, 135

W

- wat 96
- wektor
 - położenia (wodzący) 34
 - przesunięcia (przemieszczenia) 34
- Wenus 133, 135
- wielkości fizyczne
 - pochodne 14
 - podstawowe 13
 - skalarne 14
 - wektorowe 14
- wielkość fizyczna 9
- Wilson Robert 142
- Wszechświat 141

Z

- zakres przyrządu pomiarowego 19
- zaokrąglanie wyników obliczeń 23
- zasada 9
 - bezwładności Galileusza 66
 - zachowania energii mechanicznej 111
- zasada dynamiki
 - druga 70
 - pierwsza 67
 - pierwsza (uogólniona) 76
 - trzecia 73

- zasada kosmologiczna
 - mocna 141
 - słaba 141
- Ziemia 133, 135
- zjawisko fizyczne 8
- zmienna
 - niezależna 25
 - zależna 25