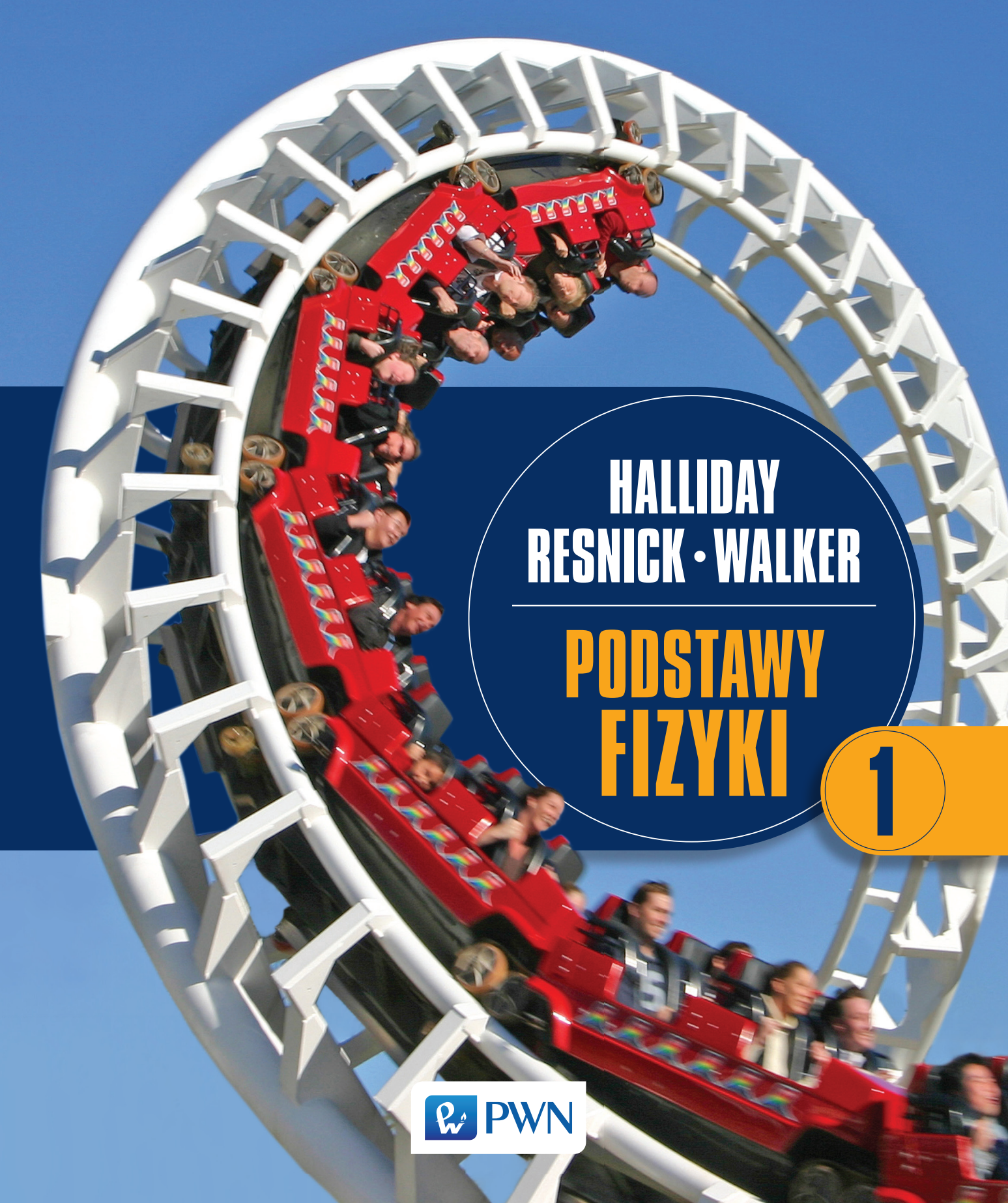


HALLIDAY
RESNICK • WALKER

PODSTAWY FIZYKI

1

PWN

WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE (WARTOŚCI ZAOKRĄGLONE)

Powietrze (suche, w temp. 20°C i pod ciśn. 1 atm)	
gęstość	1,21 kg/m^3
ciepło właściwe pod stałym ciśnieniem	1010 J/(kg · K)
stosunek ciepeł właściwych c_p/c_v	1,40
prędkość dźwięku	343 m/s
natężenie pola elektrycznego przebicia	$3 \cdot 10^6$ V/m
efektywna masa molowa	0,0289 kg/mol
Woda	
gęstość	1000 kg/m^3
prędkość dźwięku	1460 m/s
ciepło właściwe pod stałym ciśnieniem	4190 J/(kg · K)
ciepło topnienia (w temp. 0°C)	333 kJ/kg
ciepło parowania (w temp. 100°C)	2260 kJ/kg
współczynnik załamania ($\lambda = 589$ nm)	1,33
masa molowa	0,0180 kg/mol
Ziemia	
masa	$5{,}98 \cdot 10^{24}$ kg
średni promień	$6{,}37 \cdot 10^6$ m
przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni Ziemi	9,8 m/s^2
standardowe ciśnienie atmosferyczne	$1{,}01 \cdot 10^5$ Pa
okres ruchu satelity na orbicie odległej od Ziemi o 100 km	86,3 min
promień orbity geostacjonarnej	42 200 km
prędkość ucieczki	11,2 km/s
dipolowy moment magnetyczny	$8{,}0 \cdot 10^{22}$ A · m^2
średnie pole elektryczne na powierzchni Ziemi	150 V/m, skierowane w dół
Odległości od Ziemi	
do Księżyca	$3{,}82 \cdot 10^8$ m
do Słońca	$1{,}50 \cdot 10^{11}$ m
do najbliższej gwiazdy	$4{,}04 \cdot 10^{16}$ m
do środka naszej Galaktyki	$2{,}2 \cdot 10^{20}$ m
do galaktyki Andromedy	$2{,}1 \cdot 10^{22}$ m
do granicy obserwowalnego Wszechświata	$\sim 10^{26}$ m

WZORY MATEMATYCZNE — PATRZ DODATEK E

ALFABET GRECKI

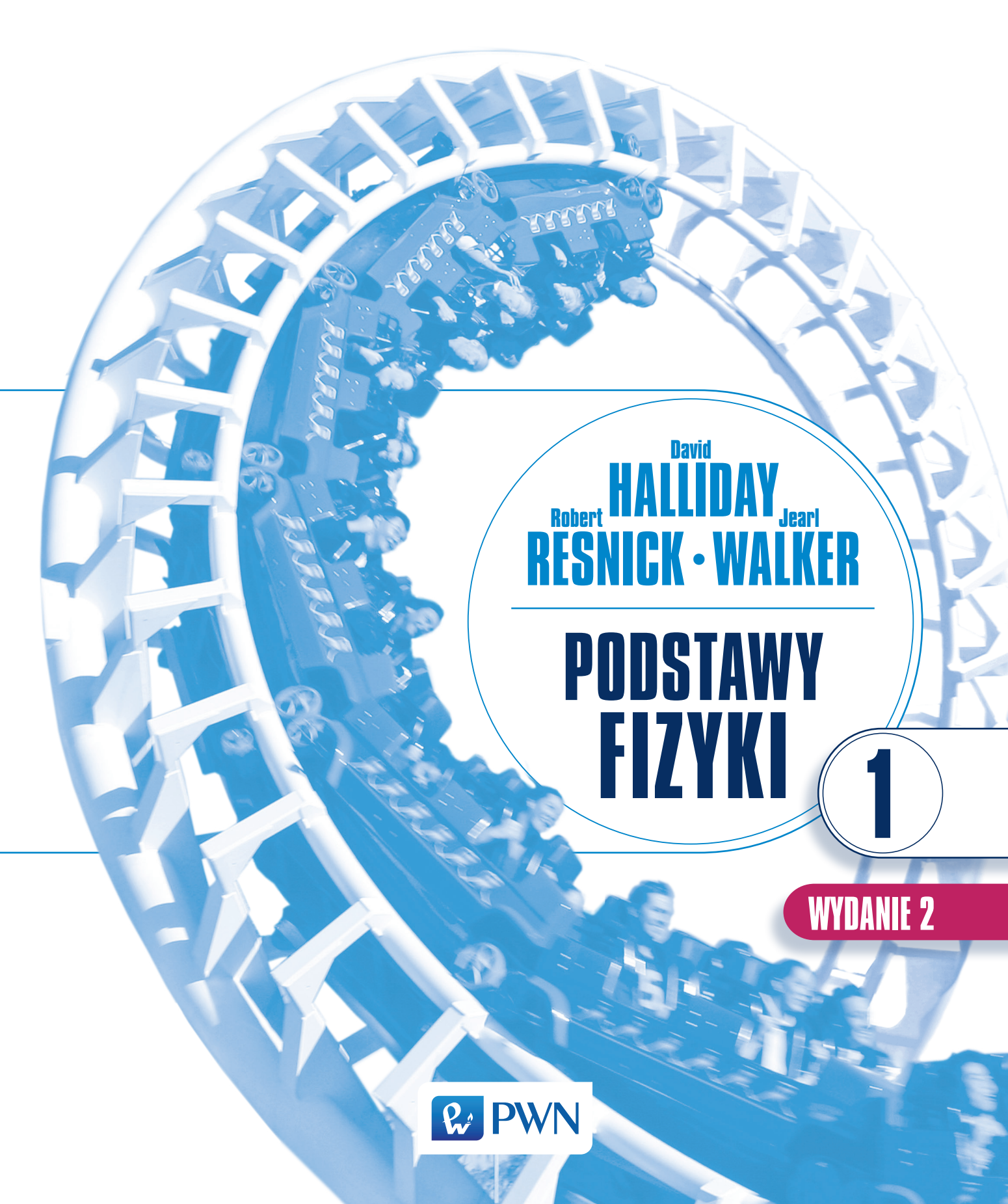
alfa	A	α	iota	I	ι	ro	P	ρ
beta	B	β	kappa	K	κ	sigma	Σ	σ
gamma	Γ	γ	lambda	Λ	λ	tau	T	τ
delta	Δ	δ	mi	M	μ	ypsilon	Υ	υ
epsilon	E	ϵ	ni	N	ν	fi	Φ	ϕ, φ
dzeta	Z	ζ	ksi	Ξ	ξ	chi	X	χ
eta	H	η	omikron	O	o	psi	Ψ	ψ
theta	Θ	θ	pi	Π	π	omega	Ω	ω

HALLIDAY
RESNICK • WALKER

PODSTAWY FIZYKI

1

Przekład
z języka angielskiego
Mirosław ŁUKASZEWSKI (wydanie 1 i 2)



David
HALLIDAY
Robert
RESNICK • WALKER
Jearl

PODSTAWY FIZYKI

1

WYDANIE 2

PWN

Dane oryginału

Fundamentals of Physics Extended, 10th edition, by Jearl Walker, David Halliday, Robert Resnick

Copyright © 2014, 2011, 2008, 2005 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation under licence with the original publisher John Wiley & Sons, Inc.

Projekt okładki i stron tytułowych **Przemysław Spiechowski**

Ilustracja na okładce **jabiru/Depositphotos**

Przekład z języka angielskiego (wydanie 1 i 2) **Mirosław Łukaszewski**

Wydawca **Izabela Ewa Mika**

Redaktor prowadzący **Irena Puchalska**

Redaktor merytoryczny **Anna Bogdanienko**

Produkcja **Mariola Grzywacka**

Łamanie **FixPoint**, **Warszawa**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo.
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © for the Polish edition by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2003, 2015

ISBN 978-83-01-18114-7 tom 1
ISBN 978-83-01-18123-9 tomy 1–5

Wydanie drugie

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
infolinia 801 33 33 88
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
e-mail: pwn@pwn.com.pl, www.pwn.pl

Druk i oprawa: Drukarnia Art-Druk, Kobyłka

S P I S T R E Ś C I

TOM 1

1. Pomiar
2. Ruch prostoliniowy
3. Wektory
4. Ruch w dwóch i trzech wymiarach
5. Siła i ruch I
6. Siła i ruch II
7. Energia kinetyczna i praca
8. Energia potencjalna i zachowanie energii
9. Środek masy i pęd
10. Obroty
11. Toczenie się ciał, moment siły i moment pędu

TOM 2

12. Równowaga i sprężystość
13. Grawitacja
14. Płyny
15. Drgania
16. Fale I
17. Fale II
18. Temperatura, ciepło i pierwsza zasada termodynamiki
19. Kinetyczna teoria gazów
20. Entropia i druga zasada termodynamiki

TOM 3

21. Prawo Coulomba
22. Pole elektryczne
23. Prawo Gaussa
24. Potencjał elektryczny
25. Pojemność elektryczna
26. Prąd elektryczny i opór elektryczny
27. Obwody elektryczne
28. Pole magnetyczne
29. Pole magnetyczne wywołane przepływem prądu
30. Zjawisko indukcji i indukcyjność
31. Drgania elektromagnetyczne i prąd zmienny
32. Równanie Maxwella: magnetyzm materii

TOM 4

33. Fale elektromagnetyczne
34. Obrazy
35. Interferencja
36. Dyfrakcja
37. Teoria względności

TOM 5

38. Fotony i fale materii
39. Jeszcze o falach materii
40. Wszystko o atomach
41. Przewodnictwo elektryczne ciał stałych
42. Fizyka jądrowa
43. Energia jądrowa
44. Kwarki, leptony i Wielki Wybuch

Dodatki

S P I S T R E Ś C I

Od Wydawcy do drugiego wydania polskiego XI

Przedmowa XIII

Podziękowania XXI

1. Pomiar 1

1.1. Jak się mierzy różne rzeczy, na przykład długość? 1
O fizyce 1
Jak się mierzy różne rzeczy? 2
Międzynarodowy Układ Jednostek 2
Zamiana jednostek 3
Długość 4
Cyfry znaczące i cyfry po przecinku 5

1.2. Czas 6
Czas 6

1.3. Masa 7
Masa 8
Podsumowanie 9 Zadania 10

2. Ruch prostoliniowy 16

2.1. Położenie, przemieszczenie i prędkość średnia 16
O fizyce 16
Ruch 17
Położenie i przemieszczenie 17
Prędkość średnia 19

2.2. Prędkość chwilowa 22
Prędkość chwilowa 22

2.3. Przyspieszenie 25
Przyspieszenie 25

2.4. Ruch ze stałym przyspieszeniem 28
Ważny przypadek szczególny: ruch ze stałym przyspieszeniem 29
Stałe przyspieszenie w innym świetle 33

2.5. Spadek swobodny 34
Spadek swobodny 34

2.6. Całkowanie graficzne przy badaniu ruchu 36
Całkowanie graficzne przy badaniu ruchu 36
Podsumowanie 38 Pytania 39 Zadania 41

3. Wektory 52

3.1. Wektory i ich składowe 52
O fizyce 52
Wektory i skalary 53
Geometryczne dodawanie wektorów 53
Składowe wektorów 55

3.2. Wektory jednostkowe, dodawanie wektorów na składowych 59
Wektory jednostkowe 59
Dodawanie wektorów na składowych 60
Wektory a prawa fizyki 61

3.3. Mnożenie wektorów 64
Mnożenie wektorów 65
Podsumowanie 70 Pytania 71 Zadania 72

4. Ruch w dwóch i trzech wymiarach 79

4.1. Położenie i przemieszczenie 79
O fizyce 79
Położenie i przemieszczenie 80

4.2. Prędkość średnia i prędkość chwilowa 82
Prędkość średnia i prędkość chwilowa 82

4.3. Przyspieszenie średnie i przyspieszenie chwilowe 85
Przyspieszenie średnie i przyspieszenie chwilowe 85

4.4. Rzut ukośny 87
Rzut ukośny 88
4.5. Ruch jednostajny po okręgu 95
Ruch jednostajny po okręgu 95
4.6. Ruch względny w jednym wymiarze 98
Ruch względny w jednym wymiarze 98
4.7. Ruch względny w dwóch wymiarach 100
Ruch względny w dwóch wymiarach 100
Podsumowanie 102 Pytania 103 Zadania 105

5. Siła i ruch I 119
5.1. Pierwsza i druga zasada dynamiki Newtona 119
O fizyce 120
Mechanika klasyczna 120
Pierwsza zasada dynamiki Newtona 121
Siła 121
Masa 124
Druga zasada dynamiki Newtona 124
5.2. Kilka ważnych sił 129
Kilka ważnych sił 129
5.3. Jak stosować zasady dynamiki Newtona? 134
Trzecia zasada dynamiki Newtona 134
Jak stosować zasady dynamiki Newtona? 135
Podsumowanie 143 Pytania 143 Zadania 146

6. Siła i ruch II 156
6.1. Tarcie 156
O fizyce 156
Tarcie 157
Właściwości tarcia 160
6.2. Siła oporu i prędkość graniczna 164
Siła oporu i prędkość graniczna 164
6.3. Ruch jednostajny po okręgu 167
Ruch jednostajny po okręgu 167
Podsumowanie 173 Pytania 174 Zadania 175

7. Energia kinetyczna i praca 187
7.1. Energia kinetyczna 187
O fizyce 187
Co to jest energia? 187
Energia kinetyczna 188
7.2. Praca i energia kinetyczna 189
Praca 190
Praca i energia kinetyczna 190
7.3. Praca wykonana przez siłę ciężkości 195
Praca wykonana przez siłę ciężkości 196
7.4. Praca wykonana przez siłę sprężystości 200
Praca wykonana przez siłę sprężystości 200
7.5. Praca wykonana przez dowolną siłę zmienną 204
Praca wykonana przez dowolną siłę zmienną 205
7.6. Moc 209
Moc 210
Podsumowanie 212 Pytania 213 Zadania 215

8. Energia potencjalna i zachowanie energii 224
8.1. Energia potencjalna 224
O fizyce 224
Praca i energia potencjalna 225
Siły zachowawcze: niezależność pracy od drogi 226
Wyznaczanie energii potencjalnej 229
8.2. Zachowanie energii mechanicznej 232
Zachowanie energii mechanicznej 232
8.3. Zastosowanie krzywych energii potencjalnej 236
Zastosowanie krzywych energii potencjalnej 237
8.4. Praca wykonana nad układem przez siłę zewnętrzną 241
Praca wykonana nad układem przez siłę zewnętrzną 242
8.5. Zasada zachowania energii 246
Zasada zachowania energii 246
Podsumowanie 251 Pytania 252 Zadania 254

9. Środek masy i pęd 271
9.1. Środek masy 271
O fizyce 271
Środek masy 272
9.2. Druga zasada dynamiki Newtona dla układu cząstek 278
Druga zasada dynamiki Newtona dla układu cząstek 278
9.3. Pęd 283
Pęd 283
Pęd układu cząstek 284

9.4. Zderzenie i popęd siły 285
Zderzenie i popęd siły 285
9.5. Zachowanie pędu 290
Zachowanie pędu 290
9.6. Pęd i energia kinetyczna w zderzeniach 294
Pęd i energia kinetyczna w zderzeniach 294
Zderzenia niesprężyste w jednym wymiarze 295
9.7. Zderzenia sprężyste w jednym wymiarze 298
Zderzenia sprężyste w jednym wymiarze 299
9.8. Zderzenia w dwóch wymiarach 303
Zderzenia w dwóch wymiarach 303
9.9. Układ o zmiennej masie: rakieta 304
Układ o zmiennej masie: rakieta 304
Podsumowanie 307 Pytania 308 Zadania 310

10. Obroty 325
10.1. Zmienne obrotowe 325
O fizyce 326
Zmienne obrotowe 327
Czy wielkości kątowe są wektorami? 334
10.2. Obrót ze stałym przyspieszeniem kątowym 335
Obrót ze stałym przyspieszeniem kątowym 336
10.3. Związek zmiennych liniowych z kątowymi 338
Związek zmiennych liniowych z kątowymi 339
10.4. Energia kinetyczna w ruchu obrotowym 343
Energia kinetyczna w ruchu obrotowym 343
10.5. Jak obliczyć moment bezwładności? 345
Jak obliczyć moment bezwładności? 345
10.6. Moment siły 350
Moment siły 350
10.7. Druga zasada dynamiki Newtona dla ruchu obrotowego 352
Druga zasada dynamiki Newtona dla ruchu obrotowego 352
10.8. Praca i energia kinetyczna ruchu obrotowego 356
Praca i energia kinetyczna ruchu obrotowego 357
Podsumowanie 360 Pytania 362 Zadania 363

11. Toczenie się ciał, moment siły i moment pędu 375
11.1. Toczenie jako złożenie ruchu obrotowego i postępowego 375
O fizyce 375
Toczenie jako złożenie ruchu obrotowego i postępowego 376
11.2. Siły i energia kinetyczna w ruchu tocznym 378
Energia kinetyczna ruchu tocznego 378
Siły działające przy toczeniu 379
11.3. Jo-jo 383
Jo-jo 383
11.4. Moment siły raz jeszcze 384
Moment siły raz jeszcze 384
11.5. Moment pędu 387
Moment pędu 388
11.6. Druga zasada dynamiki Newtona dla ruchu obrotowego 390
Druga zasada dynamiki Newtona dla ruchu obrotowego 390
11.7. Moment pędu ciała sztywnego 393
Moment pędu układu cząstek 394
Moment pędu ciała sztywnego obracającego się wokół stałej osi 395
11.8. Zachowanie momentu pędu 397
Zachowanie momentu pędu 397
11.9. Precesja żyroskopu 403
Precesja żyroskopu 403
Podsumowanie 405 Pytania 406 Zadania 407

Dodatki 418
A. Międzynarodowy Układ Jednostek (SI) 418
B. Niektóre podstawowe stałe fizyczne 420
C. Niektóre dane astronomiczne 422
D. Współczynniki zamiany jednostek 424
E. Wzory matematyczne 428
F. Właściwości pierwiastków 431
G. Układ okresowy pierwiastków 434

Autorzy zdjęć 435

Odpowiedzi 436

Skorowidz 441

OD WYDAWCY DO DRUGIEGO WYDANIA POLSKIEGO

Od czasu gdy do rąk polskich Czytelników trafiło I wydanie *Podstaw fizyki*, będące tłumaczeniem VI wydania oryginalnego, na rynku amerykańskim ukazały się trzy kolejne wydania tego znakomitego podręcznika. Obecne, II wydanie polskie jest tłumaczeniem **X wydania oryginalnego**.

W książce poczyniono pewne zmiany. Podzielono na nowo rozdziały, tak by podrozdziały dotyczyły jednego podstawowego pojęcia. Na początku każdego z nich dodano listę celów nauczania, a po nich informację o podstawowych faktach, które należy przyswoić. Dodatkowo znacznie zmodyfikowano rozdziały o prawie Gaussa i potencjale elektrycznym, które sprawiały studentom najwięcej trudności. W rozdziałach dotyczących fizyki kwantowej rozszerzono natomiast omówienie równania Schrödingera. Oddzielono również opis modelu atomu Bohra od rozwiązania równania Schrödingera dla atomu wodoru. Dodano także podrozdział o promieniowaniu ciała doskonale czarnego i prawie Plancka.

Cenne uzupełnienie stanowi 16 nowych przykładów napisanych z myślą o dokładniejszym wyjaśnieniu fragmentów wykładu oraz 250 nowych zadań domowych i 50 pytań.

Dodatkowo wydawca oryginału na swojej platformie WileyPLUS udostępnia czytelnikom dynamiczne centrum kształcenia (strony https://www.wileyplus.com/WileyCDA/ oraz http://www.webassign.net/index.html). Opis jego zawartości znajduje się w Przedmowie. Studenci uczelni w USA otrzymują dostęp do materiałów po wykonaniu trzech kroków: zalogowaniu się, podaniu kodu (który otrzymali wraz zakupionym podręcznikiem lub który zakupili osobno) i podaniu URL, który uzyskali od wykładowcy.

Polscy czytelnicy mogą uzyskać dostęp do części tych udogodnień ze strony*:

http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1118230728.html

Natomiast strona

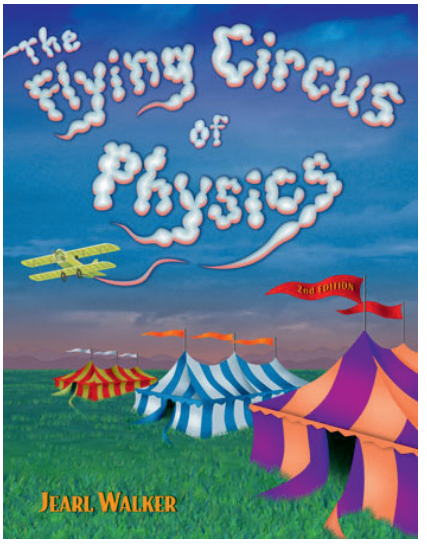
http://bcs.wiley.com/he-bcs/Books?action=index&bcsId=1074&itemId=0471320005

zawiera podobne zasoby dla szóstego wydania amerykańskiego.

*Stan na 27 lutego 2015 r. Po kliknęciu *Visit Companion Site* (w polu *Students Resources*) otwiera się strona *Students Companion Site*. Po wybraniu *Browse by Resource* jest wyświetlana lista obejmująca: symulacje (*Concept Simulations*), eseje Jearla Walkera (*Jearl Walker Essays*), instrukcje użycia kalkulatorów (*Programmable Calculator Instructions*) oraz interaktywne rozwiązania zadań (*Interactive Learning Ware*).

P R Z E D M O W A

DLACZEGO NAPISAŁEM TĘ KSIĄŻKĘ



Fizyka to wielkie wyzwanie, ale również świetna zabawa. Uprzytomniłem to sobie w pełni w dniu, gdy Sharon, jedna w moich studentek, zapytała mnie nagle: „A czy cokolwiek z tego wszystkiego ma jakiś związek z moim codziennym życiem?”. Oczywiście natychmiast odpowiedziałem: „Sharon, to wszystko ma związek z twoim codziennym życiem — taka już jest fizyka".

Poprosiła, bym wyjaśnił jej to na jakimś przykładzie. Myślałem i myślałem, i żaden dobry przykład nie przychodził mi do głowy. Wieczorem tego dnia zacząłem pisać książkę *The Flying Circus of Physics* (*Latający cyrk fizyki*, John Wiley & Sons Inc., 1975), głównie dla Sharon, ale i dla siebie, gdyż zdałem sobie sprawę, że czuję to samo, co ona. Przez sześć lat szukałem najbardziej mi odpowiadającego podręcznika fizyki. Testowałem ich dziesiątki, były dobrze napisane i oparte na najlepszych koncepcjach dydaktycznych, lecz czegoś mi w nich brakowało. Fizyka to najciekawszy na świecie przedmiot, gdyż mówi o tym, jak świat naprawdę działa. Tymczasem większość podręczników fizyki jest niemal całkiem pozbawiona informacji o związkach fizyki z otaczającym nas światem. Cała przyjemność studiowania fizyki gdzieś więc umyka.

W *Podstawach fizyki* zawarłem wiele fizyki związanej ze światem wokół nas, a także powiązałem ten podręcznik z nowym wydaniem *Latającego cyrku fizyki*. Materiał czerpałem w większości z treści moich zajęć z podstaw fizyki, podczas których mogę najlepiej poznać po wyrazie twarzy i szczerych uwagach studentów, które tematy i sposoby ich przedstawienia trafiają do słuchaczy, a które nie. Zapisywałem przypadki, w których odniosłem sukcesy, i te, w których poniosłem porażki, co mi potem pomogło zdecydować, co umieścić w tej książce. Od dość już odległego czasu, gdy spotkałem Sharon, mówię wszystkim studentom wciąż to samo: „Tak, wychodząc od podstawowych pojęć fizyki, możesz naprawdę dojść na drodze rozumowania aż do wniosków dotyczących świata, z którym stykasz się na co dzień, a dopiero zrozumienie, jak działa świat wokół nas, to prawdziwa przyjemność, jakiej dostarcza nam fizyka”.

Pisząc tę książkę, miałem wiele celów, a najważniejszym z nich było danie wykładowcom narzędzi do nauczenia studentów, jak skutecznie czytać tekst podręcznika, identyfikować podstawowe pojęcia, rozumować, zadając istotne pytania, i wreszcie rozwiązywać zagadnienia ilościowe. To nie jest proces łatwy ani dla studentów, ani dla wykładowców. Zajęcia, których podstawą będzie ta książka, mogą się okazać najtrudniejsze z odbywanych przez studenta. Mogą być też jednak najbardziej pożyteczne, gdyż dotyczą podstawowych metod poznania, jak działa świat, z których korzystają wszystkie inne nauki przyrodnicze i dziedziny techniki.

Wielu użytkowników wydania dziewiątego (zarówno wykładowców, jak i studentów) przysłało mi uwagi dotyczące podręcznika i sugestie jego ulepszenia. Te uwagi i sugestie zostały uwzględnione w tekście i zadaniach obecnego wydania. Wydawca — John Wiley & Sons — i ja traktujemy tę książkę jako projekt otwarty i zachęcamy wszystkich jej użytkowników do pisania do nas. Sugestie, poprawki oraz uwagi, pozytywne i negatywne, prosimy przysyłać na adres wydawnictwa John Wiley & Sons lub mój, Jearla Walkera: Physics Department, Cleveland State University, Cleveland, OH 44115, USA (można również skorzystać z bloga na stronie www.flyingcircusofphysics.com). Możemy nie dać rady odpowiedzieć na wszystkie listy, lecz zapoznamy się z każdym z nich.

CO JEST W KSIĄŻCE NOWEGO

Nowe podrozdziały i cele nauczania „Czego powinienem się nauczyć z tego podrozdziału?", pytali mnie zawsze studenci — nie tylko najsłabsi, najlepsi także. Rzecz w tym, że nawet dobry, myślący student może nie być pewien, czy w trakcie lektury fragmentu książki wychwycił najważniejsze zawarte tam fakty i stwierdzenia. I ja tak się czułem dawno temu, gdy na pierwszym roku studiów, ucząc się fizyki, korzystałem z pierwszego wydania podręcznika Hallidaya i Resnicka.

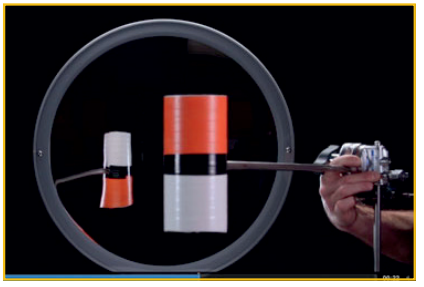
Aby pomóc w tym względzie studentom, podzieliłem na nowo rozdziały, tak by podrozdziały dotyczyły jednego podstawowego pojęcia, a na początku każdego podrozdziału dodałem listę celów nauczania. Taka lista to spis podstawowych treści nauczania i umiejętności, jakie student powinien opanować podczas lektury danego podrozdziału. Po spisie celów nauczania jest krótka informacja o podstawowych faktach, które trzeba sobie przyswoić — na przykład pierwszy podrozdział rozdziału 16, w którym student musi poznać wyjątkowo wiele nowych pojęć i terminów. Nie będzie jednak musiał sam dokonywać identyfikacji podstawowych faktów, ponieważ dostaje od autora książki spis, w istocie rzeczy podobny do listy czynności, jakie musi wykonać pilot samolotu przed skierowaniem pojazdu na pas startowy i samym startem.

Powiązanie zadań domowych z celami nauczania Pytania i zadania zamieszczone na końcu każdego rozdziału są przypisane — na platformie *WileyPLUS* — do jednego z celów nauczania, tak by od razu odpowiedzieć na pytanie (zwykle niewypowiedziane): „W jakim celu rozwiązuję to zadanie? Czego ma mnie ono nauczyć?". Jestem przekonany, że znając cel zadania, student lepiej się nauczy wykorzystywać ten cel nauczania w zadaniach o innej treści, lecz dotyczących tych samych podstawowych faktów. Powinno się w ten sposób pokonać problem wielu studentów, którzy po rozwiązaniu konkretnego zadania nie potrafią skorzystać z tych samych podstawowych faktów w zadaniach dotyczących nieco odmiennych sytuacji.

Rozdziały napisane na nowo Rok po roku moi studenci oceniali pewne ważne rozdziały oraz niektóre fragmenty innych jako szczególnie trudne. Postanowiłem więc w obecnym wydaniu dokonać w tych miejscach wielu zmian. Na przykład, znacznie zmodyfikowałem rozdziały o prawie Gaussa i potencjale elektrycznym, które sprawiały moim studentom wiele trudności. Tok wykładu jest tam teraz bardziej płynny i skupiony na podstawo-

wych faktach. W rozdziałach dotyczących fizyki kwantowej rozszerzyłem omówienie równania Schrödingera, dodając zagadnienie odbicia fal materii od stopnia potencjału. Na prośbę wielu wykładowców oddzieliłem opis modelu atomu Bohra od rozwiązania równania Schrödingera dla atomu wodoru, tak by fragment o pracach Bohra, mających już dziś tylko historyczne znaczenie, można było opuścić. Dodałem również podrozdział o promieniowaniu ciała doskonale czarnego i prawie Plancka.

Nowe przykłady oraz pytania i zadania domowe Podręcznik zawiera teraz szesnaście nowych przykładów napisanych z myślą o dodatkowym wyjaśnieniu fragmentów wykładu, które moi studenci uważali za szczególnie trudne. Do zebranych w końcowych częściach rozdziałów pytań i zadań domowych dodano łącznie 250 zadań i 50 pytań. Niektóre z nich przywrócono z poprzednich wydań książki, o co prosiło wielu wykładowców.

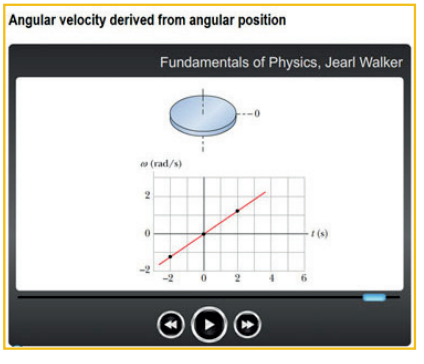


Ilustracje wideo W wersji elektronicznej podręcznika, dostępnej na platformie *WileyPLUS*, można znaleźć około 30 rysunków i fotografii z książki, przygotowanych w wersji wideo przez Davida Maiullo z Rutgers University. Fizyka dotyczy bardzo często ruchu różnych obiektów — film pokazuje w takich przypadkach znacznie więcej niż statyczny rysunek lub fotografia.

Pomoc online Platforma *WileyPLUS* zawiera nie tylko program do oceniania studentów online. Jest to dynamiczne centrum kształcenia, gdzie można znaleźć między innymi szczegółowe omówienie rozwiązań wielu zadań, quizy sprawdzające zrozumienie studiowanego materiału, animacje, setki przykładów, wiele symulacji i pokazów oraz ponad 1500 filmów, których tematy obejmują przegląd niezbędnych zagadnień matematycznych po miniwykłady dotyczące przykładów z podręcznika. Wiele nowych elementów tej pomocy online pojawia się na platformie *WileyPLUS* co semestr. W ramach przygotowania niniejszego 10. wydania podręcznika wiele fotografii dotyczących ruchu ciał zastąpiono filmami, dzięki czemu ruch można spowolnić, by analizować go szczegółowo.

Tysiące takich elementów pomocy online jest dostępnych w trybie 24/7, a korzystać z nich można powielokroć — tyle razy, ile tylko potrzeba. Jeśli więc na przykład student popadnie w kłopoty przy rozwiązaniu zadania domowego o godzinie 2 w nocy (co jest chyba typową godziną odrabiania przez studentów pracy domowej), to za pomocą jednego kliknięcia myszą będzie mógł skorzystać z przyjaznej pomocy online.

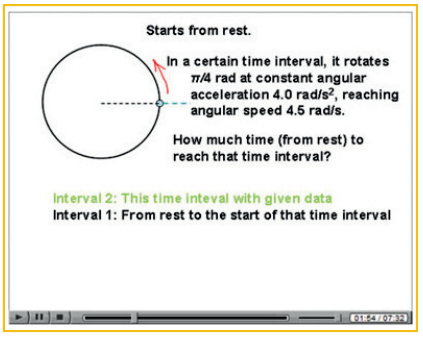
NARZĘDZIA DYDAKTYCZNE



Gdy sam studiowałem fizykę, korzystając z pierwszego wydania podręcznika Hallidaya i Resnicka, musiałem ten sam rozdział czytać wiele razy, by go dobrze zrozumieć. Dziś lepiej zdajemy sobie sprawę z tego, że różni studenci uczą się wydajnie w bardzo różny sposób. Przygotowałem więc dla nich różnego rodzaju narzędzia dydaktyczne zawarte teraz w nowym wydaniu podręcznika oraz na platformie *WileyPLUS*. Są to:

Animacje kluczowych ilustracji z każdego rozdziału. W tekście książki są one oznaczone ikonką wiru. W wersji elektronicznej rozdziału, na platformie *WileyPLUS*, kliknięcie myszką uruchamia animację. Wybrałem ilustracje, które zawierają wiele informacji, tak by student zyskiwał możliwie

dużo, obserwując przez minutę lub dwie fizykę w działaniu, a nie tylko rysunek w podręczniku. Student poznaje w ten sposób dynamikę zjawisk fizycznych, przy czym oczywiście animację może sobie powtarzać, ile razy chce.



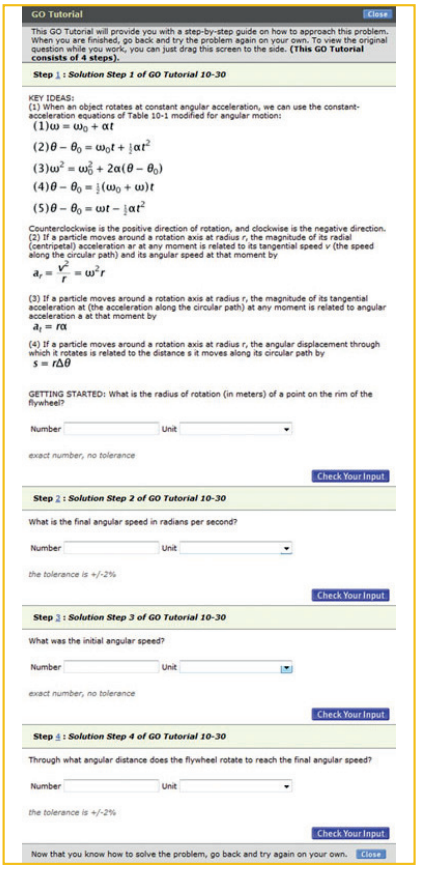
Filmy Nagrałem już ponad 1500 krótkich filmów (a co semestr powstają nowe). Odtwarzając taki film, student widzi, co rysuję lub piszę, słysząc jednocześnie, jak omawiam jakieś zagadnienie, tak jakby siedział przy mnie w gabinecie, a ja — mówiąc do niego — pisałbym lub rysował coś na kartce papieru. Oczywiście bezpośredni kontakt z wykładowcą (na wykładzie, ćwiczeniach czy konsultacjach) pozostanie zawsze najlepszą z metod dydaktycznych, ale moje filmy wideo też mają swoje zalety — są dostępne 24 godziny na dobę przez 7 dni w tygodniu i można je oglądać dowolnie wiele razy. Oto różne rodzaje tych filmów:

- **Ponowne omówienie treści niektórych rozdziałów** (jak na konsultacjach). Skupiłem się na tematach, które sprawiają studentom najwięcej trudności, czyli na tych, przy których moi studenci najczęściej drapali się w głowę.
- **Przypomnienie matematyki ze szkoły średniej**, między innymi podstawowe operacje algebraiczne, funkcje trygonometryczne oraz układy równań.
- **Nowe zagadnienia matematyczne**, na przykład mnożenie wektorów.
- **Omówienie każdego przykładu z podręcznika**. Podobnie jak w tekście książki, nie rozglądam się po prostu za wzorem, z którego dałoby się skorzystać, lecz badam fizyczną treść zagadnienia, wychodząc od podstawowych faktów dotyczących zadania. Staram się też pokazać, jak wykorzystać przykłady z książki do poznania typowych metod rozwiązywania zadań, które będzie można później zastosować w innych — być może całkiem odmiennych — zadaniach.
- **Rozwiązania 20% zadań domowych zamieszczonych na końcu rozdziałów**. Dostępność tych rozwiązań zależy od decyzji wykładowcy. Może on na przykład postanowić, by były one widoczne dla studentów dopiero po oddaniu pracy domowej lub rozwiązaniu quizu. Rozwiązania nie mają postaci prostych, rutynowych recept. Jak przy przykładach, wychodzimy od podstawowych faktów i na drodze logicznego rozumowania docieramy do końcowej odpowiedzi. Student poznaje nie tylko rozwiązanie konkretnego zadania, lecz także metody radzenia sobie z dowolnymi zadaniami, nawet całkiem niestandardowymi.
- **Przykłady, jak mądrze korzystać z wykresów** (a nie tylko odczytywać z nich liczby bez zrozumienia fizyki zagadnienia).

Pomoc do zadań Na platformie *WileyPLUS* można znaleźć wiele narzędzi, które opracowałem w celu ułatwienia studentom nabycia umiejętności rozwiązywania zadań. Oto one:

- **Każdy przykład z podręcznika** jest dostępny online zarówno w formacie tekstu z książki, jak i w formacie wideo.
- **Setki dodatkowych przykładów**. Są one dostępne jako osobne pozycje, lecz wykładowcy mają możliwość umieszczenia linków do nich przy zadaniach domowych. Jeśli na przykład zadanie domowe dotyczy klocka na

równi pochyłej, to link kieruje studenta do przykładu związanego z tym zagadnieniem. Przykład nie jest jednak po prostu kopią zadania, a zatem jego rozwiązanie nie nadaje się do wykorzystania bez zrozumienia (czyli nie można go skopiować i przedstawić jako rozwiązanie zadania domowego).



- **Tutoriale GO** do 15% zadań zamieszczonych na końcu rozdziałów podręcznika. Są to interaktywne rozwiązania zadań, w których pomagam studentowi przebyć w kilku krokach drogę od podstawowych faktów do końcowej odpowiedzi. W każdym kroku student odpowiada na pytanie. Jeśli odpowiedź jest prawidłowa, przechodzi do następnego kroku, a jeśli nie, dostaje dodatkową wskazówkę. Dopiero w ostatnim kroku (prowadzącym do końcowej odpowiedzi) student nie dostaje żadnej podpowiedzi. Zrobiłem to celowo, by na końcu zadania student ponosił całkowitą odpowiedzialność za swoje decyzje. Czasami zadania interaktywne wyprowadzają rozwiązującego w pole, gdy udziela niepoprawnych odpowiedzi, co bywa źródłem frustracji studenta. Moje tutoriale GO to nie pułapki, gdyż w każdej chwili student może wrócić do początku zadania.
- **Wskazówki do wszystkich zadań domowych** są dostępne, lecz ich ujawnienie studentom zależy od decyzji wykładowcy. Są to prawdziwe wskazówki, które dotyczą podstawowych faktów i ogólnej metody rozwiązania, a nie przepisy, jak udzielić prawidłowej odpowiedzi bez zrozumienia, dlaczego jest właśnie taka.

Ocena postępów studenta

- **Pytania dotyczące zawartości rozdziału**. Gdy student otwiera rozdział wersji elektronicznej, na końcu tego rozdziału pojawia się pytanie dotyczące jego zawartości, wybrane losowo z zestawu przygotowanych uprzednio pytań. Sformułowałem je tak, by do podania odpowiedzi nie była potrzebna żadna analiza ani nawet głębsze zrozumienie treści — chodzi tylko o to, by sprawdzić, czy student istotnie przeczytał dany rozdział. Wykładowcy pozostawiono decyzję o tym, czy odpowiedź studenta będzie elementem jego oceny, czy tylko informacją dla czytającego.
- **Większość rozdziałów zawiera sprawdziany**. Są one tak pomyślane, by wymagały pewnej analizy i decyzji studenta co do treści fizycznej rozdziału. *Na końcu książki można znaleźć odpowiedzi do wszystkich sprawdzianów*.

Sprawdzian 1

- **Na platformie *WileyPLUS* są wszystkie zadania domowe** z podręcznika (a nawet wiele więcej). Wykładowca może wybrać dla studentów zadania domowe, polecić, by zostały przesłane przez sieć, i oceniać je w *WileyPLUS*. Może na przykład ustalić termin złożenia rozwiązań i pozwolić składać je ograniczoną liczbę razy. Wykładowca może też zdecydować, jakie narzędzia dydaktyczne związane z danym zadaniem domowym zostaną ujawnione studentom — wskazówki, przykłady, omówienie treści rozdziału, rozwiązania interaktywne, powtórzenia podstaw matematycznych, a nawet rozwiązania w postaci wideo. Te ostatnie może udostępnić studentom na przykład po terminie oddania pracy domowej.

- **Rozwiązania symboliczne**. Każdy rozdział zawiera też zadania, w których odpowiedź nie jest liczbowa, lecz ma postać wyrażenia algebraicznego.
- **Na platformie *WileyPLUS* są również dostępne wszystkie pytania** z końcowych części rozdziałów. Mają one postać pytań wielokrotnego wyboru i służą do oceny zrozumienia przez studenta pojęciowej zawartości rozdziału.

Ikony pomocy dodatkowej Do niektórych zadań o numerach nieparzystych są dostępne szczegółowe rozwiązania w postaci drukowanej lub elektronicznej. Przy numerze takiego zadania jest umieszczona ikonka (SSM lub WWW) informująca o tym studenta i wykładowcę. Inne ikonki informują o istnieniu dla danego zadania tutoriala GO, rozwiązania interaktywnego w programie Interactive LearningWare oraz powiązania z książką *Latający cyrk fizyki*. Na początku listy zadań w każdym rozdziale jest umieszczona legenda wyjaśniająca znaczenie wszystkich ikonek przy numerach zadań.

GO	Zadania z rozwiązaniami interaktywnymi, udostępnianymi studentom według uznania wykładowcy, znajdują się na stronach *WileyPLUS* (https://www.wileyplus.com/WileyCDA/) oraz WebAssign (http://www.webassign.net/index.html)
●–●●●	Liczba kropek określa stopień trudności zadania
ssm	Szczegółowe rozwiązanie jest dostępne w *Student Solutions Manual*
www	Szczegółowe rozwiązanie znajdziesz na stronie http://www.wiley.com/college/halliday
ilw	Rozwiązanie interaktywne znajdziesz na stronie http://www.wiley.com/college/halliday
	Więcej informacji znajdziesz w książce *The Flying Circus of Physics* i na stronie http://flyingcircusofphysics.com

WERSJE PODRĘCZNIKA*

W celu zaspokojenia indywidualnych potrzeb wykładowców i studentów, dziesiąte wydane *Podstaw fizyki* jest dostępne w kilku wersjach.

Wydanie podstawowe zawiera rozdziały 1–37 (ISBN 9781118230718).

Wydanie rozszerzone zawiera ponadto siedem dodatkowych rozdziałów o fizyce kwantowej i kosmologii, czyli łącznie rozdziały 1–44 (ISBN 9781118230725).

Wydanie dwutomowe: tom 1 — rozdziały 1–20 (mechanika i termodynamika), oprawa twarda, ISBN 9781118233764; tom 2 — rozdziały 21–44 (elektryczność i magnetyzm, optyka oraz fizyka kwantowa), oprawa twarda, ISBN 9781118230732.

MATERIAŁY DODATKOWE DLA WYKŁADOWCÓW

Instructor's Solutions Manual (Zbiór rozwiązań dla wykładowcy), autor: Sen-Ben Liao, Lawrence Livermore National Laboratory. W zbiorze tym podano szczegółowe rozwiązania wszystkich zadań zebranych na końcu poszczególnych rozdziałów. Są one dostępne w formacie MSWord i PDF.

Strona wykładowcy http://www.wiley.com/college/halliday

*Polskie wydanie jest tłumaczeniem wydania rozszerzonego (przyp. red.).

- **Instructor's Manual** (Poradnik wykładowcy). Zawiera wyjaśnienia najważniejszych zagadnień z każdego rozdziału, pokazy doświadczeń, projekty doświadczalne i komputerowe, opis filmów i narzędzi, odpowiedzi do wszystkich pytań, zadań i sprawdzianów, przewodnik do zadań z poprzednich wydań podręcznika oraz spis wszystkich zadań, których rozwiązania są dostępne dla studentów (SSM, WWW i ILW).
- **Prezentacje w formacie PowerPoint**. Użyteczna pomoc dla nowych wykładowców — zawiera spis głównych pojęć oraz rysunki i wzory z każdego rozdziału.
- **System badania reakcji sali („clicker")**, autor pytań: David Marx, Illinois State University. Zawiera on: quiz z prostymi pytaniami do sprawdzenia, czy studenci przeczytali wyznaczony fragment podręcznika, oraz zbiór pytań przeznaczonych na zajęcia prowadzone w trybie wykładu interaktywnego.
- **Wiley Physics Simulations**, autorzy: Andrew Duffy, Boston University, oraz John Gastineau, Vernier Software. Jest to zbiór 50 symulacji interaktywnych (appletów Javy) do wykorzystania w ramach pokazów wykładowych.
- **Wiley Physics Demonstrations**, autor: David Maiullo, Rutgers University. Zbiór cyfrowych filmów, na których przedstawiono 80 standardowych pokazów fizycznych. Można je pokazać na wykładzie, są też udostępnione na platformie *WileyPLUS*. Towarzyszy mu instrukcja dla wykładowcy, zawierająca też pytania typu „clicker".
- **Test Bank** (bank testów) do 10. wydania książki, gruntownie przebudowany przez Suzanne Willis, Northern Illinois University. Zawiera ponad 2200 pytań testowych wielokrotnego wyboru. Są one także dostępne w komputerowym banku testów, umożliwiającym wykładowcy tworzenie własnych zestawów pytań testowych (w wersjach dla komputerów IBM oraz Macintosh).
- **Wszystkie ilustracje z podręcznika** przygotowane do wyświetlenia na wykładzie oraz wydrukowania.

Ocena online prac domowych i quizów Dziesiąte wydanie *Podstaw fizyki* może być używane nie tylko przy wykorzystaniu platformy *WileyPLUS*, lecz również platform WebAssignPLUS oraz LON-CAPA, które także umożliwiają wykładowcy zadawanie i ocenianie online prac domowych i quizów. Na platformie WebAssignPLUS studenci mają także dostęp do elektronicznej wersji podręcznika.

MATERIAŁY DODATKOWE DLA STUDENTÓW

Strona studenta, http://www.wiley.com/college/halliday, została opracowana specjalnie dla użytkowników 10. wydania *Podstaw fizyki*, aby zapewnić studentom dodatkową pomoc w studiowaniu fizyki. Zawiera rozwiązania wybranych zadań z końcowych części rozdziałów (oznaczonych ikonką WWW), ćwiczenia symulacyjne, porady dla użytkowników kalkulatorów programowalnych, a także rozwiązania interaktywne z wykorzystaniem programu Interactive LearningWare (patrz niżej).

Student Study Guide (*Poradnik studenta*), autor: Thomas Barrett, Ohio State University, ISBN 9781118230787. Zawiera przegląd najważniejszych pojęć z poszczególnych rozdziałów, opis metod rozwiązywania zadań oraz szczegółowe przykłady.

Student Solutions Manual (*Zbiór rozwiązań dla studenta*), autor: Sen-Ben Liao, Lawrence Livermore National Laboratory, ISBN 9781118230664. Zawiera szczegółowe rozwiązania 15% zadań zebranych w końcowych częściach rozdziałów podręcznika. Został on napisany dla 10. wydania HRW z wykorzystaniem nowatorskiej metody TEAL (Think, Express, Analyze, and Learn — Myśl, Wyrażaj, Analizuj, Poznawaj). Powstała ona i została rozwinięta na uczelni Massachusetts Institute of Technology, gdzie sprawdziła się jako wydajna metoda kształcenia studentów. Zadania rozwiązane z wykorzystaniem tej metody są oznaczone w podręczniku ikonką SSM.

Interactive Learning Ware to oprogramowanie umożliwiające studentowi rozwiązanie 200 zadań z podręcznika. Odbywa się to interaktywnie, tzn. w kolejnych krokach student udziela odpowiedzi, a w przypadku odpowiedzi niepoprawnych uzyskuje pomoc w postaci informacji o typowych błędach. Zadania, które można rozwiązać w ten sposób, są oznaczone ikonką ILW.

Introductory Physics with Calculus as a Second Language *Mastering Problem Solving* (*Wstęp do fizyki dla studentów poznających również rachunek różniczkowy i całkowy: Mistrzowskie rozwiązywanie zadań*), autor: Thomas Barrett, Ohio State University, ISBN 9780471739104. Celem tej małej książeczki jest nauczenie studentów, jak wydajnie i skutecznie rozwiązywać zadania. Student nauczy się z niej rozpoznawania typowej struktury zadań z fizyki, dzielenia ich na dające się opanować etapy i stosowania odpowiednich metod. Książka zawiera również wiele zadań rozwiązanych krok po kroku.

P O D Z I Ę K O W A N I A

Na końcowy kształt podręcznika miało wpływ bardzo wiele osób. Sen-Ben Liao z Lawrence Livermore National Laboratory, James Whitenton z Southern Polytechnic State University i Jerry Shi z Pasadena City College podjęli i wykonali herkulesowe zadanie przygotowania rozwiązań wszystkich zadań z podręcznika. W wydawnictwie John Wiley głównymi redaktorami podręcznika byli Stuart Johnson, Geraldine Osnato i Aly Rentrop, którzy nadzorowali cały projekt od początku do końca. Dziękujemy Elizabeth Swain, redaktorowi do spraw produkcji, za koordynację różnych elementów złożonego procesu produkcji książki. Dziękujemy Maddy Lesure za projekt graficzny książki i okładki, Lee Goldstein za projekt układu strony, Helen Walden za redakcję tekstu, a Lilian Brady za korektę składu. Jennifer Atkins z zapałem wyszukiwała ciekawe i niezwykłe zdjęcia. Wydawnictwo John Wiley & Sons, Inc. oraz Jearl Walker są wdzięczni wielu osobom za uwagi i propozycje dotyczące poprzednich wydań podręcznika. Oto te osoby:

Jonathan Abramson, *Portland State University*; Omar Adawi, *Parkland College*; Edward Adelson, *The Ohio State University*; Steven R. Baker, *Naval Postgraduate School*; George Caplan, *Wellesley College*; Richard Kass, *The Ohio State University*; M.R. Khoshbin-e-Khoshnazar, *Research Institution for Curriculum Development & Educational Innovations* (*Tehran*); Craig Kletzing, *University of Iowa*; Stuart Loucks, *American River College*; Laurence Lurio, *Northern Illinois University*; Ponn Maheswaranathan, *Winthrop University*; Joe McCullough, *Cabrillo College*; Carl E. Mungan, *U.S. Naval Academy*; Don N. Page, *University of Alberta*; Elie Riachi, *Fort Scott Community College*; Andrew G. Rinzler, *University of Florida*; Dubravka Rupnik, *Louisiana State University*; Robert Schabinger, *Rutgers University*; Ruth Schwartz, *Milwaukee School of Engineering*; Carol Strong, *University of Alabama at Huntsville*; Nora Thornber, *Raritan Valley Community College*; Frank Wang, *LaGuardia Community College*; Graham W. Wilson, *University of Kansas*; Roland Winkler, *Northern Illinois University*; William Zacharias, *Cleveland State University*; Ulrich Zurcher, *Cleveland State University*.

Na zakończenie chcemy podkreślić, że dysponowaliśmy znakomitym zespołem opiniodawców, i pragniemy wyrazić wdzięczność i podziękowanie każdemu z nich. Oto oni:

Maris A. Abolins, *Michigan State University*
Edward Adelson, *Ohio State University*
Nural Akchurin, *Texas Tech*
Yildirim Aktas, *University of North Carolina–Charlotte*
Barbara Andereck, *Ohio Wesleyan University*
Tetyana Antimirova, *Ryerson University*
Mark Arnett, *Kirkwood Community College*
Arun Bansil, *Northeastern University*
Richard Barber, *Santa Clara University*
Neil Basecu, *Westchester Community College*
Anand Batra, *Howard University*
Kenneth Bolland, *The Ohio State University*
Richard Bone, *Florida International University*
Michael E. Browne, *University of Idaho*
Timothy J. Burns, *Leeward Community College*
Joseph Buschi, *Manhattan College*
Philip A. Casabella, *Rensselaer Polytechnic Institute*
Randall Caton, *Christopher Newport College*
Roger Clapp, *University of South Florida*
W. R. Conkie, *Queen's University*
Renate Crawford, *University of Massachusetts–Dartmouth*
Mike Crivello, *San Diego State University*
Robert N. Davie, Jr., *St. Petersburg Junior College*
Cheryl K. Dellai, *Glendale Community College*
Eric R. Dietz, *California State University at Chico*
N. John DiNardo, *Drexel University*
Eugene Dunnam, *University of Florida*
Robert Endorf, *University of Cincinnati*
F. Paul Esposito, *University of Cincinnati*
Jerry Finkelstein, *San Jose State University*
Robert H. Good, *California State University–Hayward*
Michael Gorman, *University of Houston*
Benjamin Grinstein, *University of California, San Diego*
John B. Gruber, *San Jose State University*
Ann Hanks, *American River College*
Randy Harris, *University of California–Davis*

Samuel Harris, *Purdue University*
Harold B. Hart, *Western Illinois University*
Rebecca Hartzler, *Seattle Central Community College*
John Hubisz, *North Carolina State University*
Joey Huston, *Michigan State University*
David Ingram, *Ohio University*
Shawn Jackson, *University of Tulsa*
Hector Jimenez, *University of Puerto Rico*
Sudhakar B. Joshi, *York University*
Leonard M. Kahn, *University of Rhode Island*
Sudipa Kirtley, *Rose–Hulman Institute*
Leonard Kleinman, *University of Texas at Austin*
Craig Kletzing, *University of Iowa*
Peter F. Koehler, *University of Pittsburgh*
Arthur Z. Kovacs, *Rochester Institute of Technology*
Kenneth Krane, *Oregon State University*
Hadley Lawler, *Vanderbilt University*
Priscilla Laws, *Dickinson College*
Edbertho Leal, *Polytechnic University of Puerto Rico*
Vern Lindberg, *Rochester Institute of Technology*
Peter Loly, *University of Manitoba*
James MacLaren, *Tulane University*
Andreas Mandelis, *University of Toronto*
Robert R. Marchini, *Memphis State University*
Andrea Markelz, *University at Buffalo, SUNY*
Paul Marquard, *Caspar College*
David Marx, *Illinois State University*
Dan Mazilu, *Washington and Lee University*
James H. McGuire, *Tulane University*
David M. McKinstry, *Eastern Washington University*
Jordon Morelli, *Queen's University*
Eugene Mosca, *United States Naval Academy*
Eric R. Murray, *Georgia Institute of Technology, School of Physics*
James Napolitano, *Rensselaer Polytechnic Institute*
Blaine Norum, *University of Virginia*
Michael O'Shea, *Kansas State University*
Patrick Papin, *San Diego State University*
Kiumars Parvin, *San Jose State University*
Robert Pelcovits, *Brown University*
Oren P. Quist, *South Dakota State University*
Joe Redish, *University of Maryland*
Timothy M. Ritter, *University of North Carolina at Pembroke*
Dan Styer, *Oberlin College*
Frank Wang, *LaGuardia Community College*
Robert Webb, *Texas A&M University*
Suzanne Willis, *Northern Illinois University*
Shannon Willoughby, *Montana State University*

ROZDZIAŁ 1

Pomiar

1.1. JAK SIĘ MIERZY RÓŻNE RZECZY, NA PRZYKŁAD DŁUGOŚĆ?

Czego się nauczysz?

Po przestudiowaniu tego podrozdziału będziesz umiał...

1.01 podać wielkości podstawowe układu SI;

1.02 nazwać najczęściej stosowane przedrostki jednostek układu SI;

1.03 zamieniać jednostki (na początek: długości, pola powierzchni i objętości), stosując współczynniki przeliczeniowe;

1.04 wyjaśnić, że metr jest zdefiniowany na podstawie wartości prędkości światła w próżni.

Podstawowe fakty

- Fizyka opiera się na pomiarach wielkości fizycznych. Niektóre z tych wielkości obrano za wielkości podstawowe (między innymi długość, czas i masę). Definiujemy je, wykorzystując ich wzorce, i ustalamy ich jednostki (na przykład metr, sekundę i kilogram). Inne wielkości fizyczne definiujemy za pomocą wielkości podstawowych oraz ich wzorców i jednostek.

- W tej książce najczęściej będziemy stosować Międzynarodowy Układ Jednostek (układ SI). Trzy wielkości fizyczne, które będą nam najbardziej przydatne w pierwszych rozdziałach podręcznika, zebrano w tabeli 1.1. Wzorce tych wielkości podstawowych, które muszą być łatwo dostępne i niezmienne, wybrano w drodze uzgodnień międzynarodowych. Wzorce te wykorzystuje się we wszystkich pomiarach fizycznych, dotyczących zarówno wielkości podstawowych, jak i wielkości przez nie wyrażonych. Zapis wyników pomiarów upraszczamy, stosując potęgi liczby 10 i przedrostki z tabeli 1.2.

- Zamiany jednostek dokonujemy za pomocą współczynników przeliczeniowych, mnożąc je kolejno przez siebie — każdy z tych współczynników jest równy jedności, a stosujemy ich tak wiele, jak wiele potrzeba do otrzymania pożądanej jednostki.

- Metr jest zdefiniowany jako droga przebyta przez światło w dokładnie określonym przedziale czasu.

O fizyce

Nauka i technika opiera się na pomiarach i porównaniu ich wyników. Musimy więc ustalić zasady, zgodnie z którymi wykonujemy te pomiary i porównania, oraz wyznaczyć jednostki, które są przy tym niezbędne. Jednym z celów fizyki (i techniki) jest projektowanie i wykonywanie doświadczeń porównawczych.

Fizycy starają się na przykład zbudować zegary o najwyższej dokładności, tak by każdy pomiar czasu lub przedziału czasu można było wykonać możliwie precyzyjnie i porównać z wynikami innych pomiarów. Może się zastanawiasz, czy trud uzyskania tak dużej dokładności pomiaru czasu jest istotnie potrzebny. Otóż jest, a jedną z tego przyczyn jest fakt, że bez skrajnie dokładnych zegarów nie dało by się z powodzeniem używać systemu nawigacji satelitarnej GPS, tak szeroko dziś stosowanego na całym świecie.

Jak się mierzy różne rzeczy?

Poznajemy fizykę, ucząc się mierzyć różne wielkości fizyczne. Są to między innymi: długość, czas, masa, temperatura, ciśnienie i natężenie prądu elektrycznego.

Każdą wielkość fizyczną mierzymy w jej jednostkach, porównując mierzoną wielkość ze **wzorcem**. **Jednostka** to nazwa miary danej wielkości — na przykład jednostką długości jest metr (oznaczenie: m). Wzorzec zawiera dokładnie jedną (1,0) jednostkę wielkości. Jak dowiesz się niebawem, wzorzec metra, którego długość wynosi dokładnie 1,0 m, to droga przebyta przez światło w próżni w pewnym określonym ułamku sekundy. Jednostkę i jej wzorzec możemy wybrać, jak nam się tylko podoba. Dobrze jednak zrobić to tak, aby wszyscy naukowcy zgadzali się, że jest to wybór rozsądny i użyteczny.

Gdy już wybierzemy wzorzec, powiedzmy długości, musimy uzgodnić metody porównywania z nim wszelkich możliwych długości — promienia atomu wodoru, rozstawu osi deskorolki czy odległości gwiazdy od Ziemi. Jedną z takich metod może być użycie linijki, stanowiącej w przybliżeniu wzorzec długości. Jednak często musimy korzystać z metod pośrednich. Za pomocą linijki nie da się zmierzyć na przykład promienia atomu czy odległości do gwiazdy.

Jednostki podstawowe. Wielkości fizycznych jest tak wiele, że musimy je jakoś uporządkować. Na szczęście, nie wszystkie są niezależne od siebie — na przykład prędkość to stosunek długości do czasu. Można więc wybrać — na mocy umowy międzynarodowej — niezbyt dużą liczbę wielkości fizycznych, między innymi długość i czas, i tylko dla nich ustalić wzorce, a wszystkie inne wielkości fizyczne wyrażać przez te *wielkości podstawowe* i ich wzorce (*wzorce wielkości podstawowych*). Na przykład prędkość wyrażamy przez długość i czas, stosując przy tym wzorce wielkości podstawowych.

Wzorce wielkości podstawowych powinny być łatwo dostępne i niezmienne. Jeśli za wzorzec długości przyjmiemy odległość nosa od palca wskazującego wyciągniętej ręki, to będzie to z pewnością wzorzec łatwo dostępny dla każdego, ale oczywiście jego wartość będzie inna dla różnych osób. Pomiary w nauce i technice wymagają coraz większej dokładności, dlatego też bardzo istotna jest niezmienność wzorca. Wiele wysiłku wkłada się w to, aby kopie wzorców podstawowych były dostępne dla każdego, kto ich potrzebuje.

Międzynarodowy Układ Jednostek

W roku 1971, na XIV Konferencji Ogólnej ds. Miar i Wag dokonano wyboru siedmiu podstawowych wielkości fizycznych, tworząc w ten sposób Międzynarodowy Układ Jednostek, nazywany *układem SI*, od skrótu jego nazwy w języku francuskim. W tabeli 1.1 podano nazwy jednostek długości, masy i czasu — trzech wielkości podstawowych, którymi będziemy się zajmować w początkowych rozdziałach podręcznika. Jednostki te zdefiniowano tak, aby ich wartości były bliskie pojęcia większości ludzi.

Tabela 1.1. Niektóre jednostki podstawowe SI

Wielkość	Nazwa jednostki	Symbol jednostki
długość	metr	m
czas	sekunda	s
masa	kilogram	kg

Za pomocą tych jednostek podstawowych definiujemy wiele *jednostek pochodnych* układu SI. Na przykład jednostkę mocy w układzie SI, czyli

wat (symbol W), wyrażamy przez jednostki podstawowe masy, długości i czasu. Jak przekonasz się w rozdziale 7

$$1 \text{ wat} = 1 \text{ W} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3. \tag{1.1}$$

Kombinację jednostek po prawej stronie tej równości odczytujemy jako kilogram razy metr kwadrat na sekundę do sześcianu.

Do zapisu wielkości bardzo dużych i bardzo małych, z którymi w fizyce mamy często do czynienia, stosujemy zapis w postaci iloczynu liczby z przedziału między 0 a 10 i odpowiedniej potęgi 10. W tym zapisie

$$3\,560\,000\,000 \text{ m} = 3{,}56 \cdot 10^9 \text{ m}, \tag{1.2}$$

a

$$0{,}000\,000\,492 \text{ s} = 4{,}92 \cdot 10^{-7} \text{ s}. \tag{1.3}$$

Na komputerze nieraz zapisywane jest to w skrócie, jako 3,56 E9 oraz 4,92 E−7, gdzie E oznacza „wykładnik potęgi o podstawie 10”. Na kalkulatorach spotykamy postać jeszcze bardziej skróconą, w której E zastąpione jest spacją.

Innym wygodnym sposobem zapisu wielkości bardzo dużych i bardzo małych jest zastosowanie przedrostków podanych w tabeli 1.2. Jak widać, dodanie do jednostki określonego przedrostka daje jednostkę różniącą się od jednostki głównej o czynnik będący pewną potęgą liczby 10. Na przykład pewną wartość mocy możemy wyrazić jako

$$1{,}27 \cdot 10^9 \text{ wata} = 1{,}27 \text{ gigawata} = 1{,}27 \text{ GW}, \tag{1.4}$$

a pewien odstęp czasu jako

$$2{,}35 \cdot 10^{-9} \text{ sekundy} = 2{,}35 \text{ nanosekundy} = 2{,}35 \text{ ns}. \tag{1.5}$$

Niektóre z tych jednostek, na przykład mililitr, centymetr, kilogram czy megabajt są już wam zapewne dobrze znane.

Tabela 1.2. Nazwy przedrostków jednostek SI

Czynnik	Przedrostek[1]	Symbol
10^{24}	jotta	Y
10^{21}	zetta	Z
10^{18}	eksa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^{9}	**giga**	**G**
10^{6}	**mega**	**M**
10^{3}	**kilo**	**k**
10^{2}	hekto	h
10^{1}	deka	da
10^{-1}	decy	d
10^{-2}	**centy**	**c**
10^{-3}	**mili**	**m**
10^{-6}	**mikro**	**μ**
10^{-9}	**nano**	**n**
10^{-12}	**piko**	**p**
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a
10^{-21}	zepto	z
10^{-24}	jokto	y

[1] Przedrostki najczęściej używane oznaczono tłustym drukiem.

Zamiana jednostek

Często musimy dokonać zamiany jednostek, w których wyrażona jest jakaś wielkość fizyczna. W tym celu mnożymy wynik pomiaru przez **współczynnik przeliczeniowy**, czyli równy jedności stosunek wielkości wyrażonej w różnych jednostkach. Na przykład 1 minuta i 60 sekund to takie same odstępy czasu, a więc otrzymujemy:

$$\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1 \qquad \text{i} \qquad \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 1.$$

Stosunki (1 min)/(60 s) i (60 s)/(1 min) mogą służyć więc za współczynniki przeliczeniowe. *Nie wolno* oczywiście napisać: $1/60 = 1$, ani $60 = 1$ — *liczba jednostek* musi zawsze występować łącznie z *jednostką*.

Mnożenie dowolnej wielkości przez jedność nie zmienia tej wielkości, dlatego współczynniki przeliczeniowe możemy wstawiać w dowolne miejsca. Przy zamianie jednostek korzystamy z nich w celu wyeliminowania pewnych jednostek. Na przykład, aby zamienić 2 minuty na sekundy postępujemy w następujący sposób:

$$2 \text{ min} = (2 \text{ min})(1) = (2 \cancel{\text{min}}) \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \cancel{\text{min}}} \right) = 120 \text{ s}. \tag{1.6}$$

Jeśli po wprowadzeniu współczynnika przeliczeniowego *nie uzyskujesz* skrócenia jednostek, które chciałeś wyeliminować, to spróbuj użyć jego odwrotności. Przy zamianie jednostek ich symbole podlegają takim samym prawom algebry, jak zmienne i liczby.

Współczynniki przeliczeniowe między jednostkami SI i jednostkami innych układów podane są w dodatku D i na wewnętrznej stronie tylnej okładki. Jednak podano je tam nie w wyżej omówionej postaci stosunków, lecz równości, np. 1 min = 60 s. W konkretnym przypadku musisz więc sam zdecydować, co wolisz mieć w liczniku, a co w mianowniku.

Długość

W roku 1792 w nowo powstałej Republice Francuskiej ustanowiono nowy układ miar i wag — *układ metryczny*. Jego kamieniem węgielnym był metr, zdefiniowany jako jedna dziesięciomilionowa część odległości od bieguna północnego do równika. Później, ze względów praktycznych, wzorzec ten związany z wymiarami Ziemi zarzucono, a metr określono jako odległość między dwiema rysami wygrawerowanymi blisko końców pręta z platyny i irydu — **wzorca metra**, przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar i Wag pod Paryżem. Dokładne kopie tego wzorca rozesłano do biur wzorców na całym świecie. Na podstawie **wzorców wtórnych** sporządzano wzorce jeszcze bardziej powszechne, tak że w rezultacie każdy układ pomiarowy powiązany był ze wzorcem pierwotnym za pośrednictwem złożonej procedury porównawczej.

Wraz z upływem czasu rozwój nauki i techniki doprowadził do sytuacji, w której niezbędne stało się ustalenie wzorca dokładniejszego od odstępu dwóch rys na metalowym pręcie. W roku 1960 przyjęto nowy wzorzec metra, związany z długością fali światła. Dokładnie rzecz biorąc, wzorzec metra zdefiniowano jako 1 650 763,73 długości fali wybranej pomarańczowoczerwonej linii wysyłanej przez atomy kryptonu-86 (tzn. określonego izotopu tego pierwiastka) podczas wyładowania w gazie. Tak dziwna liczba długości fali została przyjęta po to, aby nowy wzorzec był bliski starego wzorca z metalu.

Jednakże, w roku 1983 stwierdzono, że nawet wzorzec kryptonowy nie może już sprostać wzrastającym wymaganiom dotyczącym dokładności pomiarów i zdecydowano się na krok radykalny. Metr został zdefiniowany jako droga, którą przebywa światło w ustalonym czasie. Podczas XVII Konferencji Ogólnej ds. Miar i Wag przyjęto, że:

Metr jest długością drogi, którą przebywa światło w próżni w czasie 1/299 792 458 sekundy.

Ten przedział czasu został tak ustalony, aby prędkość światła c była równa dokładnie

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}.$$

Pomiary prędkości światła stały się już wówczas tak bardzo dokładne, że można było przyjąć wartość prędkości światła jako stałą definicyjną i użyć jej do określenia wzorca metra.

W tabeli 1.3 podano różne typowe wartości długości — od charakteryzujących Wszechświat, aż do rozmiarów obiektów bardzo małych.

Tabela 1.3. Wybrane długości (w przybliżeniu)

Wielkość	Długość w metrach
odległość Ziemi od najstarszych galaktyk	$2 \cdot 10^{26}$
odległość Ziemi od galaktyki Andromedy	$2 \cdot 10^{22}$
odległość Ziemi od najbliższej gwiazdy (Proxima Centauri)	$4 \cdot 10^{16}$
odległość Ziemi od Plutona	$6 \cdot 10^{12}$
promień Ziemi	$6 \cdot 10^{6}$
wysokość Mt. Everestu	$9 \cdot 10^{3}$
grubość tej kartki	$1 \cdot 10^{-4}$
rozmiar wirusa	$1 \cdot 10^{-8}$
promień atomu wodoru	$5 \cdot 10^{-11}$
promień protonu	$1 \cdot 10^{-15}$

Cyfry znaczące i cyfry po przecinku

Wyobraź sobie, że rozwiązujesz zadanie, w którym wszystkie wielkości są liczbami dwucyfrowymi. Te dwie cyfry nazywamy **cyframi znaczącymi**. Ich liczba wyznacza liczbę cyfr, które powinno zawierać podane przez ciebie rozwiązanie zadania. Jeśli dane mają dwie liczby znaczące, to i rozwiązanie musi mieć tylko dwie liczby znaczące. Wyświetlacz używanego przez ciebie kalkulatora może jednak pokazywać znacznie więcej cyfr — te dalsze są całkiem bezużyteczne.

W tym podręczniku będziemy zwykle podawać wynik zaokrąglony do takiej liczby cyfr znaczących, która odpowiada danej znanej najmniej dokładnie (tylko czasem podaje się jeszcze jedną cyfrę znaczącą). Gdy pierwsza z cyfr, które opuszczamy, wynosi 5 lub więcej, ostatnią pozostawianą cyfrę zwiększamy o jeden; w przeciwnym razie nie zmieniamy jej. Na przykład, zaokrąglając liczbę 11,3516 do trzech cyfr znaczących podajemy 11,4, a zaokrąglając do trzech cyfr znaczących liczbę 11,3279 podajemy 11,3 (przy podaniu odpowiedzi stosujemy zwykle znak równości (=), a nie znak równości przybliżonej (≈), nawet wtedy, gdy dokonujemy zaokrąglenia liczby).

Jeśli dana jest liczba postaci 3,15 lub $3{,}15 \cdot 10^3$, to liczba jej cyfr znaczących jest oczywista, lecz jak potraktować liczbę 3000? Czy zawiera jedną cyfrę znaczącą, tzn. że można zapisać ją jako $3 \cdot 10^3$? Czy może wszystkie cztery jej cyfry są znaczące, tzn. że należy zapisać ją jako $3{,}000 \cdot 10^3$? W tym podręczniku, podając liczbę w postaci 3000, będziemy zawsze mieć na myśli, że wszystkie cztery jej cyfry są znaczące, lecz czytając inne książki, możesz spotkać się z inną umową.

Nie należy mylić *cyfr znaczących* z *cyframi po przecinku*. Rozważmy odcinki o długościach: 35,6 mm, 3,56 m i 0,00356 m. Każda z nich ma trzy cyfry znaczące, choć odpowiednio jedną, dwie i pięć cyfr po przecinku.

Przykład 1.01. Oszacowanie rzędu wielkości, kłębek sznurka

Największy na świecie kłębek sznurka ma promień około 2 m. Ile wynosi — co do najbliższego rzędu wielkości — całkowita długość L sznura w tym kłębku?

PODSTAWOWE FAKTY

Moglibyśmy, oczywiście, rozwinąć kłębek i zmierzyć całkowitą długość L sznura, ale wymagałoby to wiele trudu, a do tego sprawiłoby wielką przykrość budowniczemu kłębka. Skoro jednak interesuje nas tylko wynik podany z dokładnością do najbliższego rzędu wielkości, to możemy wziąć pod uwagę jedynie oszacowania wszystkich potrzebnych nam wielkości.

Obliczenia: Załóżmy więc, że kłębek jest kulą o promieniu $R = 2$ m. Sznurek nie wypełnia całkowicie objętości tej kuli — między sąsiednimi zwojami sznurka jest wiele obszarów pustych. Aby uwzględnić istnienie tych luk, oszacujemy pole przekroju poprzecznego sznurka z nadmiarem, zakładając, że jest on kwadratem o boku $d = 4$ mm. Sznurek o długości L i polu przekroju poprzecznego d^2 zajmuje objętość

$$V = (\text{pole przekroju poprzecznego})(\text{długość}) = d^2 L.$$

Objętość ta jest w przybliżeniu równa objętości kłębka, czyli $\frac{4}{3}\pi R^3$, co wynosi około $4R^3$, bo π jest równe około 3. Otrzymujemy więc

$$d^2L = 4R^3,$$

a stąd

$$L = \frac{4R^3}{d^2} = \frac{4(2\text{ m})^3}{(4 \cdot 10^{-3}\text{ m})^2}$$
$$= 2 \cdot 10^6\text{ m} \approx 10^6\text{ m} = 10^3\text{ km} \quad \text{(odpowiedź)}.$$

(Zauważ, że do tak prostych obliczeń wcale nie potrzebujesz kalkulatora). Tak więc z dokładnością do najbliższego rzędu wielkości kłębek zawiera około 1000 km sznurka!

WILEY PLUS Dalsze przykłady, filmy i ćwiczenia na stronie *WileyPLUS*.

1.2. CZAS

Czego się nauczysz?

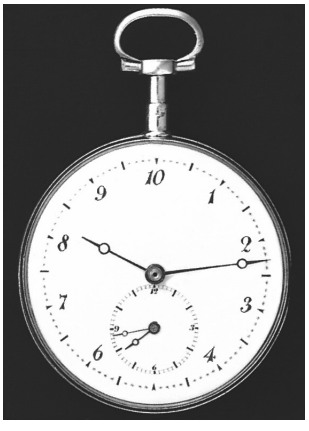
Po przestudiowaniu tego podrozdziału będziesz umiał...

1.05 zamieniać jednostki czasu, stosując współczynniki przeliczeniowe;

1.06 wykorzystywać — na przykład przy opisie ruchu — wyniki różnych pomiarów czasu, w tym otrzymane za pomocą różnych zegarów.

Podstawowe fakty

• Sekunda jest zdefiniowana za pomocą częstotliwości promieniowania wysyłanego przez atom cezu-133. Dokładne sygnały czasu z zegarów atomowych są wysyłane przez radio ze znajdujących się w wielu miejscach na świecie laboratoriów wzorców czasu.



Rys. 1.1. Gdy w roku 1792 wprowadzano układ metryczny, zmieniono również definicję godziny, tak aby dzień miał 10 godzin. Pomysł ten się nie przyjął. Producent tego 10-godzinnego zegara był jednak tak mądry, że zaopatrzył go także w małą tarczę z tradycyjnym 12-godzinnym podziałem dnia. Czy wskazówki tych dwóch tarcz pokazują ten sam czas? (fot. Steven Pitkin)

Czas

Słowo czas ma dwa znaczenia. W życiu codziennym, a nieraz i w nauce musimy znać aktualny czas (wskazanie zegara), aby móc ustalić kolejność zdarzeń. W nauce musimy ponadto bardzo często wiedzieć, jak długo trwa jakieś zjawisko. Tak więc wzorzec czasu musi dać odpowiedź na dwa pytania: „*Kiedy* to się zdarzyło?" i „*Jak długo* to trwało?" W tabeli 1.4 podano kilka przedziałów czasu.

Wzorcem czasu może być dowolne zjawisko powtarzalne. Przez wiele stuleci do tego celu był używany wyznaczający długość dnia okres obrotu Ziemi — na rysunku 1.1 przedstawiono względnie nowy przykład zegara, opartego na obrocie Ziemi. Zegar kwarcowy, w którym stosuje się ciągłe drgania pierścienia z kwarcu, można wykalibrować względem okresu obrotu Ziemi na podstawie obserwacji astronomicznych i używać go do pomiaru przedziałów czasu w laboratorium. Okazuje się jednak, że takiej kalibracji nie można dokonać z dokładnością wymaganą przez nowoczesną naukę i technikę.

Aby otrzymać lepsze wzorce czasu, zbudowano tzw. zegary atomowe. W Stanach Zjednoczonych wzorcem czasu jest zegar atomowy, znajdujący się w Państwowym Instytucie Wzorców i Techniki (NIST) w Boulder, w stanie Kolorado. Pochodzące z niego sygnały czasu są wysyłane przez radio na falach krótkich i przez telefon, a także dostępne są na stronie internetowej Obserwatorium Marynarki Stanów Zjednoczo-

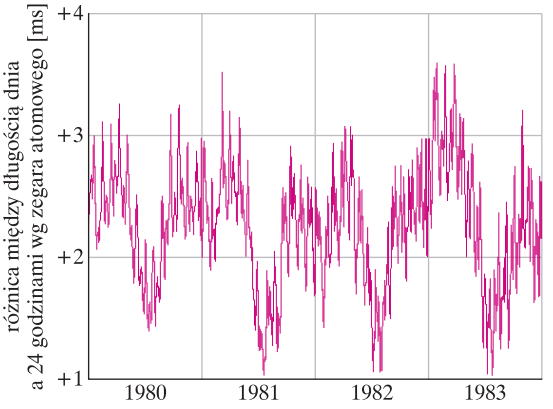
Tabela 1.4. Wybrane przedziały czasu (w przybliżeniu)

Wielkość	Czas [s]	Wielkość	Czas [s]
czas życia protonu (przewidywany)	$1 \cdot 10^{40}$	czas między kolejnymi uderzeniami ludzkiego serca	$8 \cdot 10^{-1}$
wiek Wszechświata	$5 \cdot 10^{17}$	czas życia mionu	$2 \cdot 10^{-6}$
wiek piramidy Cheopsa	$1 \cdot 10^{11}$	najkrótszy impuls światła w laboratorium	$6 \cdot 10^{-16}$
średni czas życia ludzkiego	$2 \cdot 10^{9}$	czas życia najbardziej nietrwałej cząstki	$1 \cdot 10^{-23}$
doba	$9 \cdot 10^{4}$	czas Plancka[1]	$1 \cdot 10^{-43}$

[1] Jest to najkrótszy czas od Wielkiego Wybuchu, po jakim zaczęły już obowiązywać znane nam dziś prawa fizyki.

nych: http://tycho.usno.navy.mil/time.html. Podobne systemy działają w innych krajach. Aby dokładnie ustalić czas w określonym miejscu na świecie, należy uwzględnić czas potrzebny na dotarcie do tego miejsca sygnału z odpowiedniego obserwatorium.

Na rysunku 1.2 przedstawiono zmiany długości jednego dnia na Ziemi w okresie 4 lat, otrzymane przez porównanie jej ze wskazaniami cezowego zegara atomowego. Zmiany te są powtarzalne i skorelowane z porami roku, dlatego też za rozbieżności między wskazaniami zegara ziemskiego i atomowego skłonni jesteśmy winić Ziemię. Są one prawdopodobnie związane z przypływami powodowanymi przez Księżyc i z wpływem silnych wiatrów.



Rys. 1.2. Zmiany długości dnia zarejestrowane w czasie 4 lat. Zauważ, że cała skala na osi pionowej odpowiada zaledwie 3 ms (3 milisekundy = 0,003 s)

Podczas XIII Konferencji Ogólnej ds. Miar i Wag przyjęto w roku 1967 następujący wzorzec sekundy, oparty na zegarze cezowym:

Sekunda jest to czas 9 192 631 770 drgań promieniowania (o ustalonej długości fali) wysyłanego przez atom cezu-133.

Zegary atomowe są ze sobą tak zgodne, że wskazania dwóch takich zegarów różniłyby się od siebie o 1 s dopiero po 6000 lat. Lecz nawet ta dokładność blednie w porównaniu z dokładnością zegarów, które są dziś w budowie — mają one mieć dokładność $1 \cdot 10^{18}$, tzn. 1 s na $1 \cdot 10^{18}$ s (czyli około $3 \cdot 10^{10}$ lat).

1.3. MASA

Czego się nauczysz?

Po przestudiowaniu tego podrozdziału będziesz umiał...

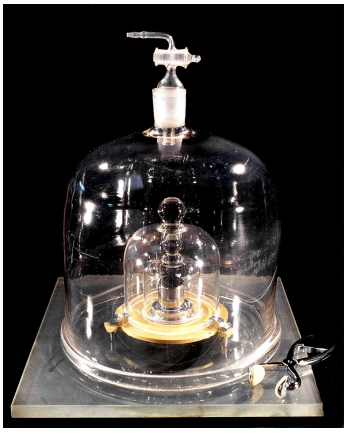
1.07 zamieniać jednostki czasu, stosując współczynniki przeliczeniowe;

1.08 podać związek gęstości z masą i objętością w przypadku, gdy rozkład masy jest równomierny.

Podstawowe fakty

- Kilogram jest zdefiniowany za pomocą wzorca wykonanego z platyny i irydu przechowywanego w pobliżu Paryża. Do pomiarów mas atomów stosuje się zwykle atomową jednostkę masy określoną za pomocą masy atomu węgla-12.
- Gęstość substancji ρ jest to masa jednostkowej objętości tej substancji:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$



Rys. 1.3. Międzynarodowy wzorzec masy 1 kg w postaci wykonanego z platyny i irydu walca o wysokości i średnicy podstawy równej 3,9 cm (dzięki uprzejmości Bureau International des Poids et Mesures, przedruk za zgodą BIPM)

Tabela 1.5. Wybrane masy (w przybliżeniu)

Obiekt	Masa [kg]
znany Wszechświat	$1 \cdot 10^{53}$
nasza Galaktyka	$2 \cdot 10^{41}$
Słońce	$2 \cdot 10^{30}$
Księżyc	$7 \cdot 10^{22}$
planetoida Eros	$5 \cdot 10^{15}$
niewielka góra	$1 \cdot 10^{12}$
transatlantyk	$7 \cdot 10^{7}$
słoń	$5 \cdot 10^{3}$
winogrono	$3 \cdot 10^{-3}$
ziarnko kurzu	$7 \cdot 10^{-10}$
cząsteczka penicyliny	$5 \cdot 10^{-17}$
atom uranu	$4 \cdot 10^{-25}$
proton	$2 \cdot 10^{-27}$
elektron	$9 \cdot 10^{-31}$

Masa

Wzorzec kilograma

Wzorcem masy w układzie SI jest przechowywany w Międzynarodowym Biurze Miar i Wag pod Paryżem walec z platyny i irydu (rys. 1.3), któremu, na mocy umowy międzynarodowej, przypisuje się masę jednego kilograma. Dokładne jego kopie znajdują się w laboratoriach wzorców w innych krajach, dzięki czemu masy dowolnych ciał można porównać z kopią wzorca za pomocą wagi. W tabeli 1.5 podano różne przykłady masy wyrażonej w kilogramach, różniące się od siebie w skrajnym przypadku o ponad 83 rzędy wielkości.

W Stanach Zjednoczonych kopia wzorca kilograma przechowywana jest w podziemiach Instytutu NIST. Wyjmuje się ją stamtąd — nie częściej niż raz na rok — aby sprawdzić masy jej kopii wtórnych, używanych w innych laboratoriach amerykańskich. Od roku 1889 dwa razy przewożono ją do Francji, w celu porównania ze wzorcem pierwotnym.

Inny wzorzec masy

Masy atomów mogą być porównywane ze sobą znacznie dokładniej niż ze wzorcem kilograma. Z tego względu mamy też inny wzorzec masy. Jest nim atom węgla-12, któremu na mocy umowy międzynarodowej przypisano masę 12 **atomowych jednostek masy** (symbol: u). Dwie jednostki masy związane są ze sobą w następujący sposób:

$$1\ \text{u} = 1{,}6605402 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}, \tag{1.7}$$

przy czym dokładność czynnika liczbowego wynosi ± 10 na dwóch ostatnich miejscach dziesiętnych. Naukowcy są dziś w stanie wyznaczać doświadczalnie masy różnych atomów w stosunku do masy atomu węgla-12 z bardzo dobrą dokładnością, jednak nie udało się dotychczas porównać ich równie dokładnie z masą jednostki bliższej codziennych pomiarów, tzn. kilograma.

Gęstość

Gęstość ρ (mała litera grecka ro) jest równa masie jednostkowej objętości substancji:

$$\rho = \frac{m}{V}. \tag{1.8}$$

Gęstość wyraża się zwykle w kilogramach na metr sześcienny lub gramach na centymetr sześcienny. Gęstość wody (1 gram na centymetr sześcienny) służy często jako gęstość porównawcza. Gęstość świeżego śniegu wynosi około 10% gęstości wody, a platyna ma gęstość około 21 razy większą niż woda.

Przykład 1.02. Gęstość i upłynnienie gruntu

Ciężki przedmiot może zapaść się w podłoże podczas trzęsienia ziemi, jeśli pod wpływem wstrząsów grunt dozna *upłynnienia*, przy którym ziarna podłoża przesuwają się po sobie niemal bez tarcia. Taki grunt nosi nazwę kurzawki. Prawdopodobieństwo upłynnienia piaszczystego gruntu zależy od *wskaźnika porowatości* gruntu e:

$$e = \frac{V_{\text{porów}}}{V_{\text{ziaren}}}, \tag{1.9}$$

gdzie V_{ziaren} to całkowita objętość ziaren piasku, a $V_{\text{porów}}$ — całkowita objętość obszaru między ziarnami („porów") w próbce gruntu. Upłynnienie gruntu może zajść podczas trzęsienia ziemi, jeśli wskaźnik e przekroczy wartość krytyczną 0,80. Jaka jest wówczas gęstość piasku ρ_{piasku}? Stały ditlenek krzemu (który jest głównym składnikiem piasku) ma gęstość $\rho_{SiO_2} = 2{,}6 \cdot 10^3\ \text{kg/m}^3$.

PODSTAWOWE FAKTY

Gęstość piasku ρ_{piasku} jest masą jednostkowej objętości próbki piasku, tzn. ilorazem całkowitej masy ziaren piasku w próbce m_{ziaren} i całkowitej objętości próbki $V_{\text{próbki}}$:

$$\rho_{\text{piasku}} = \frac{m_{\text{ziaren}}}{V_{\text{próbki}}}. \tag{1.10}$$

Obliczenia: Całkowita objętość próbki $V_{\text{próbki}}$ jest równa

$$V_{\text{próbki}} = V_{\text{ziaren}} + V_{\text{porów}}.$$

Podstawiając do tego wzoru $V_{\text{porów}}$ z równania (1.9) i wyznaczając z niego V_{ziaren}, otrzymujemy

$$V_{\text{ziaren}} = \frac{V_{\text{próbki}}}{1+e}. \tag{1.11}$$

Zgodnie z równaniem (1.8) całkowita masa ziaren piasku w próbce jest równa iloczynowi gęstości ditlenku krzemu i całkowitej objętości ziaren:

$$m_{\text{piasku}} = \rho_{SiO_2} V_{\text{ziaren}}. \tag{1.12}$$

Podstawiając do równania (1.10) powyższe wyrażenie oraz V_{ziaren} z równania (1.11), dostajemy

$$\rho_{\text{piasku}} = \frac{\rho_{SiO_2}}{V_{\text{próbki}}} \frac{V_{\text{próbki}}}{1+e} = \frac{\rho_{SiO_2}}{1+e}. \tag{1.13}$$

Podstawiając do tego wzoru dane liczbowe: $\rho_{SiO_2} = 2{,}6 \cdot 10^3\ \text{kg/m}^3$ oraz wartość krytyczną $e = 0{,}80$, wyznaczamy wartość (krytyczną) gęstości piasku

$$\rho_{\text{piasku}} = \frac{2{,}6 \cdot 10^3\ \text{kg/m}^3}{1{,}80} = 1{,}4 \cdot 10^3\ \text{kg/m}^3$$

(odpowiedź).

Upłynnienie gruntu zachodzi dla gęstości piasku mniejszych od tej wartości krytycznej. Budynek może się przy tym zapaść w ziemię na głębokość nawet kilku metrów!

WILEY PLUS Dalsze przykłady, filmy i ćwiczenia na stronie *WileyPLUS*.

Podsumowanie

Pomiary w fizyce Fizyka opiera się na pomiarach wielkości fizycznych. Niektóre z tych wielkości (m.in. długość, czas i masę) wybrano jako **wielkości podstawowe**. Dla każdej z nich ustalono **jednostkę** (np. metr, sekundę i kilogram) oraz jej **wzorzec**. Inne wielkości fizyczne definiuje się za pomocą wielkości podstawowych oraz ich jednostek i wzorców.

Jednostki SI W niniejszej książce korzystamy przede wszystkim z Międzynarodowego Układu Jednostek SI. W kilku pierwszych rozdziałach będziemy posługiwać się trzema wielkościami fizycznymi, podanymi w tabeli 1.1. Wzorce ich jednostek, które muszą być niezmienne i dostępne, zostały ustalone na mocy umów międzynarodowych. Ze wzorców tych korzystamy podczas wszelkich pomiarów fizycznych wielkości podstawowych oraz wielkości wyznaczonych na ich podstawie. Do uproszczenia zapisu wyników pomiarów stosujemy zapis potęgowy oraz przedrostki podane w tabeli 1.2.

Zamiana jednostek Do zamiany jednych jednostek na inne (np. mil na godzinę na kilometry na sekundę) stosujemy metodę mnożenia danych przez współczynniki przeliczeniowe równe jedności, w której jednostki skracamy jak wyrażenia algebraiczne, aż do uzyskania jednostek pożądanych.

Długość Jednostka długości — metr — jest zdefiniowana jako droga, którą przebywa światło w dokładnie określonym czasie.

Czas Jednostkę czasu — sekundę — wiązano dawniej z okresem ruchu obrotowego Ziemi. Dziś definiujemy ją za pomocą drgań promieniowania wysyłanego przez atomy cezu-133. Dokładne sygnały czasu pochodzące z zegarów atomowych w laboratoriach wzorców są dostępne na całym świecie drogą radiową.

Masa Jednostka masy — kilogram — jest zdefiniowana za pomocą wzorca z platyny i irydu przechowywanego we Francji, pod Paryżem. Do pomiarów mas atomów stosuje się zwykle inną jednostkę masy określoną względem masy atomu węgla-12.

Gęstość Gęstość substancji ρ jest to masa jednostkowej objętości tej substancji:

$$\rho = \frac{m}{V}. \tag{1.8}$$

Zadania

GO Zadania z rozwiązaniami interaktywnymi, udostępnianymi studentom według uznania wykładowcy, znajdują się na stronach *WileyPLUS* (https://www.wileyplus.com/WileyCDA/) oraz WebAssign (http://www.webassign.net/index.html)

•–••• Liczba kropek określa stopień trudności zadania

ssm Szczegółowe rozwiązanie jest dostępne w *Student Solutions Manual*

www Szczegółowe rozwiązanie znajdziesz na stronie http://www.wiley.com/college/halliday

ilw Rozwiązanie interaktywne znajdziesz na stronie http://www.wiley.com/college/halliday

Więcej informacji znajdziesz w książce *The Flying Circus of Physics* i na stronie http://flyingcircusofphysics.com

Podrozdział 1.1. Jak się mierzy różne rzeczy, na przykład długość

•1 ssm Ziemia jest w przybliżeniu kulą o promieniu $6{,}37 \cdot 10^6$ m. Ile wynosi: a) obwód Ziemi w kilometrach, b) pole powierzchni Ziemi w kilometrach kwadratowych, c) objętość Ziemi wyrażona w kilometrach sześciennych?

•2 *Gry* to staroangielska miara długości zdefiniowana jako 1/10 linii, a *linia* to inna staroangielska miara długości zdefiniowana jako 1/12 cala. Miarą długości powszechnie używaną przez drukarzy i wydawców jest *punkt* zdefiniowany jako 1/72 cala. Wyraź pole powierzchni 0,5 gry^2 w punktach kwadratowych (punkt^2).

•3 a) Z ilu mikrometrów składa się 1 kilometr? b) Jaką częścią centymetra jest 1 μm? c) Ile mikrometrów zawiera 1 jard?

•4 Drukarze, do pomiaru wielkości czcionek, odstępu wierszy itd., stosują tradycyjne jednostki typograficzne. W Europie są to głównie punkty typograficzne i cycera, przy czym 12 punktów = 1 cycero, a 6 cycer = 1 cal. Przy korekcie stwierdzono, że pewien rysunek został wydrukowany o 0,8 cm za wysoko. Ile wynosi przesunięcie rysunku w: a) punktach, b) cycerach?

•5 ssm www Na pewnym torze trawiastym w Anglii konie ścigają się na dystansie 4 furlongów. Ile wynosi długość tego biegu w: a) żerdziach, b) łańcuchach? 1 furlong = 201,168 m, 1 żerdź = 5,0292 m, 1 łańcuch = 20,117 m.

••6 Zamianę podstawowych miar i jednostek można dziś łatwo wykonać komputerowo, lecz wciąż powinieneś potrafić skorzystać z tabel przeliczeniowych zawartych w dodatku D. Tabela 1.6 stanowi taką tabelę dla układu miar objętości stosowanych swego czasu w Hiszpanii. Jedna fanega odpowiada 55,501 dm^3 (decymetrów sześciennych). Uzupełnij tabelę, wstawiając odpowiednie współczynniki w kolumny: a) cahiz, b) fanega, c) cuartilla i d) almude. Wyraź objętość równą 7 almude w: e) mediach, f) cahizach i g) centymetrach sześciennych (cm^3).

Tabela 1.6. Zadanie 6

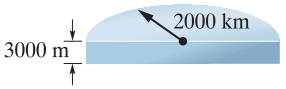
	cahiz	fanega	cuartilla	almude	medio
1 cahiz =	1	12	48	144	288
1 fanega =		1	4	12	24
1 cuartilla =			1	3	6
1 almude =				1	2
1 medio =					1

••7 ilw Hydraulicy w Stanach Zjednoczonych jako jednostki objętości używają często tzw. akrostopy zdefiniowanej jako objętość wody, która pokrywa powierzchnię 1 akra warstwą o grubości 1 stopy. W wyniku potężnej burzy miasto o powierzchni 26 km^2 zostało pokryte w ciągu 30 minut warstwą wody deszczowej o grubości 2 cali. Ile wynosi w akrostopach objętość wody, jaka spadła na to miasto?

••8 GO Most Harvarda, łączący kampus MIT z siedzibami korporacji studenckich na drugim brzegu rzeki Charles River, ma długość 364,4 smootów plus jedno ucho. Jednostka smoot jest równa wzrostowi niejakiego Olivera Reeda Smoota, studenta z rocznika 1962, który został przeniesiony przez swych kolegów (miejscami przeciągnięty) przez most, tak aby studenci wstępujący do korporacji Lambda Chi Alpha mogli stawiać znaczki (farbą) co 1 smoot przez całą długość mostu. Znaki te są co dwa lata odmalowywane przez nowych członków korporacji, zwykle w czasie korków drogowych na moście, co utrudnia interwencję policji (panuje przekonanie, że policja była początkowo przeciwna tej akcji ze względu na to, że smoot nie jest jednostką podstawową w układzie SI, lecz dziś pogodziła się już z jej istnieniem). Na rysunku 1.4 przedstawiono trzy równoległe linie, do których wyznaczenia posłużyli studenci Smoot (S), Willie (W) i Zelda (Z). Wyraź 50 smootów w willich i zeldach.

Rys. 1.4. Zadanie 8

••9 Antarktyda ma kształt zbliżony do półkola o promieniu 2000 km (rys. 1.5). Średnia grubość jej pokrywy lodowej wynosi 3000 m. Ile centymetrów sześciennych lodu zawiera Antarktyda (pomiń krzywiznę Ziemi)?



Rys. 1.5. Zadanie 9

Podrozdział 1.2. Czas

•10 Przed rokiem 1883 każde miasto w Stanach Zjednoczonych miało własny czas lokalny. Dziś osoby podróżujące po tym kraju muszą zmieniać czas lokalny jedynie skokami, o 1 godzinę. O ile średnio musisz zmienić swoje położenie w stopniach długości geograficznej, abyś mógł przesunąć zegarek o 1 godzinę? (*Wskazówka*: Ziemia obraca się o 360° w czasie około 24 godzin).

•11 Przez mniej więcej 10 lat po rewolucji francuskiej rząd Francji starał się wprowadzić podstawowe jednostki czasu oparte na systemie dziesiętnym: tydzień miał zawierać 10 dni, doba — 10 godzin, godzina — 100 minut, a jedna minuta — 100 sekund. Ile wynosi stosunek długości: a) francuskiego tygodnia dziesiętnego do normalnego tygodnia, b) francuskiej sekundy dziesiętnej do normalnej sekundy?

•12 Najszybciej rosnącą znaną rośliną jest *Hesperoyucca whipplei*, przyrastająca o 3,7 m w ciągu 14 dni. Wyraź tę szybkość w mikrometrach na sekundę.

•13 GO Trzy zegary cyfrowe chodzą z różną szybkością i nie wskazują zgodnie zera. Na rysunku 1.6 przedstawiono wyniki równoczesnych odczytów par tych zegarów — na przykład w pewnej chwili odczytano 25,5 s na zegarze B i 92 s na zegarze C. Jeśli odstęp czasu dwóch zdarzeń wynosi 600 s według zegara A, to ile wynosi on według: a) zegara B, b) zegara C? c) Jakie jest wskazanie zegara B, gdy zegar A wskazuje 400 s? d) Jakie jest wskazanie zegara B, gdy zegar C wskazuje 15 s? Wskazania poprzedzające chwilę zerową przyjmij za ujemne.

Rys. 1.6. Zadanie 13

•14 Czas standardowego wykładu (45 min) to mniej więcej jedno mikrostulecie. a) Ile minut ma mikrostulecie? b) Wyznacz błąd procentowy przyjętego przybliżenia. Skorzystaj z faktu, że błąd procentowy to

$$\left(\frac{\text{wartość dokładna} - \text{wartość przybliżona}}{\text{wartość dokładna}}\right) 100\%.$$

•15 *Fortnight* to urocza angielska jednostka czasu równa dwu tygodniom (jej nazwa jest skrótem od ang. *fourteen nights*, czyli czternaście nocy). Z pewnością przyjemnie spędzić taki czas w miłym towarzystwie, lecz gdy towarzystwo jest niemiłe, może się okazać boleśnie długą sekwencją mikrosekund. Ile mikrosekund zawiera fortnight?

•16 Wzorcami czasu są dziś zegary atomowe. Rozważa się również zastosowanie do tego celu *pulsarów*, czyli obracających się gwiazd neutronowych (gwiazd o bardzo dużej gęstości, składających się z samych neutronów). Szybkość obrotu niektórych z nich jest bardzo stabilna. Wysyłają one sygnały radiowe w kierunku Ziemi raz na okres obrotu, podobnie jak latarnie morskie wysyłają impulsy światła. Na przykład okres obrotu pulsara PSR 1937+21 wynosi 1,557 806 448 872 75±3 ms, gdzie zapis ±3 oznacza niepewność ostatniej cyfry dziesiętnej (a *nie* ±3 ms). a) Ile obrotów wykonuje pulsar PSR 1937+21 w czasie 7 dni? b) W ciągu jakiego czasu pulsar ten wykonuje 10^6 obrotów? c) Z jaką dokładnością możemy określić ten czas?

•17 ssm Pięć zegarów poddano sprawdzeniu w laboratorium. Przez kolejne dni tygodnia, dokładnie w południe — według radiowego sygnału czasu — odczytywano ich wskazania. Wyniki podano w tabelce niżej. Uszereguj te zegary od najlepszego do najgorszego miernika czasu. Uzasadnij odpowiedź.

Zegar	Niedziela	Poniedz.	Wtorek	Środa	Czwartek	Piątek	Sobota
A	12:36:40	12:36:57	12:37:12	12:37:27	12:37:44	12:37:59	12:38:14
B	11:59:59	12:00:02	11:59:57	12:00:07	12:00:02	11:59:56	12:00:03
C	15:50:45	15:51:43	15:52:41	15:53:39	15:54:37	15:55:35	15:56:33
D	12:03:59	12:02:52	12:01:45	12:00:38	11:59:31	11:58:24	11:57:17
E	12:03:59	12:02:49	12:01:54	12:01:52	12:01:32	12:01:22	12:01:12

••18 Ponieważ Ziemia obraca się coraz wolniej, długość dnia rośnie — na końcu I stulecia doba była o 1 ms dłuższa niż na początku tego stulecia. O ile wzrosła długość doby w ciągu 20 stuleci?

•••19 Wyobraź sobie, że leżąc na plaży w pobliżu równika obserwujesz Słońce zachodzące nad spokojnym morzem. W chwili gdy Słońce znika ci z oczu, włączasz stoper. Następnie wstajesz, wznosząc oczy na wysokość $H = 1{,}7$ m, i zatrzymujesz stoper, gdy po raz drugi przestajesz widzieć Słońce. Stoper wskazał czas $t = 11{,}1$ s. Ile wynosi promień Ziemi r?

Podrozdział 1.3. Masa

•20 W roku 1992 grupa szklarzy z Millville w stanie New Jersey wydmuchała rekordowo wielką butlę szklaną. Miała ona objętość 193 galonów amerykańskich. a) Ile brakowało jej do objętości 1 miliona centymetrów sześciennych? b) Wyobraź sobie, że butlę tę napełniamy wodą z niewielką szybkością, równą 1,8 g/min. Ile czasu zajmie napełnienie butli do pełna? Gęstość wody wynosi 1000 kg/m^3.

•21 Masa Ziemi wynosi $5{,}98 \cdot 10^{24}$ kg. Średnia masa atomów, z których składa się Ziemia, jest równa 40 u. Z ilu atomów składa się Ziemia?

•22 Złoto, którego gęstość wynosi 19,32 g/cm^3 jest najbardziej kowalnym i ciągliwym metalem — można z niego wykuwać bardzo cienkie folie i wyciągać bardzo długie druty. a) Ile wynosi pole powierzchni folii o grubości 1 μm, wykutej z kawałka złota o masie 27,63 g? b) Ile wynosi długość drutu, którego przekrojem jest koło o promieniu 2,5 μm, wyciągniętego z takiej samej ilości złota?

•23 ssm a) Zakładając, że gęstość wody wynosi dokładnie 1 g/cm^3, podaj masę jednego metra sześciennego wody w kilogramach. b) Zbiornik z wodą o pojemności 5700 m^3 został opróżniony w ciągu 10 godzin. Ile wynosiła szybkość wypływu masy z tego zbiornika w kilogramach na sekundę?

••24 Ziarnka drobnego piasku z kalifornijskiej plaży są w przybliżeniu kulkami z ditlenku krzemu, a ich średni promień wynosi 50 μm. Gęstość stałego ditlenku krzemu wynosi 2600 kg/m^3. Ile wynosi masa piasku, którego ziarnka mają łączne pole powierzchni (tzn. pole powierzchni wszystkich kulek składowych) równe polu powierzchni sześcianu o boku 1 m?

••25 W wyniku ulewy zbocze górskie — o długości 2,5 km, wysokości w pionie 2 m i wysokości wzdłuż zbocza 0,8 km — ześlizguje się w dolinę w postaci błota. Przyjmij, że to błoto pokrywa równomiernie całą dolinę o wymiarach 0,4 × 0,4 km, a gęstość błota wynosi 1900 kg/m^3. Oblicz masę błota pokrywającego fragment doliny o polu powierzchni 4 m^2.

••26 Jeden centymetr sześcienny typowej chmury kłębiastej (cumulusa) zawiera od 50 do 500 kropel wody o promieniu mniej więcej 10 μm. Oblicz: a) ile metrów sześciennych wody zawiera chmura kłębiasta w kształcie walca o wysokości 3 km i promieniu 1 km, b) ile litrowych butelek można by napełnić tą wodą, c) jaką masę ma woda zawarta w tej chmurze (gęstość wody wynosi 1000 kg/m^3). Wyznacz wartości skrajne odpowiadające podanym liczbom kropel (najmniejszej i największej) w centymetrze sześciennym chmury.

••27 Gęstość żelaza wynosi 7,87 g/cm^3, a masa atomu żelaza jest równa $9{,}27 \cdot 10^{-26}$ kg. Oblicz: a) objętość atomu żelaza i b) odległość środków sąsiednich atomów, zakładając, że atomy są kuliste i stykają się ze swoimi sąsiadami.

••28 Jeden mol to $6{,}02 \cdot 10^{23}$ atomów. Wyznacz rząd wielkości liczby moli atomów, z których składa się duży kot domowy. Masy atomów wodoru, tlenu i węgla wynoszą odpowiednio 1 u, 16 u i 12 u.

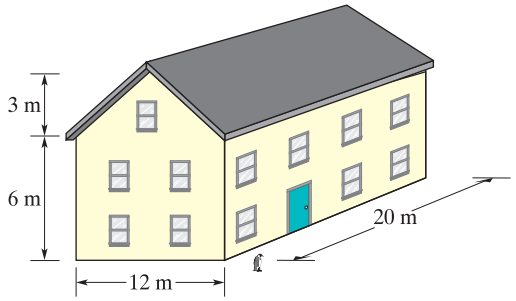
••29 W szale zakupów kupiłeś w Malezji wołu o wadze 28,9 piculi, przy czym miejscowe jednostki wagi są następujące: 1 picul = 100 ginów, 1 gin = 16 tahili, 1 tahil = 10 chee, a 1 chee = 10 hoonów. Przedmiot o wadze 1 hoona ma masę 0,3779 g. Chcesz przewieźć tego wołu statkiem, aby zadziwić swą fantazją całą rodzinę. Jaką masę — w kilogramach — musisz wpisać do deklaracji przewozowej? *Wskazówka*: wykorzystaj współczynniki przeliczeniowe jednostek.

••30 Napełniamy wodą pojemnik, który jest trochę nieszczelny. Masa wody w pojemniku m zmienia się z upływem czasu t ($t \geqslant 0$) zgodnie z zależnością $m = 5t^{0,8} - 3t + 20$, gdzie masa jest wyrażona w gramach, a czas w sekundach. a) Kiedy (dla jakiego t) masa wody w pojemniku jest największa i b) ile wynosi ta największa masa? Wyznacz szybkość zmiany masy wody w pojemniku dla c) $t = 2$ s i d) $t = 5$ s, wyrażając tę szybkość w kilogramach na minutę.

•••31 Mamy pionowy pojemnik, którego podstawą jest prostokąt o bokach 14 i 17 cm. Wrzucamy do niego cukiereczki, każdy o objętości 50 mm^3 i masie 0,02 g. Załóż, że cukiereczki wypełniają ściśle miejsce w pojemniku. Z jaką szybkością (w kilogramach na minutę) zwiększa się masa cukiereczków w pojemniku, gdy wysokość części pojemnika wypełnionej cukiereczkami wzrasta z szybkością 0,25 cm/s?

Zadania dodatkowe

32 W Stanach Zjednoczonych domek dla lalek jest normalnym domem w skali 1:12, tzn. każdy wymiar domku dla lalek jest równy $\frac{1}{12}$ odpowiedniego wymiaru normalnego domu, a domek miniaturowy, tzn. domek dla lalek do domku dla lalek, jest normalnym domem w skali 1:144. Załóżmy, że normalny dom ma długość 20 m, szerokość 12 m i wysokość 6 m, a standardowy dach jest w przekroju trójkątem równoramiennym o wysokości 3 m (rys. 1.7). Ile wynosi objętość odpowiadającego mu: a) domku dla lalek, b) domku miniaturowego? Podaj odpowiedź w metrach sześciennych.



Rys. 1.7. Zadanie 32

33 ssm W transporcie morskim objętość wyraża się często w tonach, co jednak wymaga ostrożności, gdyż w użytku są przynajmniej trzy rodzaje ton: *tona wypornościowa* równa 7 baryłkom, *tona frachtowa* równa 8 baryłkom i *tona rejestrowa* równa 20 baryłkom. Baryłka to jeszcze inna jednostka objętości: 1 baryłka = 0,1415 m^3. Wyobraź sobie, że dostałeś zlecenie spedycyjne dotyczące wysyłki „73 ton" cukierków M&M's i oczywiście jesteś pewien, że klient użył słowa „tona" w odniesieniu do objętości (a nie masy czy ciężaru — patrz rozdział 5). Jeśli klient miał na myśli tony wypornościowe, to o ile za dużo cukierków wysłałbyś do klienta, gdybyś błędnie założył, że chodziło mu o: a) 73 tony frachtowe, b) 73 tony rejestrowe? Wyraź odpowiedź w buszlach amerykańskich (1 m^3 = 28,378 buszli amerykańskich).

34 W latach dwudziestych XX wieku w Stanach Zjednoczonych były używane dwie jednostki objętości o nazwie beczułka. Beczułka do jabłek miała objętość ustaloną prawnie jako 7056 cali sześciennych, a beczułka do żurawin — jako 5826 cali sześciennych. Jeśli handlarz sprzedaje towar w ilości 20 beczułek do żurawin klientowi, który myśli, że są to beczułki do jabłek, to o ile litrów towaru różnią się ich obliczenia objętości dostawy?

35 W starym wierszyku angielskim mała Miss Muffet siedziała na kamieniu i zajadała zsiadłe mleko, gdy zjawił się pająk i siadł obok niej. Pająk przysiadł się do niej nie ze względu na zsiadłe mleko, lecz dlatego, że panna Muffet miała zapas 11 kamieni suszonych much. Kamień to miara objętości równa 2 garncom lub 0,5 buszla, przy czym buszel angielski wynosi 36,3687 litrów (l). Ile wynosił zapas suszonych much panny Muffet w: a) garncach, b) buszlach, c) litrach?

36 W tabeli 1.7 podano pewne starodawne jednostki objętości płynów. Uzupełnij tabelę, wstawiając odpowiednie współczynniki przeliczeniowe w kolumny: a) wey, b) chaldron, c) bag, d) pottle i e) gill. Objętość 1 bag jest równa 0,1091 m^3. f) Pewna dawna opowieść mówi o wiedźmie warzącej jakiś trujący napój w kotle o pojemności 1,5 chaldronów. Wyraź tę objętość w metrach sześciennych.

Tabela 1.7. Zadanie 36

	wey	chaldron	bag	pottle	gill
1 wey =	1	10/9	40/3	640	120 240
1 chaldron =					
1 bag =					
1 pottle =					
1 gill =					

37 Załóż, że kostka cukru jest sześcianem o krawędzi 1 cm. Jaka byłaby krawędź sześcianu zawierającego 1 mol takich kostek cukru (1 mol = $6{,}02 \cdot 10^{23}$)?

38 Jak wynika z dawnego manuskryptu, właściciel ziemski w czasach króla Artura miał 3 akry ziemi uprawnej oraz pastwisko o rozmiarach 25 prętów na 4 pręty. Ile wynosi całkowita powierzchnia jego gruntów: a) w ówczesnych jednostkach zwanych krzyżami, b) w metrach kwadratowych? 1 akr to powierzchnia pola o wymiarach 40 prętów na 4 pręty, 1 krzyż to 40 prętów na 1 pręt, a 1 pręt to 16,5 stopy.

39 ssm Pewna turystka kupiła samochód w Anglii i wysłała go do Stanów Zjednoczonych, gdzie mieszka. Producent samochodu informuje, że zużycie paliwa w trasie wynosi 1 galon na 40 mil. Nowa właścicielka nie zdaje sobie jednak sprawy z tego, że galon angielski różni się od amerykańskiego:

galon angielski = 4,546 090 0 litrów,
galon amerykański = 3,785 411 8 litrów.

Turystka ma teraz zamiar odbyć podróż po Stanach Zjednoczonych, przejeżdżając 750 mil. Ile galonów paliwa potrzeba na odbycie tej podróży według: a) błędnych obliczeń właścicielki, b) prawdziwych wymagań pojazdu?

40 Korzystając z danych i współczynników przeliczeniowych zawartych w tym rozdziale, wyznacz liczbę atomów wodoru, których łączna masa wynosi 1 kilogram. Masa atomu wodoru jest równa 1 u.

41 ssm *Sąg* pociętego drewna to stos o długości 8 stóp, szerokości 4 stóp i wysokości 4 stóp. Ile sągów zawiera stos drewna o objętości 1 m^3?

42 Jedna cząsteczka wody (H_2O) składa się z dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu. Masa atomu wodoru wynosi w przybliżeniu 1 u, a atomu tlenu — 16 u. a) Wyraź masę cząsteczki wody w kilogramach. b) Ile cząsteczek wody zawierają wszystkie oceany na Ziemi, których całkowita masa wynosi około $1{,}4 \cdot 10^{21}$ kg?

43 Osoba na diecie traci w ciągu tygodnia 2,3 kg. Wyraź szybkość spadku masy tej osoby w miligramach na sekundę (choć oczywiście osoba ta nie odczuwa co sekundę, że znów trochę schudła).

44 Wyznacz masę wody, jaka spadła na miasto z zadania 7. Gęstość masy wynosi $1 \cdot 10^3$ kg/m^3.

45 a) W fizyce zjawisk mikroskopowych stosuje się czasem jednostkę czasu, zwaną *shake* (co można od biedy przełożyć jako „drgnięcie"). 1 *shake* jest równy 10^{-8} s. Czy sekunda ma więcej tych jednostek niż rok sekund? b) Ludzkość istnieje na Ziemi od około 10^6 lat, a wiek Wszechświata wynosi około 10^{10} lat. Jeśli przyjąć obecny wiek Wszechświata za „dzień Wszechświata", to od ilu „sekund Wszechświata" istnieje ludzkość?

46 *Hektar*, zdefiniowany jako 10^4 m^2, jest jednostką pola powierzchni stosowaną często do pomiaru powierzchni gruntów. W kopalni odkrywkowej węgla brunatnego, zajmującej obszar o powierzchni 75 hektarów, wydobywa się rocznie warstwę gruntu o grubości 26 m. Oblicz objętość usuwanej w tym czasie ziemi, wyrażając ją w kilometrach sześciennych.

47 ssm *Jednostka astronomiczna* (AU, j.a.) jest to średnia odległość Ziemi od Słońca, równa w przybliżeniu $1{,}5 \cdot 10^8$ km. Prędkość światła wynosi około $3 \cdot 10^8$ m/s. Wyraź prędkość światła w jednostkach astronomicznych na minutę.

48 Średniej wielkości kret ma masę 75 g, co odpowiada około 7,5 molom atomów (jeden mol to $6{,}02 \cdot 10^{23}$ atomów). Ile wynosi średnia masa atomów, z których składa się ten kret? Podaj odpowiedź w atomowych jednostkach masy (u).

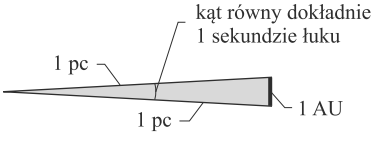
49 Tradycyjną jednostką długości w Japonii jest 1 ken (1 ken = 1,97 m). Oblicz stosunek: a) kena kwadratowego do metra kwadratowego, b) kena sześciennego do metra sześciennego. Ile wynosi objętość walcowego zbiornika na wodę o wysokości 5,5 kena i promieniu równym 3 keny, wyrażona: c) w kenach sześciennych, d) w metrach sześciennych?

50 Dowodzisz statkiem ratowniczym i otrzymujesz polecenie popłynięcia 24,5 mili na wschód, by znaleźć się wprost nad statkiem zatopionym przez piratów. Po dopłynięciu tam polecasz ekipie nurków zbadanie dna morza, lecz nie znajdują oni tam statku. Donosisz przez radio o rozwoju misji i dowiadujesz się, że odległość od zatopionego statku powinna wynosić 24,5 *mili morskiej*, a nie lądowej, jak ci początkowo podano. Korzystając z danych z dodatku D, wyznacz swą obecną odległość od zatopionego statku. Podaj odpowiedź w kilometrach.

51 Łokieć to dawna miara długości określona jako odległość łokcia od końca środkowego palca osoby wykonującej pomiar, zwykle od 43 do 53 cm. Stara rycina wskazuje, że walcowy filar pewnego grobowca miał mieć wysokość 9 łokci i średnicę 2 łokci. Podaj wysokość tego filaru: a) w metrach, b) w milimetrach. c) Oblicz objętość tego filaru w metrach sześciennych. Wyznacz wartości skrajne odpowiadające pomiarom wykonanym przez osoby wykonujące pomiar, dla których „łokieć" jest najkrótszy (43 cm) i najdłuższy (53 cm).

52 Aby porównać miary staroświeckie z nowoczesnymi i jednostki duże z małymi, rozważmy następujący przykład. W dawnej, rolniczej Anglii uważano, że jedna rodzina może się wyżywić (przy jednym plonie rocznie) z uprawy ziemi o powierzchni 100–120 akrów (1 akr to 4047 m^2). Powierzchnia ziemi potrzebnej 100 rodzinom nosiła nazwę *wapentake*. W fizyce kwantowej tzw. przekrój czynny jądra (zdefiniowany za pomocą prawdopodobieństwa, że jądro pochłonie padającą na nie cząstkę) mierzy się w barnach: 1 barn = $1 \cdot 10^{-28}$ m^2 (w żargonie fizyki jądrowej jądro jest „duże", jeśli trafienie w nie cząstką jest równie łatwe, jak trafienie ze strzelby we wrota stodoły; stąd nazwa „barn" — po angielsku „stodoła"). Ile wynosi stosunek 25 *wapentaków* do 11 barnów?

53 ssm *Jednostka astronomiczna* (AU, j.a.) jest równa średniej odległości Ziemi od Słońca, czyli około $92{,}9 \cdot 10^6$ mili. *Parsek* (pc) to odległość, z jakiej odcinek o długości 1 AU widać pod kątem równym dokładnie 1 sekundzie łuku (rys. 1.8). *Rok świetlny* jest odległością, jaką przebywa w ciągu 1 roku światło rozchodzące się w próżni z prędkością 186 000 mil na sekundę. Wyraź odległość Ziemi od Słońca: a) w parsekach, b) w latach świetlnych.



Rys. 1.8. Zadanie 53

54 Pewien producent farby emulsyjnej twierdzi, że jej wydajność wynosi 460 stóp kwadratowych na galon. a) Wyraź tę wielkość w metrach kwadratowych na litr. b) Wyraź tę wielkość w jednostkach podstawowych układu SI (patrz dodatki A i D). c) Ile wynosi odwrotność podanej wydajności i d) jakie jest znaczenie fizyczne tej wielkości?

55 Na pewnym wielkim przyjęciu weselnym wino ma być podane w — dość dziwacznych — naczyniach ze szkła kryształowego, których wymiary wewnętrzne wynoszą $40 \times 40 \times 30$ cm (30 cm to wysokość naczynia). Naczynia muszą być początkowo napełnione winem po brzegi. Wino jest dostępne w następujących butelkach:

butelka standardowa,
magnum = 2 butelki standardowe,
jeroboam = 4 butelki standardowe,
rehoboam = 6 butelek standardowych,
methuselah = 8 butelek standardowych,
salmanazar = 12 butelek standardowych,
balthazar = 16 butelek standardowych,
nebuchadnezzar = 20 butelek standardowych.

Kupując większą butlę zamiast kilku mniejszych, zmniejszasz całkowity koszt wina. a) Jakie butelki i ile każdego rodzaju powinieneś zamówić, aby koszt zakupu wina do zapełnienia jednego naczynia był jak najmniejszy? Ile wina jeszcze zostanie po napełnieniu tego naczynia: b) w jednostkach butelek standardowych, c) w litrach? Standardowa butelka do wina ma oczywiście pojemność 0,75 litra.

56 Termin *corn-hog ratio* stosowany przez hodowców trzody chlewnej jest związany z kosztem wykarmienia tucznika do wielkości nadającej się do jego sprzedaży. Definiuje się go jako stosunek ceny rynkowej tucznika o masie 45,346 kg do ceny rynkowej buszla ziarna (buszel amerykański to 35,238 litra). Ile wynosi stosunek ceny rynkowej jednego kilograma tucznika do ceny rynkowej jednego litra ziarna, jeśli podana na giełdzie hodowlanej wartość wskaźnika *corn-hog ratio* wynosi 5,7?

57 Masz przygotować obiad dla 400 osób na kongresie miłośników kuchni meksykańskiej. Danie, które chcesz podać, wymaga użycia 2 papryczek jalapeño na każdy talerz (ma być jeden talerz na osobę). Nie masz jednak pod ręką papryczek jalapeño, ale masz papryczki habanero. Ostrość potraw, co dotyczy głównie różnych rodzajów papryki, podaje się w skali Scoville'a (oznaczanej skrótem SHU, od Scoville Hotness Unit —- ang. jednostka ostrości Scoville'a). Średnia papryczka jalapeño ma w tej skali ostrość 4000 SHU, a jedna papryczka habanero — 300 000 SHU. Ilu papryczek habanero potrzebujesz, aby przygotować dla 400 osób danie tak samo pikantne, jak przy użyciu zgodnej z przepisem ilości papryczek jalapeño?

58 Standardowe schody wewnętrzne mają stopnie o wysokości 19 cm i szerokości (głębokości w poziomie) 23 cm. Badania wykazują, że bardziej bezpieczne przy schodzeniu byłyby schody o szerokości stopni 28 cm. Jak dużo dalej musiałyby się kończyć na dole schody o wysokości 4,57 m, gdyby dokonać takiej zmiany szerokości stopnia?

59 Sporządzając zamówienie żywności na pewną manifestację polityczną, pomyliłeś się i zamiast zamówić średniej wielkości ostrygi atlantyckie (których wchodzi 26 do 38 na półkwartę amerykańską), zamówiłeś średnie ostrygi z Pacyfiku (których na półkwartę wchodzi od 8 do 12). Półkwarta amerykańska (zwana też pintą, ang. U.S. pint) to 0,4732 litra. Ostrygi dostarczono ci w naczyniu o wymiarach wewnętrznych 1 m × 12 cm × 20 cm. Ilu ostryg ci brakuje w stosunku do planowanej ich liczby?

60 Stara angielska książka kucharska zawiera następujący przepis na zupę pokrzywową: „Sporządź wywar, biorąc 1 filiżankę śniadaniową i 1 filiżankę do herbaty oraz 6 łyżek stołowych i 1 łyżkę deserową wody. Zrywaj — w rękawiczkach — czubki pokrzyw, aż będziesz ich miał 0,5 kwarty. Wrzuć te czubki do wrzącej wody i dodaj 1 łyżkę stołową ugotowanego ryżu oraz 1 łyżkę do soli soli. Gotuj na wolnym ogniu przez 15 minut". W tabeli podano niektóre przeliczniki między starymi jednostkami angielskimi i wciąż jeszcze używanymi jednostkami amerykańskimi (które aż się proszą, by je zastąpić jednostkami metrycznymi). Dla substancji płynnych 1 angielska łyżka do herbaty jest równa 1 amerykańskiej łyżce do herbaty. Dla substancji sypkich 1 angielska łyżka do herbaty jest równa 2 amerykańskim łyżkom do herbaty, a 1 kwarta angielska jest równa jednej kwarcie amerykańskiej. Wyraź w jednostkach amerykańskich ilości składników w podanym przepisie: a) wody, b) czubków pokrzyw, c) ryżu i d) soli.

stare jednostki angielskie
1 łyżka do herbaty = 2 łyżki do soli
1 łyżka deserowa = 2 łyżki do herbaty
1 łyżka stołowa = 2 łyżki deserowe
1 filiżanka do herbaty = 8 łyżek stołowych
1 filiżanka śniadaniowa = 2 filiżanki do herbaty

jednostki amerykańskie
1 łyżka stołowa = 3 łyżki do herbaty
1 półfiliżanka = 8 łyżek stołowych
1 filiżanka = 2 półfiliżanki

ROZDZIAŁ 2

Ruch prostoliniowy

2.1. POŁOŻENIE, PRZEMIESZCZENIE I PRĘDKOŚĆ ŚREDNIA

Czego się nauczysz?

Po przestudiowaniu tego podrozdziału będziesz umiał...

2.01 stwierdzić, że jeśli wszystkie części ciała poruszają się w tym samym kierunku i z tą samą prędkością, to ciało można traktować jak cząstkę (punktową — w niniejszym rozdziale zajmujemy się ruchem takich ciał);

2.02 określać położenie ciała za pomocą jego współrzędnej względem wyskalowanej osi, na przykład osi x;

2.03 stosować związek przemieszczenia ciała z jego położeniem początkowym i końcowym;

2.04 stosować związek średniej prędkości ciała z jego przemieszczeniem oraz czasem, w jakim to przemieszczenie zaszło;

2.05 stosować związek średniej prędkości podróżnej ciała z przebytą przez nie drogą oraz czasem, w jakim ciało przebyło tę drogę;

2.06 wyznaczyć średnią prędkość ciała w pewnym przedziale czasu na podstawie wykresu zależności położenia ciała od czasu.

Podstawowe fakty

- Położenie x cząstki (ciała) na osi x to współrzędna punktu, w jakim się ona znajduje, wyznaczone względem początku (czyli punktu zerowego) osi.
- Położenie może być dodatnie lub ujemne — zależnie od tego, z której strony początku osi znajduje się cząstka — a także równe zeru, gdy cząstka znajduje się w początku osi. Kierunek dodatni osi to kierunek, w którym współrzędne punktów rosną, a kierunek przeciwny to kierunek ujemny osi.
- Przemieszczenie Δx cząstki to zmiana jej położenia:

$$\Delta x = x_2 - x_1.$$

- Przemieszczenie jest wielkością wektorową. Jest dodatnie, gdy cząstka porusza się w kierunku dodatnim osi x, a ujemne — gdy cząstka porusza się w kierunku ujemnym osi.
- Gdy cząstka zmienia położenie z x_1 w x_2 w przedziale czasu $\Delta t = t_2 - t_1$, wtedy jej prędkość średnia w tym przedziale czasu wynosi

$$v_{śr} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}.$$

- Znak wielkości $v_{śr}$ jest związany z kierunkiem ruchu ($v_{śr}$ jest wielkością wektorową). Definicja prędkości średniej nie zawiera drogi przebytej przez cząstkę (która jest zawsze dodatnia), lecz jej położenie początkowe i końcowe.
- Na wykresie x jako funkcji t prędkość średnia cząstki w przedziale czasu Δt jest nachyleniem (współczynnikiem kierunkowym) prostej łączącej punkty na krzywej odpowiadające chwili początkowej i końcowej.
- Średnia prędkość podróżna (średnia wartość bezwzględna prędkości) w przedziale czasu Δt jest określona przez całkowitą drogę przebytą przez cząstkę w tym przedziale czasu:

$$s_{śr} = \frac{\text{całkowita droga}}{\Delta t}.$$

O fizyce

Jednym z celów fizyki jest badanie ruchów ciał — jak szybko się one poruszają, gdzie się znajdą po ustalonym czasie itd. Inżynierowie z NASCAR (działającego w Stanach Zjednoczonych stowarzyszenia wyścigów samo-

chodów seryjnych) z pasją wykorzystują ten dział fizyki, gdy analizują działanie samochodów podczas wyścigu. Geologowie stosują prawa fizyki do pomiarów przemieszczeń płyt tektonicznych w celu prognozowania trzęsień ziemi. Kardiologom fizyka jest potrzebna do wyznaczania przepływów krwi w krwiobiegu pacjenta, gdy podejrzewają częściową blokadę tętnicy, a kierowcom do ustalania, czy zdążą dostatecznie zwolnić, gdy słyszą sygnał ostrzegawczy antyradaru. Można by podać jeszcze wiele podobnych przykładów. W tym rozdziale będziemy badać podstawowe prawa ruchu ciał (samochodów wyścigowych, płyt tektonicznych, krwinek itp.) poruszających się wzdłuż jednej prostej. Taki ruch nazywamy *ruchem prostoliniowym* (inaczej: jednowymiarowym).

Ruch

Cały świat i wszystkie jego składniki są w ciągłym ruchu. Nawet pozornie tak nieruchome rzeczy, jak np. szosa, też biorą udział w ruchu obrotowym Ziemi; Ziemia krąży wokół Słońca, Słońce wokół środka Drogi Mlecznej, czyli naszej Galaktyki, a Galaktyka przemieszcza się względem innych galaktyk. Klasyfikacja i porównanie różnych ruchów (co nazywamy **kinematyką**) wcale nie są łatwe. Co właściwie należy mierzyć i jak porównywać różne ruchy?

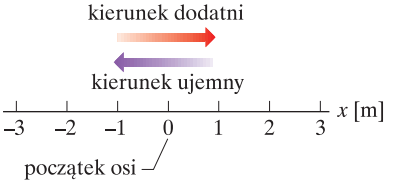
Zanim spróbujemy odpowiedzieć na to pytanie, zbadamy pewne ogólne cechy ruchów spełniających dane niżej warunki.

1. Ruch może zachodzić tylko wzdłuż linii prostej. Może być ona pionowa (jak przy spadku kamienia), pozioma (jak przy ruchu samochodu na płaskim odcinku autostrady), a także ukośna, lecz musi być prosta.
2. Ruch może odbywać się pod wpływem sił, ale tymczasem (aż do rozdziału 5) nie będziemy się nimi zajmować. W tym rozdziale będziemy badać sam ruch i jego zmiany. Na przykład zastanowimy się, czy poruszające się ciało przyspiesza, zwalnia, zatrzymuje się, czy zaczyna poruszać się w przeciwnym kierunku. A jeśli ruch ulega zmianom, to jak zależą one od czasu?
3. Poruszające się ciało jest albo **cząstką** (tzn. obiektem punktowym, jak elektron), albo porusza się jak cząstka (tzn. każda jego część porusza się w takim samym kierunku i z taką samą prędkością). Sztywne prosię, które ześlizguje się po zjeżdżalni na placu zabaw, porusza się jak cząstka, a toczący się kłębek nie porusza się jak cząstka, bo każdy jego punkt przemieszcza się w innym kierunku.

Położenie i przemieszczenie

Położenie ciała, czyli współrzędną punktu, w jakim się ono znajduje, wyznaczamy względem pewnego punktu odniesienia, najczęściej **początku** (czyli punktu zerowego) osi, np. osi x na rysunku 2.1. **Kierunkiem dodatnim** osi jest kierunek, w którym współrzędne punktów rosną — na rysunku 2.1 jest to kierunek na prawo. Kierunek przeciwny nazywamy **kierunkiem ujemnym**.

Na przykład cząstka może znajdować się w punkcie $x = 5$ m, co oznacza, że jest ona odległa o 5 m od początku osi w kierunku dodatnim. Jeśli znajduje się ona w punkcie $x = -5$ m, to jest w takiej samej odległości od



Rys. 2.1. Położenie wyznaczamy na osi rozciągającej się nieograniczenie w obydwu kierunkach, na której zaznaczono jednostki długości (tutaj metry). Symbol osi, tutaj x, zapisujemy zawsze po stronie współrzędnych dodatnich

początku osi jak poprzednio, ale w kierunku ujemnym. Punkt o współrzędnej -5 m leży na osi, na lewo od punktu o współrzędnej -1 m, a obydwa leżą na lewo od punktu o współrzędnej $+5$ m. Znak plus przy współrzędnej można opuścić, lecz znak minus musi być zawsze podany.

Zmianę położenia od punktu x_1 do innego punktu x_2 nazywamy **przemieszczeniem** Δx, przy czym

$$\Delta x = x_2 - x_1 \qquad (2.1)$$

(symbol Δ, czyli wielka litera grecka delta, oznacza zwykle zmianę jakiejś wielkości i jest różnicą wartości końcowej i początkowej tej wielkości). Po podstawieniu do tego wzoru konkretnych wartości x_1 i x_2 otrzymujemy wartość dodatnią dla przemieszczeń w kierunku dodatnim (czyli na prawo na rysunku 2.1), a wartość ujemną dla przemieszczeń w kierunku przeciwnym. Na przykład, jeśli cząstka przemieściła się z punktu $x_1 = 5$ m do punktu $x_2 = 12$ m, to $\Delta x = (12\text{ m}) - (5\text{ m}) = +7$ m. Wynik dodatni oznacza, że ruch zachodził w kierunku dodatnim. Jeśli natomiast cząstka przemieściła się z punktu $x_1 = 5$ m do punktu $x_2 = 1$ m, to $\Delta x = (1\text{ m}) - (5\text{ m}) = -4$ m. Wynik ujemny oznacza, że ruch zachodził w kierunku ujemnym.

Całkowita droga przebyta w trakcie ruchu nie ma znaczenia dla wartości przemieszczenia — liczy się tylko położenie początkowe i końcowe. Jeśli na przykład cząstka przemieści się z punktu $x = 5$ m do punktu $x = 200$ m, a następnie z powrotem do punktu $x = 5$ m, to jej całkowite przemieszczenie wyniesie $\Delta x = (5\text{ m}) - (5\text{ m}) = 0$.

Znak przemieszczenia. Znak plus przy przemieszczeniu można opuścić, natomiast znak minus należy zawsze podawać. Gdy zapomnimy o znaku (a więc i kierunku) przemieszczenia, będziemy znać tylko jego **wartość bezwzględną** (moduł). Na przykład wartość bezwzględna przemieszczenia $\Delta x = -4$ m jest równa 4 m.

Przemieszczenie jest przykładem **wielkości wektorowej**, tzn. takiej, która ma wartość bezwzględną i kierunek. Wektory omówimy obszernie w rozdziale 3; teraz zapamiętaj jedynie, że przemieszczenie ma dwie cechy: 1) jego *wartość bezwzględna* to odległość (np. w metrach) między położeniem pierwotnym i końcowym; 2) jego *kierunek*, od punktu początkowego do końcowego, jest w przypadku ruchu po linii prostej dany przez znak plus lub minus.

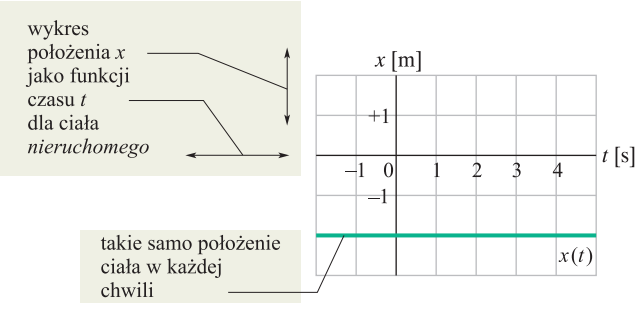
Niżej znajdziesz pierwszy sprawdzian, jakich wiele w tej książce. Każdy z nich pozwoli ci sprawdzić zrozumienie omówionego materiału, co będzie od ciebie wymagać wykonania prostego rozumowania. Prawidłowe odpowiedzi podane są na końcu książki.

Sprawdzian 1

Niżej podano trzy pary położeń początkowych i końcowych na osi x. Które z nich dają ujemne przemieszczenie: a) -3 m, $+5$ m; b) -3 m, -7 m; c) 7 m, -3 m?

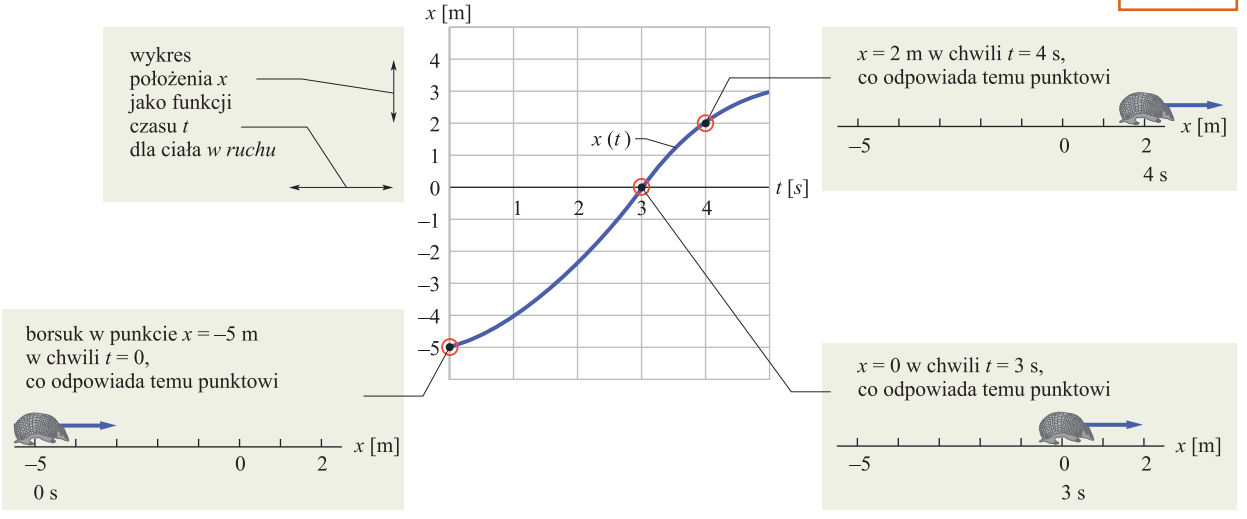
Prędkość średnia

Wygodnym sposobem przedstawienia ruchu ciała jest wykreślenie jego położenia x jako funkcji czasu t, tzn. sporządzenie wykresu $x(t)$ (zapis $x(t)$ oznacza x jako funkcję t, a nie iloczyn x i t). Na rysunku 2.2 przedstawiono — jako bardzo prosty przykład — funkcję $x(t)$ dla borsuka (traktowanego jako cząstka), który pozostaje w bezruchu w punkcie $x = -2$ m.



Rys. 2.2. Wykres $x(t)$ dla borsuka, który pozostaje w spoczynku w punkcie $x = -2$ m. Położenie borsuka x jest równe -2 m w każdej chwili

Rysunek 2.3 dotyczy ciekawszej sytuacji, albowiem borsuk się porusza. Pojawia się on w chwili $t = 0$, w punkcie $x = -5$ m, po czym porusza się w kierunku punktu $x = 0$, mija go w chwili $t = 3$ s, a następnie przesuwa się ku punktom o coraz większych współrzędnych dodatnich x. Na rysunku pokazano też położenie borsuka w trzech wybranych chwilach podczas jego ruchu prostoliniowego, czyli to, co możemy zaobserwować. Wykres ilustruje ruch borsuka w sposób bardziej abstrakcyjny, ale również pokazuje, jak szybko porusza się borsuk.



Rys. 2.3. Wykres $x(t)$ dla poruszającego się borsuka. Ruch borsuka przedstawiono również, pokazując jego położenie w trzech wybranych chwilach. Ikona z wirem informuje, że na stronie *WileyPLUS* dostępna jest animacja rysunku z komentarzem słownym

To, jak szybko porusza się cząstka, możemy wyrazić w różny sposób. Jedną z możliwości jest podanie **średniej prędkości** $v_{śr}$, którą opisujemy stosunkiem przemieszczenia cząstki Δx w pewnym przedziale czasu Δt, do wielkości tego przedziału czasu:

$$v_{śr} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}. \qquad (2.2)$$

Zapis ten oznacza, że cząstka znajduje się w położeniu x_1 w chwili t_1, a w położeniu x_2 w chwili t_2. Typowym przykładem jednostki $v_{śr}$ jest metr na sekundę (m/s). W zadaniach spotkasz też inne jednostki, lecz zawsze będą mieć one postać ilorazu jednostki długości i jednostki czasu.

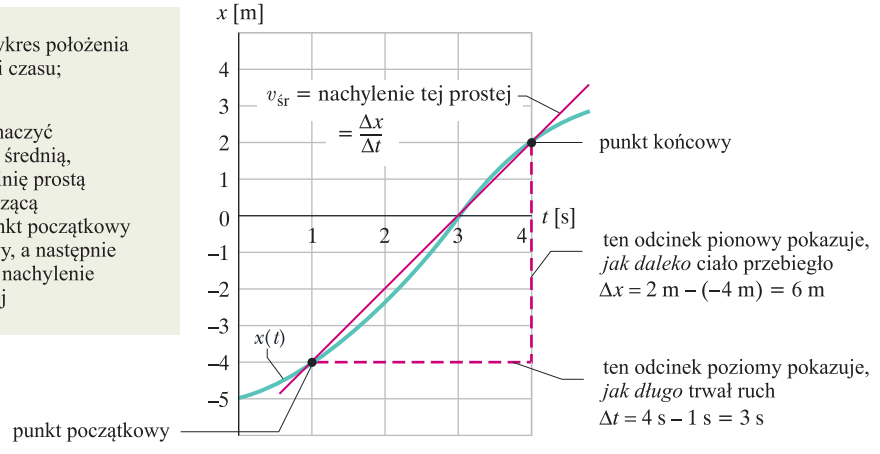
Wykresy. Na wykresie x jako funkcji t wartość $v_{śr}$ jest równa **nachyleniu** (współczynnikowi kierunkowemu) prostej łączącej dwa punkty na krzywej $x(t)$: punkt odpowiadający wartościom x_2 i t_2 oraz punkt odpowiadający wartościom x_1 i t_1. Podobnie jak przemieszczenie, $v_{śr}$ ma zarówno wartość bezwzględną, jak i kierunek (jest to również wielkość wektorowa). Wartość bezwzględna prędkości średniej jest równa wartości bezwzględnej nachylenia prostej. Jeśli $v_{śr}$, a więc i nachylenie są dodatnie, to linia na wykresie wznosi się wraz ze wzrostem t, a jeśli $v_{śr}$ i nachylenie są ujemne, to linia na wykresie opada wraz ze wzrostem t. Prędkość średnia $v_{śr}$ ma zawsze taki sam znak, jak przemieszczenie Δx, gdyż Δt we wzorze (2.2) jest zawsze dodatnie.

Na rysunku 2.4 pokazano sposób wyznaczenia $v_{śr}$ dla borsuka z rysunku 2.3, w przedziale czasu od $t = 1$ s do $t = 4$ s. Wykreślamy prostą łączącą punkt na krzywej, odpowiadający początkowi tego przedziału, i punkt odpowiadający końcowi przedziału. Następnie wyznaczamy nachylenie prostej $\Delta x/\Delta t$. Tak więc prędkość średnia w zadanym przedziale czasu wynosi

$$v_{śr} = \frac{6\text{ m}}{3\text{ s}} = 2\text{ m/s}.$$

to jest wykres położenia w funkcji czasu;

aby wyznaczyć prędkość średnią, narysuj linię prostą przechodzącą przez punkt początkowy i końcowy, a następnie wyznacz nachylenie tej prostej



Rys. 2.4. Wyznaczanie średniej prędkości w przedziale czasu od $t = 1$ s do $t = 4$ s jako nachylenia prostej łączącej punkty na krzywej $x(t)$ odpowiadające tym chwilom

Na pytanie, jak szybko poruszała się cząstka, możemy też odpowiedzieć w inny sposób, dzieląc przez czas nie przemieszczenie cząstki Δx, lecz całkowitą drogę (na przykład w metrach), przebytą w tym czasie przez cząstkę, niezależnie od kierunku, tzn. podając wielkość

$$s_{śr} = \frac{\text{całkowita droga}}{\Delta t}. \qquad (2.3)$$

Wielkość ta *nie* uwzględnia kierunku ruchu (mając w istocie znaczenie **średniej wartości bezwzględnej prędkości**), nie ma zatem znaku. Czasem jest ona równa wartości bezwzględnej $v_{śr}$, ale może też się od niej bardzo różnić. Wielkość tę nazywamy czasem prędkością „podróżną".

Przykład 2.01. Prędkość średnia, stara furgonetka

Jechałeś starą furgonetką po prostej drodze z prędkością 70 km/h. Po przebyciu drogi 8,4 km skończyła ci się benzyna i samochód się zatrzymał. Musiałeś więc iść pieszo 2 km do najbliższej stacji benzynowej, co zajęło ci 30 minut.

a) Ile wynosiło twoje całkowite przemieszczenie od początku podróży do stacji benzynowej?

PODSTAWOWE FAKTY

Załóżmy dla wygody, że poruszałeś się w dodatnim kierunku osi x, od położenia początkowego $x_1 = 0$ do położenia x_2. Twoje położenie końcowe to $x_2 = 8{,}4\ \text{km} + 2\ \text{km} = 10{,}4\ \text{km}$. Twoje przemieszczenie wzdłuż osi x jest równe różnicy położenia końcowego i początkowego.

Obliczenia: Z równania (2.1) otrzymujemy

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 10{,}4\ \text{km} - 0 = 10{,}4\ \text{km} \quad \text{(odpowiedź)}.$$

Tak więc twoje całkowite przemieszczenie było równe 10,4 km w dodatnim kierunku osi x.

b) Ile czasu Δt upłynęło od początku podróży do chwili przybycia na stację benzynową?

PODSTAWOWE FAKTY

Znamy już czas marszu Δt_m, równy 0,5 h, ale nie znamy czasu jazdy samochodem Δt_j. Wiemy jednak, że w czasie jazdy przemieściłeś się o Δx_j, wynoszące 8,4 km, oraz że średnia prędkość jazdy $v_{śr,\,j}$ wynosiła 70 km/h. Prędkość średnia jest równa ilorazowi przemieszczenia w czasie jazdy i czasu jazdy.

Obliczenia: Przede wszystkim

$$v_{śr,\,j} = \frac{\Delta x_j}{\Delta t_j}.$$

Przekształcając ten wzór i podstawiając dane, otrzymujemy

$$\Delta t_j = \frac{\Delta x_j}{v_{śr,\,j}} = \frac{(8{,}4\ \text{km})}{(70\ \text{km/h})} = 0{,}12\ \text{h}.$$

Wobec tego

$$\Delta t = \Delta t_j + \Delta t_m = 0{,}12\ \text{h} + 0{,}5\ \text{h} = 0{,}62\ \text{h} \quad \text{(odpowiedź)}.$$

c) Ile wynosiła twoja średnia prędkość $v_{śr}$ w czasie, który upłynął od początku podróży do chwili przybycia na stację benzynową? Wyznacz ją na drodze obliczeń oraz graficznie.

PODSTAWOWE FAKTY

Skorzystamy znów ze wzoru (2.2): $v_{śr}$ *dla całej podróży* jest równa ilorazowi przemieszczenia *w czasie całej podróży*, równego 10,4 km, oraz czasu *całej podróży*, równego 0,62 h.

Obliczenia: Mamy więc

$$v_{śr} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{10{,}4\ \text{km}}{0{,}62\ \text{h}} = 16{,}8\ \text{km/h} \approx 17\ \text{km/h} \quad \text{(odpowiedź)}.$$

Aby wyznaczyć $v_{śr}$ graficznie, sporządzimy najpierw wykres jak na rysunku 2.5, zaznaczając, że ruch odbywa się od początku układu współrzędnych do punktu oznaczonego jako „stacja". Prędkość średnia jest równa nachyleniu prostej łączącej te dwa punkty, czyli ilo-

razowi *różnicy ich rzędnych* ($\Delta x = 10{,}4$ km) i *różnicy ich odciętych* ($\Delta t = 0{,}62$ h), skąd otrzymujemy $v_{śr} = 16{,}8$ km/h.

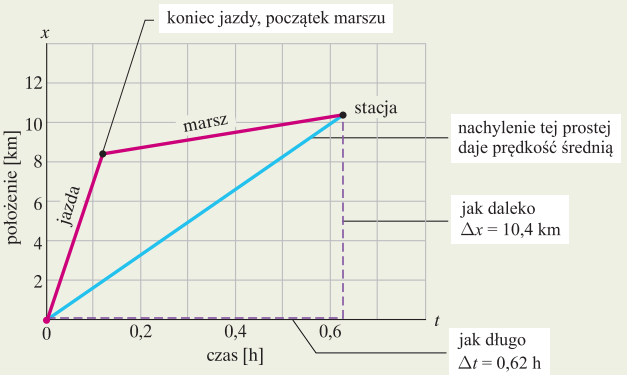
d) Załóżmy, że nabrałeś benzyny do kanistra, zapłaciłeś za nią i wróciłeś do samochodu w czasie 45 minut. Ile wynosi średnia droga, przebyta przez ciebie w jednostce czasu, od początku podróży do chwili powrotu z benzyną do furgonetki?

PODSTAWOWE FAKTY

Musimy obliczyć iloraz całkowitej przebytej przez ciebie drogi i całkowitego czasu podróży.

Obliczenia: Całkowita droga wynosi: 8,4 km + 2 km + 2 km = 12,4 km. Całkowity czas podróży jest równy: 0,12 h + 0,5 h + 0,75 h = 1,37 h. Ze wzoru (2.3) otrzymujemy więc:

$$s_{śr} = \frac{(12{,}4\ \text{km})}{(1{,}37\ \text{h})} = 9{,}1\ \text{km/h} \qquad \text{(odpowiedź)}.$$



Rys. 2.5. Odcinki oznaczone jako „jazda" oraz „marsz" są wykresami zależności położenia od czasu dla części podróży przebytych samochodem i pieszo (założono, że maszerowałeś ze stałą prędkością). Nachylenie prostej, przechodzącej przez początek układu współrzędnych i punkt oznaczony jako „stacja", jest równe średniej prędkości dla całej podróży, od jej początku do chwili przybycia na stację benzynową

WILEY PLUS Dalsze przykłady, filmy i ćwiczenia na stronie *WileyPLUS*.

2.2. PRĘDKOŚĆ CHWILOWA

Czego się nauczysz?

Po przestudiowaniu tego podrozdziału będziesz umiał. . .

2.07 obliczyć prędkość chwilową ciała w dowolnej chwili, znając jego położenie jako funkcję czasu;

2.08 obliczyć prędkość chwilową ciała w dowolnej chwili, znając wykres położenia ciała jako funkcji czasu;

2.09 stwierdzić, że prędkość podróżna to wartość bezwzględna prędkości chwilowej.

Podstawowe fakty

- Prędkość chwilowa (czyli po prostu prędkość) v poruszającej się cząstki to

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt},$$

gdzie $\Delta x = x_2 - x_1$, a $\Delta t = t_2 - t_1$.

- Prędkość chwilową (w dowolnej chwili) można wyznaczyć jako nachylenie krzywej $x(t)$ dla tej chwili.

- Wartość bezwzględna prędkości chwilowej to tzw. prędkość podróżna.

Prędkość chwilowa

Wiesz już, że szybkość poruszania się ciała można określić na dwa sposoby: podając średnią prędkość i średnią drogę przebytą w jednostce czasu. Obie te wielkości odnoszą się do pewnego przedziału czasu Δt. Najczęściej jednak, pytając, jak szybko porusza się cząstka, chcemy wiedzieć, jak szybko porusza się ona w danej chwili, tzn. pytamy o jej **prędkość chwilową** (czyli po prostu **prędkość**) v.

Prędkość w danej chwili otrzymujemy z prędkości średniej, zmniejszając przedział czasu Δt do wartości coraz bliższej zera. Przy zmniejszaniu się Δt średnia prędkość dąży do granicy, którą jest prędkość w danej chwili:

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}. \qquad (2.4)$$

Zauważ, że v jest szybkością zmiany położenia cząstki x przy zmianie czasu w danej chwili; tak więc v jest pochodną x względem t. Zauważ też, że wartość v jest w każdej chwili równa nachyleniu prostej stycznej do wykresu położenia cząstki, jako funkcji czasu, w punkcie odpowiadającym tej chwili. Prędkość jest kolejną poznaną przez nas wielkością wektorową, a więc ma kierunek.

Czasem wygodnie jest mówić nie o prędkości chwilowej, a tylko o jej wartości bezwzględnej (prędkości podróżnej). Oczywiście, wielkości te mogą się od siebie różnić (nawet znacznie), gdyż prędkość zawiera w sobie informację o kierunku ruchu, a jej wartość bezwzględna — nie. Na przykład zarówno prędkość równa $+5$ m/s, jak i równa -5 m/s mają wartość bezwzględną równą 5 m/s. Szybkościomierz w samochodzie pokazuje wartość bezwzględną prędkości, a nie samą prędkość, ponieważ jego wskazania nie zależą od kierunku ruchu pojazdu.

Sprawdzian 2

Niżej podano równania opisujące zależność położenia cząstki od czasu $x(t)$ (we wszystkich przypadkach x jest wyrażone w metrach, a t w sekundach, przy czym $t > 0$): 1) $x = 3t - 2$; 2) $x = -4t^2 - 2$; 3) $x = 2/t^2$; 4) $x = -2$. a) W którym przypadku prędkość cząstki v jest stała? b) W którym przypadku cząstka porusza się w ujemnym kierunku osi x?

Przykład 2.02. Prędkość i nachylenie krzywej $x(t)$, winda

Na rysunku 2.6a przedstawiono wykres $x(t)$ dla windy, początkowo nieruchomej, a następnie jadącej do góry (ten kierunek przyjmijmy za dodatni kierunek x) i w końcu się zatrzymującej. Sporządź wykres v jako funkcji czasu.

PODSTAWOWE FAKTY

Wartość v w każdej chwili można wyznaczyć jako nachylenie krzywej $x(t)$ dla tej chwili.

Obliczenia: W przedziale od $t = 0$ do 1 s oraz dla $t = 9$ s i chwil późniejszych nachylenie wykresu $x(t)$, a więc i prędkość są równe zeru, tzn. winda jest w spoczynku. Między punktami b i c nachylenie jest stałe i różne od zera, tzn. winda porusza się ze stałą prędkością. Nachylenie to możemy obliczyć:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v = \frac{(24\text{ m}) - (4\text{ m})}{(8\text{ s}) - (3\text{ s})} = +4\text{ m/s}. \qquad (2.5)$$

Znak plus oznacza, że wagonik porusza się w dodatnim kierunku osi x. Dla wymienionych przedziałów (dla których prędkość jest stała i wynosi $v = 0$ oraz $v = 4$ m/s) wykreślamy zatem na rysunku 2.6b odcinki poziome. Ponadto, winda początkowo zostaje wprawiona w ruch, a później zwalnia, aż do zatrzymania, odpowiednio w przedziałach czasu od 1 s do 3 s oraz od 8 s do 9 s. Dorysowując odcinki odpowiadające tym fazom ruchu, otrzymujemy żądany wykres — rysunek 2.6b (rys. 2.6c omówimy w podrozdz. 2.3).

Mając już wykres $v(t)$, jak na rysunku 2.6b, możemy spróbować „odwrócić” zadanie i wyznaczyć na tej podstawie wykres $x(t)$ (rys. 2.6a). Nie możemy jednak wyznaczyć konkretnych wartości x w poszczególnych