

A photograph of a roller coaster with red cars and white tracks, looping vertically against a clear blue sky. The cars are filled with passengers, and the track forms a large circular loop.

**HALLIDAY
RESNICK • WALKER**

**PODSTAWY
FIZYKI**

4



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 ciepł 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 oddległej 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**

4

Przekład z języka angielskiego

wydanie 1: **Jerzy Prochorow, Rafał Bożek**

wydanie 2: **Rafał Bożek**

A blue-tinted photograph of a roller coaster track looping vertically, with several cars full of passengers visible. The image serves as the background for the book cover.

David
HALLIDAY
Robert Jearl
RESNICK • WALKER

PODSTAWY FIZYKI

4

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: **Jerzy Prochorow** (rozdz. 34–37)

Rafał Bożek (rozdz. 38)

wydanie 2: **Rafał Bożek**

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 978-83-01-18125-3 tom 4

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. Równania 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, leptoni i Wielki Wybuch

Dodatki

S P I S T R E Ś C I

Od Wydawcy do drugiego wydania polskiego ix

Przedmowa xi

Podziękowania xix

33. Fale elektromagnetyczne 1

33.1. Fale elektromagnetyczne 1

O fizyce 1

Tęcza Maxwella 2

Rozchodzenie się fali elektromagnetycznej. Opis jakościowy 3

Rozchodzenie się fali elektromagnetycznej. Opis ilościowy 8

33.2. Przepływ energii i wektor Poyntinga 11

Przepływ energii i wektor Poyntinga 11

33.3. Ciśnienie promieniowania 15

Ciśnienie promieniowanie 15

33.4. Polaryzacja 17

Polaryzacja 18

33.5. Odbicie i załamanie 23

Odbicie i załamanie 24

Rozszczepienie światła 26

33.6. Całkowite wewnętrzne odbicie 31

Całkowite wewnętrzne odbicie 31

33.7. Polaryzacja przy odbiciu 32

Polaryzacja przy odbiciu 33

Podsumowanie 34 Pytania 35 Zadania 37

34. Obrazy 49

34.1. Obrazy i zwierciadła płaskie 49

O fizyce 49

Dwa rodzaje obrazów 50

Zwierciadła płaskie 51

34.2. Zwierciadła sferyczne 54

Zwierciadła sferyczne 55

Obrazy wytwarzane przez zwierciadła sferyczne 57

34.3. Sferyczne powierzchnie załamujące 62

Sferyczne powierzchnie załamujące 62

34.4. Soczewki cienkie 65

Soczewki cienkie 66

34.5. Przyrządy optyczne 75

Przyrządy optyczne 75

34.6. Trzy wyprowadzenia 80

Podsumowanie 83 Pytania 84 Zadania 85

35. Interferencja 97

35.1. Światło jako fala 97

O fizyce 97

Światło jako fala 98

35.2. Doświadczenie interferencyjne Younga 104

Dyfrakcja 105

Doświadczenie Younga 106

35.3. Natężenie światła w obrazie interferencyjnym 112

Spójność 112

Natężenie światła w obrazie interferencyjnym 113

35.4. Interferencja w cienkich warstwach 117

Interferencja w cienkiej warstwie 118

35.5. Interferometr Michelsona 127

Interferometr Michelsona 127

Podsumowanie 128 Pytania 129 Zadania 131

36. Dyfrakcja 141

36.1. Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie 141

O fizyce 141

Dyfrakcja i falowa teoria światła 142

Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie: położenia minimów 143

- 36.2. Natężenie światła w obrazie dyfrakcyjnym pojedynczej szczeliny** 147
 Natężenie światła w obrazie dyfrakcyjnym pojedynczej szczeliny. Opis jakościowy. 148
 Natężenie światła w obrazie dyfrakcyjnym pojedynczej szczeliny. Opis ilościowy 150
- 36.3. Dyfrakcja na otworze kołowym** 153
 Dyfrakcja na otworze kołowym 154
- 36.4. Dyfrakcja na dwóch szczelinach** 158
 Dyfrakcja na dwóch szczelinach 158
- 36.5. Siatki dyfrakcyjne** 162
 Siatki dyfrakcyjne 163
- 36.6. Siatki dyfrakcyjne: dyspersja i zdolność rozdzielcza** 167
 Siatki dyfrakcyjne: Dyspersja i zdolność rozdzielcza 167
- 36.7. Dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego** 170
 Dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego 171
 Podsumowanie 174 Pytania 175 Zadania 176

37. Teoria względności 187

- 37.1. Równoczesność i dylatacja czasu** 187
 O fizyce 187
 Postulaty 189
 Jak „mierzyć” zdarzenie 190
 Względność równoczesności 192
 Względność czasu 193
- 37.2. Względność długości** 199
 Względność długości 200
- 37.3. Transformacja Lorentza** 204

Transformacja Lorentza 204
 Kilka wniosków z transformacji Lorentza 207
 Skrócenie długości 208

- 37.4. Względność prędkości** 210
 Względność prędkości 210
- 37.5. Zjawisko Dopplera dla światła** 211
 Zjawisko Dopplera dla światła 211
- 37.6. Pęd i energia** 215
 Nowe spojrzenie na pęd 215
 Nowe spojrzenie na energię 216
 Podsumowanie 222 Pytania 223 Zadania 225

Dodatki 235

- A. Międzynarodowy Układ Jednostek (SI)** 235
- B. Niektóre podstawowe stałe fizyczne** 237
- C. Niektóre dane astronomiczne** 239
- D. Współczynniki zamiany jednostek** 241
- E. Wzory matematyczne** 245
- F. Właściwości pierwiastków** 248
- G. Układ okresowy pierwiastków** 251

Autorzy zdjęć 252

Odpowiedzi 253

Skorowidz 256

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 największą trudność. 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](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 kliknięciu *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

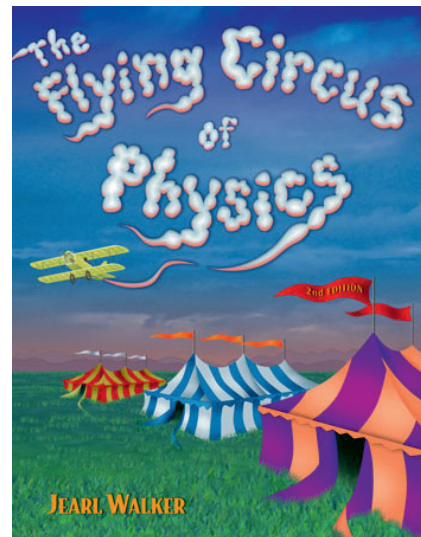
DLACZEGO NAPISAŁEM TĘ KSIĄŻKĘ

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 nauczania 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 najslabsi, 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 *Wiley-PLUS* — 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 podstawowo-

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.

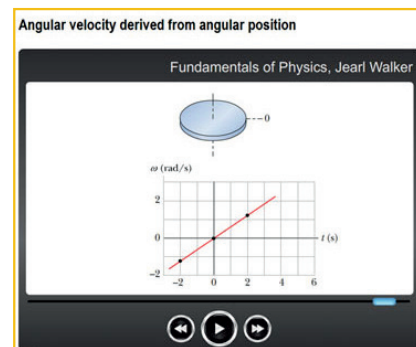
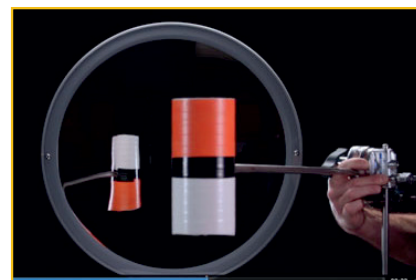
Pomoc online Platforma *WileyPLUS* zawiera nie tylko program do oceniania studentów online. Jest to dynamiczne centrum kształcenia, gdzie można znaleźć między innymi szczegółowe omówienie rozwiązań wielu zadań, quizy sprawdzające zrozumienie studiowanego materiału, animacje, setki przykładów, wiele symulacji 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.

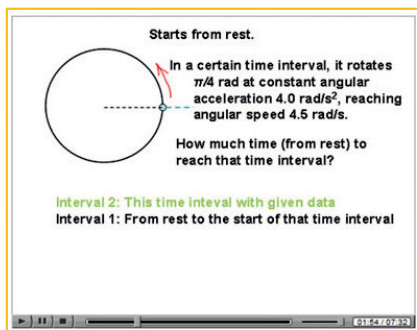
Tysiące takich elementów pomocy online jest dostępnych w trybie 24/7, a korzystać z nich można powielokrotnie — tyle razy, ile tylko potrzeba. Jeśli więc na przykład student popadnie w kłopoty przy rozwiązaniu zadania domowego o godzinie 2 w nocy (co jest chyba typową godziną odrabiania przez studentów 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 najczęściej 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 formie tekstu z książki, jak i w formie 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

rowni 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.

GO Tutorial
Close

This GO Tutorial will provide you with a step-by-step guide on how to approach this problem. When you are finished, go back and try the problem again on your own. To view the original question while you work, you can just drag this screen to the side. (This GO Tutorial consists of 4 steps).

Step 1 : Solution Step 1 of GO Tutorial 10-30

KEY IDEAS:

(1) When an object rotates at constant angular acceleration, we can use the constant-acceleration equations of Table 10-1 modified for angular motion:

(1) $\omega = \omega_0 + \alpha t$

(2) $\theta - \theta_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$

(3) $\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha(\theta - \theta_0)$

(4) $\theta - \theta_0 = \frac{1}{2}(\omega_0 + \omega)t$

(5) $\theta - \theta_0 = \omega t - \frac{1}{2} \alpha t^2$

Counterclockwise is the positive direction of rotation, and clockwise is the negative direction.

(2) If a particle moves around a rotation axis at radius r , the magnitude of its radial (centripetal) acceleration a_r at any moment is related to its tangential speed v (the speed along the circular path) and its angular speed at that moment by

$a_r = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$

(3) If a particle moves around a rotation axis at radius r , the magnitude of its tangential acceleration a_t (the acceleration along the circular path) at any moment is related to angular acceleration α at that moment by

$a_t = r\alpha$

(4) If a particle moves around a rotation axis at radius r , the angular displacement through which it rotates is related to the distance s it moves along its circular path by

$s = r\Delta\theta$

GETTING STARTED: What is the radius of rotation (in meters) of a point on the rim of the flywheel?

Number Unit

exact number, no tolerance

Check Your Input

Step 2 : Solution Step 2 of GO Tutorial 10-30

What is the final angular speed in radians per second?

Number Unit

the tolerance is +/-2%

Check Your Input

Step 3 : Solution Step 3 of GO Tutorial 10-30

What was the initial angular speed?

Number Unit

exact number, no tolerance

Check Your Input

Step 4 : Solution Step 4 of GO Tutorial 10-30

Through what angular distance does the flywheel rotate to reach the final angular speed?

Number Unit

the tolerance is +/-2%

Check Your Input

Now that you know how to solve the problem, go back and try again on your own. Close

- **Rozwiązania symboliczne.** Każdy rozdział zawiera też zadania, w których odpowiedź nie jest liczbową, 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.

Ikonki 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 tutoriała 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 ikon przy numerach zadań.



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



Szczegółowe rozwiązanie jest dostępne w *Student Solutions Manual*



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



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 doświadczenia 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 (apletów 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 zapalem wyszukiwała ciekawe i niezwykle 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*

Fale elektromagnetyczne

33.1. FALE ELEKTROMAGNETYCZNE

Czego się nauczysz?

Po przestudiowaniu tego podrozdziału będziesz umiał...

33.01 umiejscowić w widmie elektromagnetycznym fale używane przez radiofonie i telewizję, promieniowanie podczerwone, światło widzialne, promieniowanie ultrafioletowe, promieniowanie rentgenowskie i promieniowanie gamma, podając relacje zachodzące między długościami fal z różnych zakresów;

33.02 opisać emisję fali elektromagnetycznej za pomocą nadajnika z obwodem LC i anteny;

33.03 posłużyć się wzorami wiążącymi indukcyjność L , pojemność C i częstość kołową ω , aby obliczyć częstotliwość ν i długość λ fali emitowanej przez nadajnik z obwodem LC ;

33.04 podać prędkość fali elektromagnetycznej w próżni (i w przybliżeniu w powietrzu);

33.05 wyjaśnić, dlaczego fale elektromagnetyczne mogą się rozchodzić bez ośrodka materialnego;

33.06 zastosować wzór, który wiąże prędkość fali elektromagnetycznej, odległość przebytą przez falę rozchodzącą się po linii prostej oraz czas potrzebny na pokonanie tej odległości;

33.07 posłużyć się wzorami, które wiążą częstotliwość fali ν , długość fali λ , okres T , częstość kołową ω i prędkość c ;

33.08 wyjaśnić, że fala elektromagnetyczna ma składową elektryczną i składową magnetyczną skierowane a) prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali, b) prostopadle do siebie nawzajem i c) opisywane przez fale sinusoidalne o tej samej częstotliwości i zgodnej fazie;

33.09 podać wzory, które opisują składową elektryczną i magnetyczną fali elektromagnetycznej, jako fale sinusoidalne o amplitudzie zależnej od położenia i czasu;

33.10 zastosować wzór wiążący prędkość światła c , stałą elektryczną ϵ_0 i stałą magnetyczną μ_0 ;

33.11 zastosować wzór, który w dowolnej chwili i dowolnym miejscu wiąże wartość pola elektrycznego E , wartość pola magnetycznego B oraz prędkość światła c ;

33.12 wyprowadzić wzór wiążący prędkość światła oraz stosunek amplitud pola elektrycznego E i pola magnetycznego B .

Podstawowe fakty

- Falę elektromagnetyczną tworzą drgające pola: elektryczne i magnetyczne.
- Fale elektromagnetyczne o różnych możliwych częstotliwościach tworzą widmo elektromagnetyczne. Światło widzialne jest niewielkim wycinkiem tego widma.
- Fala elektromagnetyczna rozchodząca się wzdłuż osi x składa się z pól elektrycznego \vec{E} oraz magnetycznego \vec{B} , których amplitudy zależą od współrzędnej x oraz czasu t :

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

oraz

$$B = B_m \sin(kx - \omega t),$$

gdzie E_m i B_m oznaczają odpowiednio amplitudy \vec{E} i \vec{B} .

- Prędkość dowolnej fali elektromagnetycznej w próżni jest dana wzorem

$$c = \frac{E}{B} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}},$$

gdzie E i B są wartościami pola elektrycznego i magnetycznego.

O fizyce

Wiek informacji, w którym żyjemy, niemal całkowicie opiera się na fizyce fal elektromagnetycznych. Chcemy czy nie, żyjemy w globalnej wiosce połączeni telefonami, telewizją i sieciami komputerowymi. Tak samo, nie-

zależnie od naszej woli, jesteśmy stale zanurzeni w polu elektromagnetycznym emitowanym przez nadajniki telewizyjne, radiowe i telefoniczne.

Nawet najwięksi wizjonerzy techniki jeszcze kilkadziesiąt lat temu nie śnili nawet o swobodnym przesyłaniu informacji między niezliczonymi urządzeniami mobilnymi, które można znaleźć nawet w najbardziej odległych zakątkach świata. Wyzwanie na dziś to wyobrażenie sobie, jak będzie wyglądać wymiana informacji za kolejne 40 lat. Jeżeli w ogóle chcemy zmierzyć się z tym zadaniem, powinniśmy zacząć od zrozumienia podstaw fizyki fal elektromagnetycznych, które występują w tak wielu różniących się właściwościami odmianach, że bywają poetycko nazywane *tęczą Maxwella*.

Tęcza Maxwella

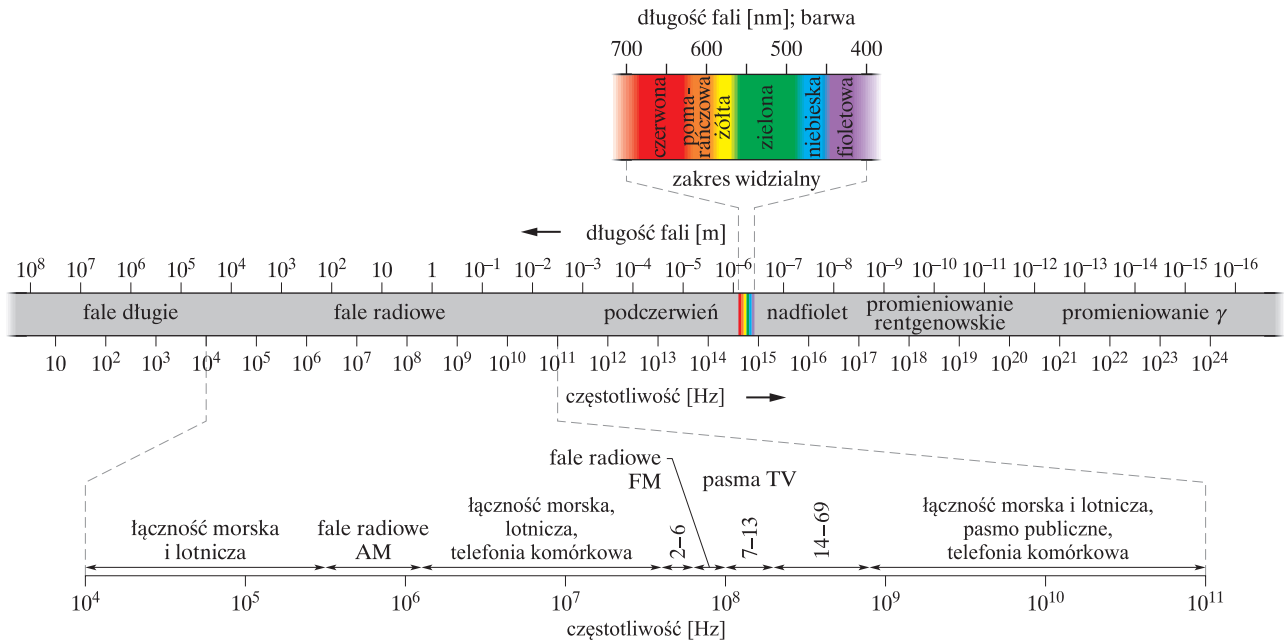
Ukoronowaniem osiągnięć Jamesa Clerka Maxwella (patrz rozdział 32) było pokazanie, że wiązka światła to rozchodząca się fala pól elektrycznego i magnetycznego — **fala elektromagnetyczna**, a tym samym, że optyka, która zajmuje się badaniem światła widzialnego, jest gałęzią elektromagnetyzmu. W tym rozdziale dokonamy przejścia od jednej do drugiej dziedziny — zamknijemy naszą dyskusję zjawisk ściśle elektrycznych i magnetycznych oraz stworzymy podstawy optyki.

Za czasów Maxwella (połowa XIX w.) jedynymi znanymi falami elektromagnetycznymi były: światło widzialne oraz promieniowanie podczerwone i nadfioletowe. Ale właśnie prace Maxwella zdopingowały Heinricha Hertza i doprowadziły go do odkrycia tego, co dzisiaj nazywamy falami radiowymi, i wykazania, że rozchodzą się one w laboratorium z prędkością taką samą jak światło.

Znamy szerokie *widmo* (albo zakres) fal elektromagnetycznych, zilustrowane na rysunku 33.1. Zastanówmy się, jak dalece jesteśmy zanurzeni w falach elektromagnetycznych z całego ich widma. Dominującym źródłem promieniowania, w którym wykształciliśmy się i do którego przystosowaliśmy się jako gatunek, jest Słońce. Ale tkwimy też w gęszczu sygnałów radiowych i telewizyjnych. Mogą dosięgać nas mikrofały z radarów i telefonicznych stacji przekątnikowych. Wokół są także fale wytwarzane w żarówkach, w nagranych silnikach samochodowych, w aparatach rentgenowskich, w lampach błyskowych, a także w zakopanych materiałach promieniotwórczych. Ponadto dociera do nas promieniowanie z gwiazd i innych obiektów naszej Galaktyki i z innych galaktyk. Fale elektromagnetyczne wędrują również w drugą stronę. Sygnały telewizyjne, wysłane z Ziemi około 1950 roku, niosą teraz wiadomości o nas (aczkolwiek *bardzo* nikle, a wśród nich epizody z serialu telewizyjnego *I Love Lucy*) do wszystkich mieszkańców kosmosu, niezależnie od stopnia technicznego zaawansowania ich cywilizacji, na każdej z planet, które mogłyby okrążyć którąś z najbliższych 400 gwiazd.

Każda podziałka na skali długości fali (rys. 33.1) i związanej z nią skali częstotliwości odpowiada kolejnej potęgze liczby 10. Skala nie ma końców, nie ma bowiem żadnego naturalnego ograniczenia długości fali elektromagnetycznej z żadnej ze stron.

Na rysunku 33.1 niektóre zakresy widma fal elektromagnetycznych opatrzone są znajomymi etykietkami, jak np. *promieniowanie rentgenow-*

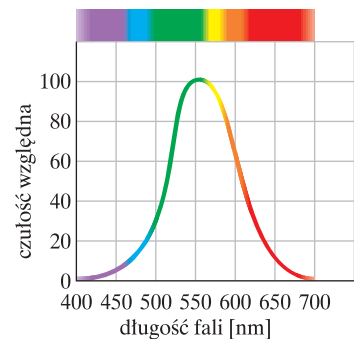


Rys. 33.1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego

skie i fale radiowe. Te etykiety odnotowują z grubsza zdefiniowane zakresy długości fali, w których powszechnie używa się pewnych, określonych źródeł i detektorów fal elektromagnetycznych. Inne zakresy na rysunku 33.1, jak np. te oznaczone jako zakresy radiowe bądź telewizyjne, reprezentują określone długości pasm przypisanych prawnie do celów komercyjnych bądź innych zastosowań. W widmie elektromagnetycznym nie ma przerw i wszystkie fale elektromagnetyczne, niezależnie od tego, do jakiego zakresu widma należą, rozchodzą się w próżni (w przestrzeni kosmicznej) z taką samą prędkością c .

Dla nas szczególnie interesującym zakresem widma jest oczywiście zakres widzialny. Na rysunku 33.2 zilustrowano względną czułość ludzkiego oka na światło o różnych długościach fali. Środek obszaru widzialnego znajduje się przy ok. 555 nm, czemu odpowiada wrażenie, które zwiemy barwą żółtozieloną.

Granice obszaru widzialnego nie są dobrze zdefiniowane, gdyż krzywa czułości oka dąży do zera zarówno po stronie fal dłuższych, jak i po stronie krótszych. Jeżeli na przykład przyjmiemy, że granicę taką stanowi poziom, przy którym czułość oka spada do 1% jej wartości maksymalnej, to granice te wynoszą wtedy 430 nm i 690 nm; oko może również wykrywać fale elektromagnetyczne o długościach fali nieco wykraczających poza te granice, jeżeli ich natężenia są dostatecznie duże.

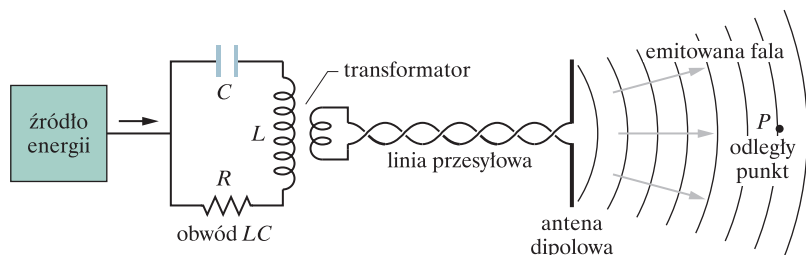


Rys. 33.2. Względna czułość przeciętnego ludzkiego oka na fale elektromagnetyczne o różnej długości. Ta część widma promieniowania elektromagnetycznego, na którą czułe jest ludzkie oko, nosi nazwę zakresu widzialnego

Rozchodzenie się fali elektromagnetycznej. Opis jakościowy

Niektóre fale elektromagnetyczne, między innymi promieniowanie rentgenowskie (promienie X), promieniowanie γ i światło widzialne, są wysyłane (emitowane) przez źródła o rozmiarach atomowych albo jądrowych,

Rys. 33.3. Układ do wytwarzania fali elektromagnetycznej z zakresu krótkich fal radiowych: obwód LC wytwarza sinusoidalnie zmienny prąd w antenie, która emituje falę. P jest odległym punktem, w którym detektor rejestruje falę



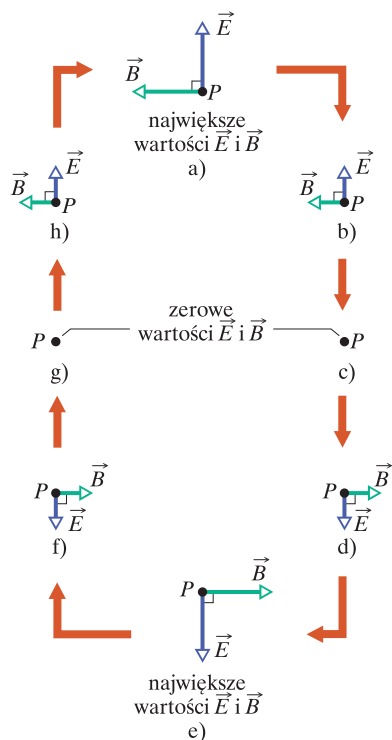
którymi rządzą prawa fizyki kwantowej. Zajmiemy się jednak na razie sposobem wytwarzania innych fal elektromagnetycznych. Dla uproszczenia ograniczymy się do zakresu widma ($\lambda \approx 1$ m), dla którego źródło promieniowania (fal emitowanych) ma zarówno makroskopowe, jak i rozsądne rozmiary.

Na rysunku 33.3 przedstawiono szkicowo wytwarzanie takich fal. Sercem urządzenia jest *obwód drgający LC* o częstości kołowej ω ($= 1/\sqrt{LC}$). Ładunki i prądy w takim obwodzie zmieniają się sinusoidalnie w czasie z tą częstością (por. rys. 31.1). Musi przy tym istnieć zewnętrzne źródło energii — na przykład generator prądu zmiennego — które dostarcza energii, kompensując straty związane zarówno z wydzielaniem ciepła w obwodzie, jak i z unoszeniem przez falę elektromagnetyczną energii na zewnątrz.

Obwód LC z rysunku 33.3 jest sprzężony przez transformator i linię przesyłową z *anteną*, której zasadniczym elementem są dwa cienkie pręty przewodzące. Dzięki temu sprzężeniu sinusoidalnie zmieniający się w obwodzie prąd wywołuje sinusoidalne oscylacje ładunku w prętach anteny z częstością kołową ω obwodu LC . Również związany z tym ruchem ładunków prąd powstający w prętach anteny zmienia sinusoidalnie, z częstością kołową ω , swój kierunek i natężenie. Antena staje się dipolem elektrycznym, którego elektryczny moment dipolowy zmienia się sinusoidalnie co do wartości i jest skierowany wzdłuż anteny.

Wartość i zwrot wektora momentu dipolowego ulegają zmianom, wobec tego zmienia się również zwrot i wartość wektora natężenia pola elektrycznego wytwarzanego przez dipol. Jednocześnie zmienia się też zwrot i wartość wektora indukcji pola magnetycznego, które wytwarzane jest przez zmienny prąd. Jednak zmiany wektorów pól elektrycznego i magnetycznego nie występują wszędzie w tej samej chwili — zmiany te rozchodzą się od anteny z prędkością światła c . Zmienne pola tworzą wspólnie falę elektromagnetyczną, która oddala się od anteny z prędkością c . Częstość kołowa ω tej fali jest taka sama, jak częstość kołowa drgań w obwodzie LC .

Fala elektromagnetyczna. Na rysunku 33.4 pokazano, jak zmieniają się w czasie natężenie pola elektrycznego \vec{E} i indukcja pola magnetycznego \vec{B} przy przechodzeniu fali o określonej długości przez odległy punkt P (rys. 33.3); w każdym miejscu rysunku 33.4 fala rozchodzi się od płaszczyzny kartki w naszą stronę. (Odległy punkt na rysunku 33.3 wybraliśmy dlatego, aby można było zaniedbać przedstawioną na tym rysunku krzywiznę czoła fali. Falę w dużej odległości od anteny można uznać za *falę płaską*, co znacznie upraszcza jej opis). Zwróćmy uwagę na kilka waż-



Rys. 33.4. a)–h) Zmiany natężenia pola elektrycznego \vec{E} i indukcji pola magnetycznego \vec{B} w odległym punkcie P z rysunku 33.3 w ciągu jednego okresu fali elektromagnetycznej. Fala biegnie od płaszczyzny kartki w naszym kierunku. Oba wektory pola zmieniają sinusoidalnie swoje kierunki i wartości. Zauważ, że są one zawsze prostopadłe wzajemnie do siebie oraz do kierunku rozchodzenia się fali

nych cech pól przedstawionych na rysunku 33.4, które występują zawsze, niezależnie od tego, jak powstaje fala:

1. Wektory \vec{E} i \vec{B} są zawsze prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Zatem, tak jak wyjaśnialiśmy w rozdziale 16, fala elektromagnetyczna jest *falą poprzeczną*.
2. Wektor natężenia pola elektrycznego jest zawsze prostopadły do wektora indukcji pola magnetycznego.
3. Iloczyn wektorowy $\vec{E} \times \vec{B}$ zawsze wyznacza kierunek rozchodzenia się fali.
4. Natężenie pola elektrycznego i indukcja pola magnetycznego zmieniają się zawsze sinusoidalnie, tak jak w przypadku fal poprzecznych, które omawialiśmy w rozdziale 16. Ponadto wektory pól zmieniają się z taką samą częstotliwością, a ich oscylacje są *zgodne w fazie*.

Zgodnie z podanymi właściwościami, możemy przyjąć, że fala elektromagnetyczna, która dociera do punktu P , rozchodzi się w dodatnim kierunku osi x . Oznacza to, że na rysunku 33.4 wektor natężenia pola elektrycznego oscyluje równolegle do osi y , wektor indukcji pola magnetycznego zaś — równolegle do osi z (w prawoskrętnym układzie współrzędnych). W tej konwencji możemy zapisać natężenie pola elektrycznego i indukcję pola magnetycznego jako sinusoidalne funkcje położenia x (wzdłuż kierunku rozchodzenia się fali) i czasu t :

$$E = E_m \sin(kx - \omega t), \quad (33.1)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t), \quad (33.2)$$

w których E_m i B_m są amplitudami E i B , natomiast ω i k oznaczają odpowiednio, jak w rozdziale 16, częstość kołową i liczbę falową fali. Z podanych równań wynika nie tylko, że oba pola tworzą falę elektromagnetyczną, ale także, że każde z nich tworzy własną falę. Wzór (33.1) opisuje *składową elektryczną* fali elektromagnetycznej, a wzór (33.2) — jej *składową magnetyczną*. W dalszej części rozdziału wyjaśnimy, że obydwie składowe nie mogą istnieć niezależnie od siebie.

Prędkość fali. Wiemy ze wzoru (16.13), że prędkość rozchodzenia się fali jest równa ω/k . Jednak w przypadku fali elektromagnetycznej, jej prędkość (w próżni) przyjęło się oznaczać symbolem c , zamiast używanego zwykle symbolu v . W następnym podrozdziale przekonamy się, że prędkość c jest równa

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (\text{prędkość fali}) \quad (33.3)$$

i wynosi około $3,0 \cdot 10^8$ m/s. Oznacza to, że:



Wszystkie fale elektromagnetyczne, w tym również światło widzialne, rozchodzą się w próżni z taką samą prędkością c .

Przekonamy się również, że prędkość fali c jest związana z amplitudami E_m i B_m zależnością

$$\frac{E_m}{B_m} = c \quad (\text{stosunek amplitud}). \quad (33.4)$$

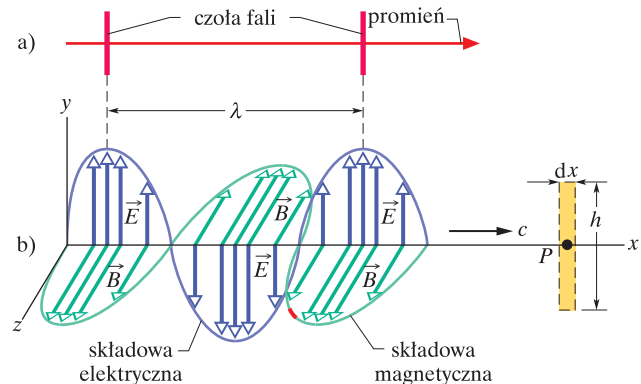
Jeżeli podzielimy przez siebie stronami równania (33.1) i (33.2), a następnie do otrzymanego wyniku podstawimy wzór (33.4), to okaże się, że wartości E i B są zawsze, w każdej chwili i w każdym punkcie, związane ze sobą zależnością

$$\frac{E}{B} = c \quad (\text{stosunek wartości}). \quad (33.5)$$

Promień i czoła fal. Falę elektromagnetyczną możemy przedstawić jak na rysunku 33.5a, rysując jej *promień* (prostą pokazującą kierunek i zwrot rozchodzenia się fali) albo *czoła fali* (umowne powierzchnie, na których wartość natężenia pola elektrycznego jest taka sama), albo obydwie te elementy. Odległość pomiędzy dwoma czołami fali na rysunku 33.5a jest równa jednej długości fali $\lambda (= 2\pi/k)$. (Fale rozchodzące się w przybliżeniu w tym samym kierunku tworzą *wiązkę*, na przykład wiązkę laserową, którą również można przedstawić za pomocą promienia).

Rysowanie fali. Falę możemy również przedstawiać w postaci takiej, jak na rysunku 33.5b, która jest „migawkowym zdjęciem” wektorów natężenia pola elektrycznego i indukcji pola magnetycznego w określonej chwili. Obwiednie łączące końce wektorów odpowiadają sinusoidalnym drganiom opisywanym przez wzory (33.1) i (33.2); składowe \vec{E} i \vec{B} fali są zgodne w fazie i wzajemnie prostopadłe, a także prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali.

Interpretacja rysunku 33.5b wymaga jednak pewnej ostrożności. Podobne rysunki, dla fali poprzecznej biegnącej w linii, które omawialiśmy w rozdziale 16, obrazowały odchylenia odcinków liny w górę i w dół spowodowane rozchodzeniem się w niej fali (*coś rzeczywiście się poruszało*). Natomiast rysunek 33.5b jest bardziej abstrakcyjny. W chwili ilustrowanej przez rysunek wektory obu pól (elektrycznego i magnetycznego) mają w każdym punkcie wzdłuż osi x określoną wartość i kierunek (zawsze prostopadły do osi x). Postanowiliśmy te wielkości wektorowe obrazować w każdym punkcie przez parę strzałek i wobec tego dla różnych punktów musimy rysować strzałki o różnej długości, wszystkie skierowane na zewnątrz od osi x , tak jak kolce na łożysku rózgy. Ale strzałki pokazują tylko



Rys. 33.5. a) Fala elektromagnetyczna reprezentowana przez kierunek rozchodzenia się fali i dwa czoła fali; pokazane na rysunku czoła fali dzieli odległość równa jednej długości fali λ . b) Ta sama fala przedstawiona jako „migawkowe zdjęcie” wektorów jej pola elektrycznego \vec{E} i magnetycznego \vec{B} w punktach na osi x , wzdłuż której fala rozchodzi się z prędkością c . Gdy przechodzi ona przez punkt P , pola zmieniają się tak, jak pokazano to na rysunku 33.4. Składowa elektryczna fali to jej pole elektryczne, a składowa magnetyczna to jej pole magnetyczne. Prostokąt zaznaczony linią przerywaną wokół punktu P wykorzystamy, omawiając rysunek 33.6