

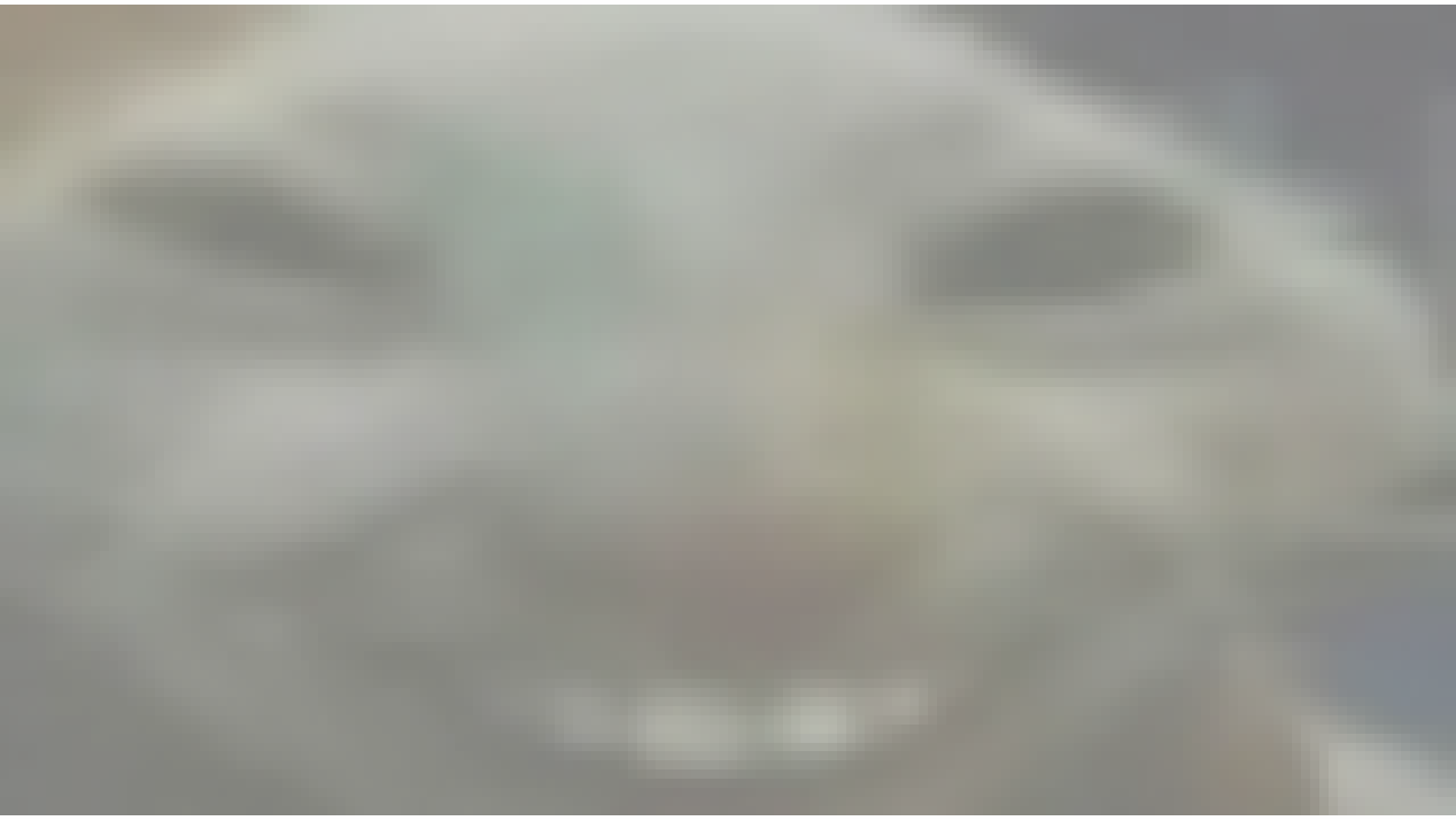
DLA ABSOLWENTÓW SZKÓŁ PODSTAWOWYCH

Zrozumieć fizykę 4

Podręcznik dla liceum ogólnokształcącego i technikum

Zakres rozszerzony

nowa era



Marcin Braun
Krzysztof Byczuk
Agnieszka Seweryn-Byczuk
Elżbieta Wójtowicz

Zrozumieć fizykę

podręcznik dla liceum ogólnokształcącego i technikum

4

Zakres rozszerzony

nowa era Twoje mocne strony

Zrozumieć fizykę

Podręcznik dopuszczony do użytku szkolnego przez ministra właściwego do spraw oświaty i wychowania i wpisany do wykazu podręczników przeznaczonych do kształcenia ogólnego do nauczania fizyki, na podstawie opinii rzeczoznawców: **prof. dr. hab. Aleksandra Filipa Żarneckiego, mgr Teresy Kutajczyk i prof. dr hab. Małgorzaty Święcickiej.**

Zakres kształcenia: rozszerzony
Etap edukacyjny: III
Typ szkoły: ponadpodstawowa (liceum ogólnokształcące i technikum)
Rok dopuszczenia: 2022

Numer ewidencyjny w wykazie MEiN: 1002/4/2022

Podręcznik został opracowany na podstawie *Programu nauczania fizyki w liceum ogólnokształcącym i technikum do zakresu rozszerzonego. Zrozumieć fizykę* autorstwa Agnieszki Seweryn-Byczuk, Krzysztofa Byczuka, Stanisława Suwalda i Zuzanny Suwald.

Nabyta przez Ciebie publikacja jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy o przestrzeganie praw, jakie im przysługują. Zawartość publikacji możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym, ale nie umieszczaj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, to nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. Możesz skopiować część publikacji jedynie na własny użytek.

Szanujmy cudzą własność i prawo. Więcej na www.legalnakultura.pl

© Copyright by Nowa Era Sp. z o.o. 2022
ISBN 978-83-267-4393-1

Konsultacje merytoryczne: Michał Matraszek.
Opracowanie redakcyjne i redakcja merytoryczna: dr Agnieszka Grzelińska.
Współpraca redakcyjna: Dorota Brzozowiec-Dek, Miłosz Budzyński. **Redakcja językowa:** Dorota Rzeszewska.
Korekta: Joanna Sawicka. **Fotoedycja:** Katarzyna Iwan-Malawska. **Nadzór artystyczny:** Kaia Pichler.
Opieka graficzna: Klaudia Jarocka-Ciok. **Projekt graficzny:** Klaudia Jarocka-Ciok.
Projekt okładki: Maciej Galiński. **Opracowanie graficzne:** Klaudia Jarocka-Ciok, Maciej Galiński, Marcin Oleksak, Ewa Kaletyn, Agata Muszalska, Wojciech Sendal (ekrany LCD), Marcin Ptak (tęcza).
Ilustratorzy: Ewelina Baran, Elżbieta Buczkowska, Joanna Ptak, Marcin Ptak, Wioleta Herczyńska, Andrzej Dukata, Zuzanna Dudzic, Laura Maziewska, Paulina Jarmusik, Paulina Podolska, Ewa Sowulewska, Klaudia Jarocka-Ciok, Rafał Buczkowski, Justyna Studzińska, Wojciech Sendal, Marcin Oleksak, Przemysław Kłosin, Adam Król. **Realizacja projektu graficznego:** Adam Poczciwek.

Rozdziały 17 i 18 zostały napisane z wykorzystaniem tekstów autorstwa Weroniki Śliwy, w tym z podręczników do zakresu podstawowego „Odkryć fizykę" (podstawa progr. 2012 r.) i „Odkryć fizykę" kl. 3 (podstawa progr. 2018 r.).

Podręcznik „Zrozumieć fizykę" cz. 4 został napisany z wykorzystaniem fragmentów tekstów autorstwa S. Bajtlika, A. i K. Byczuków, E. Wójtowicz.

Nowa Era Sp. z o.o.
Aleje Jerozolimskie 146 D, 02-305 Warszawa
www.nowaera.pl, e-mail: nowaera@nowaera.pl
Centrum Kontaktu: 58 721 48 00

Druk i oprawa: ArtDruk Kobyłka

Spis treści

O czym jest podręcznik 4

16. Fale elektromagnetyczne i optyka

16.1. Czym są fale elektromagnetyczne 6
16.2. Widmo fal elektromagnetycznych 12
16.3. Dyfrakcja i interferencja fal elektromagnetycznych 22
16.4. Siatka dyfrakcyjna 31
16.5. Odbicie i rozproszenie światła 38
16.6. Załamanie światła 43
16.7. Częściowe i całkowite wewnętrzne odbicie 52
16.8. Rozszczepienie światła 57
16.9. Soczewki 65
16.10. Obraz rzeczywisty tworzony przez soczewkę wypukłą 70
16.11. Obrazy pozorne tworzone przez soczewki 78
16.12. Obrazy tworzone przez zwierciadła – temat dodatkowy 83
16.13. Przyrządy optyczne – temat dodatkowy 93
16.14. Polaryzacja światła 98
Analiza tekstu. O tym, do czego służą „odblaski” 109
Wiesz, umiesz, zdasz 111

17. Fizyka atomowa i kwanty promieniowania elektromagnetycznego

17.1. Promieniowanie termiczne 124
17.2. Efekt cieplarniany 134
17.3. Zjawisko fotoelektryczne 141
17.4. Foton jako cząstka 148
17.5. Falowa natura materii 153
17.6. Widma emisyjne i absorpcyjne gazu . . 160
17.7. Model atomu Bohra – temat dodatkowy 167
17.8. Otrzymywanie promieni Röntgena 174
Projekt. Spektroskop 181
Wiesz, umiesz, zdasz 182

18. Fizyka jądrowa

18.1. Jądro atomowe 192
18.2. Reakcje jądrowe 197
18.3. Promieniowanie jądrowe 201
18.4. Czas połowicznego rozpadu 211
18.5. Masa a energia 217
18.6. Energia jądrowa 221
18.7. Energia syntezy termojądrowej 231
18.8. Ewolucja Słońca i innych gwiazd 236
18.9. Galaktyki i Wszechświat 243
Analiza tekstu. Jod ze Świerka dla pół miliona pacjentów tygodniowo 253
Wiesz, umiesz, zdasz 255

19. Elementy fizyki relatywistycznej

19.1. Czasoprzestrzeń 264
19.2. Czasoprzestrzeń w szczególnej teorii względności 271
19.3. Względność równoczesności 278
19.4. Więcej o teorii względności – temat dodatkowy 283
19.5. Energia całkowita 296
Analiza tekstu. Świat zdrowo zafalował . . . 299
Wiesz, umiesz, zdasz 301

Tabele 305
Spis doświadczeń obowiązkowych 308
Spis infografik 309
Spis dodatków matematycznych 309
Spis adresów pod kodami QR 309
Odpowiedzi i wskazówki do wybranych zadań 310
Indeks 317
Spis rozdziałów w pozostałych częściach 319

O czym jest podręcznik

W podręczniku *Zrozumieć fizykę 4* znajdziesz ważne i ciekawe informacje dotyczące optyki, fizyki atomowej i jądrowej oraz fizyki relatywistycznej. Dzięki tym wiadomościom zrozumiesz wiele zjawisk z otaczającego cię świata i sprawnie przejdziesz do kolejnych działów fizyki.



Czemu służą poszczególne elementy podręcznika

Przypomnij sobie

Łatwo się zorientujesz, co powinieneś wiedzieć z wcześniejszej edukacji.

Po tej lekcji powinieneś

Podsumowanie tematu podpowie ci, które treści są w nim najważniejsze.

$E = mc^2$

Dzięki czytelnym wyróżnieniom łatwo odnajdziesz wzory, definicje i ważne stwierdzenia.

Relatywistyczny pociąg...

Komentarze ułatwią ci zrozumienie informacji z tekstu głównego.

Przykład

Przykłady umożliwią ci prześledzenie toku rozumowania podczas rozwiązywania zadań.

Pytania i zadania

Wykonanie poleceń i zadań na końcu tematu pozwoli ci utrwalić zdobytą wiedzę i umiejętności.

Dodatek matematyczny

Dodatki matematyczne pomogą ci opanować lub przypomnieć sobie niezbędne umiejętności i wiadomości z matematyki.

Doświadczenie 1

Doświadczenie obowiązkowe

Czytelnie opisane i zilustrowane doświadczenia ułatwią ci przeprowadzanie i analizowanie eksperymentów. Doświadczenia obowiązkowe zostały wyraźnie oznaczone.

A to ciekawe

Dzięki ciekawostkom dowiesz się interesujących faktów związanych z lekcją.

Liczniki Geigera–Müllera, przez lata...

Treści, które w ramach tematu wykraczają poza podstawę programową, oznaczyliśmy w wyraźny sposób.



WIESZ, UMIESZ, ZDASZ

Podsumowanie

Na tych stronach znajdziesz najważniejsze wiadomości z danego rozdziału.

Sposób na zadanie

Wskazówki i podpowiedzi ułatwią ci rozwiązywanie różnych typów zadań.

Zadania powtórzeniowe

Dzięki tym zadaniom sprawdzisz stopień opanowania umiejętności i wiadomości z danego rozdziału.



16 Fale elektromagnetyczne i optyka

1. Czym są fale elektromagnetyczne
2. Widmo fal elektromagnetycznych
3. Dyfrakcja i interferencja fal elektromagnetycznych
4. Siatka dyfrakcyjna
5. Odbicie i rozproszenie światła
6. Załamanie światła
7. Częściowe i całkowite wewnętrzne odbicie
8. Rozszczepienie światła
9. Soczewki
10. Obraz rzeczywisty tworzony przez soczewkę wypukłą
11. Obrazy pozorne tworzone przez soczewki
12. Obrazy tworzone przez zwierciadła – temat dodatkowy
13. Przyrządy optyczne – temat dodatkowy
14. Polaryzacja światła

16.1. Czym są fale elektromagnetyczne

Przypomnij sobie

- W otoczeniu przewodnika, w którym płynie prąd, powstaje pole magnetyczne.
- Między prędkością v, długością λ, okresem T i częstotliwością f fali zachodzą następujące zależności: $v = \frac{\lambda}{T}$, $v = \lambda f$.
- Zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej zmiana strumienia pola magnetycznego przez ramkę z przewodnika powoduje powstawanie prądu indukcyjnego.
- Światło jest falą elektromagnetyczną, a barwa światła odpowiada jej częstotliwości.

W miarę rozwoju fizyki uczeni nie tylko odkrywają nowe prawa, lecz także porządkują wiedzę i dostrzegają wspólne przyczyny różnych znanych już zjawisk. Tak było z Newtonem, który za pomocą prawa powszechnego ciążenia wyjaśnił jednocześnie mechanizm ruchu ciał niebieskich, spadania ciał na Ziemi oraz pływów morskich.

Podobnie w latach sześćdziesiątych XIX w. szkocki fizyk James Clerk Maxwell opracował spójną teorię wyjaśniającą wszystkie znane wówczas zjawiska związane z elektrostatyką, prądem elektrycznym i elektromagnetyzmem.

Gdyby teoria Maxwella opisywała tylko prawa znane wcześniej, zasługą uczonego byłoby jedynie uporządkowanie wiedzy. Jednak od nowej teorii fizycznej oczekuje się, że pozwoli ona odkryć także nowe zjawiska. Teoria Maxwella spełniała to założenie, ponieważ dzięki niej odkryto nieznane wcześniej fale, które nazwano elektromagnetycznymi.

Co prawda jest ona zbyt skomplikowana od strony matematycznej, aby omawiać ją w szkole, mimo to przedstawimy niektóre jej elementy potrzebne do zrozumienia pojęcia fal elektromagnetycznych.



Rys. 16.1. Dziś nawet urządzenia w domu komunikują się za pomocą fal elektromagnetycznych

Transformator bez uzwojeń?

Zanim wyjaśnimy mechanizm powstawania fal elektromagnetycznych, przypomnijmy sobie, jak działa transformator:

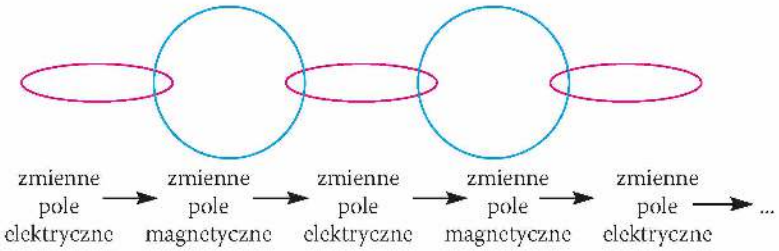
1. Prąd zmienny w uzwojeniu pierwotnym powoduje, że powstaje zmienne pole magnetyczne.

2. Zmienne pole magnetyczne jest przyczyną indukowania się zmiennego pola elektrycznego, dzięki czemu w uzwojeniu wtórnym przepływa prąd zmienny.

Z teorii Maxwella wynika, że analogiczne zjawiska zachodzą nawet wtedy, gdy nie ma przewodnika, w którym mógłby płynąć prąd. Wystarczy, że w przestrzeni istnieje zmienne pole elektryczne.
Na tej podstawie możemy sformułować dwa ogólne stwierdzenia.

> Zmienne pole elektryczne jest przyczyną powstawania pola magnetycznego. Zmienne pole magnetyczne jest przyczyną indukowania się pola elektrycznego.

Zatem jeśli gdziekolwiek w przestrzeni powstaje zmienne pole elektryczne, powoduje ono powstawanie pola magnetycznego, które na ogół jest zmienne. Z kolei zmienne pole magnetyczne powoduje powstawanie pola elektrycznego itd. Schematycznie przedstawia to rysunek 16.2.



Rys. **16.2.** Schemat powstawania fali elektromagnetycznej

W ten sposób zmienne pola magnetyczne i elektryczne mogą przenosić się na duże odległości. Mówimy, że w przestrzeni rozchodzi się **fala elektromagnetyczna**, nazywana również **promieniowaniem elektromagnetycznym**.

> Fala elektromagnetyczna (promieniowanie elektromagnetyczne) to rozchodzące się w przestrzeni okresowe zmiany zależnych od siebie pól: elektrycznego i magnetycznego.

Tak więc słowo „promieniowanie" jest pojęciem szerszym niż promieniowanie jądrowe i niekoniecznie oznacza coś szkodliwego. Światło widzialne także jest rodzajem promieniowania elektromagnetycznego.

Zmiana prędkości ładunku a emisja fal elektromagnetycznych

Z dotychczasowych rozważań dowiedziałeś się, że źródłem fali elektromagnetycznej jest zmiana pola elektrycznego lub magnetycznego. Zauważmy wobec tego, że gdy jakiekolwiek naładowane elektrycznie ciało zmienia swoją prędkość, powstaje fala elektromagnetyczna. Jak wiesz, poruszający się ładunek wytwarza pole magnetyczne, którego indukcja zależy od prędkości. Jeśli więc prędkość się zmienia, zmienia się także

indukcja pola. Nie jest przy tym konieczna zmiana wartości prędkości, wystarczy zmiana jej kierunku, np. w ruchu po okręgu.

> Zmiana wektora prędkości ładunku elektrycznego powoduje powstanie fali elektromagnetycznej.

Czasami wartość ładunku lub zmiany jego prędkości są na tyle niewielkie, że możemy pominąć straty energii związane z wytwarzaniem fal elektromagnetycznych. Takie założenie przyjęliśmy podczas omawiania ruchu naładowanej cząstki w polu elektrycznym oraz w jednorodnym polu magnetycznym w części 3. podręcznika. Jednak zarówno w tym rozdziale, jak i w następnym będziemy mieli do czynienia ze zjawiskami, dla których takie przybliżenie nie jest możliwe.

Temat 12.7, cz. III s. 117
Temat 14.4, cz. III s. 244

Prędkość fal elektromagnetycznych

Z teorii Maxwella wynika, że **w próżni fale elektromagnetyczne rozchodzą się z jednakową prędkością** niezależnie od długości, czy też częstotliwości. Prędkość tę można obliczyć ze wzoru:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

gdzie pod pierwiastkiem występują stałe znane nam z części 3. podręcznika, czyli:

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2} \text{ – przenikalność elektryczna próżni}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2} \text{ – przenikalność magnetyczna próżni}$$

Gdy do tego wzoru podstawimy wartości stałych i wykonamy obliczenia, przekonamy się, że prędkość fali elektromagnetycznej w próżni wynosi w przybliżeniu:

$$c \approx 300\,000\,000 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

$$[\varepsilon_0 \mu_0] = \frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2} \cdot \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2} = \frac{(\mathrm{As})^2}{\mathrm{m}^2} \cdot \frac{1}{\mathrm{A}^2} = \frac{\mathrm{s}^2}{\mathrm{m}^2}, \qquad [c] = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mathrm{s}^2}{\mathrm{m}^2}}} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Maxwell zauważył, że ta wielkość jest równa znanej już wówczas prędkości światła, więc opisana powyżej zbieżność nie może być przypadkowa. Uznał zatem, że **światło jest falą elektromagnetyczną**. Z jego rozważań wynikało ponadto, że istnieją także inne fale elektromagnetyczne, różniące się od światła długością.

W 1886 r. wnioski z teorii Maxwella zostały potwierdzone doświadczalnie przez Heinricha Hertza, który po raz pierwszy w historii wytworzył i zarejestrował w laboratorium fale elektromagnetyczne zaliczane obecnie do zakresu fal radiowych. A już 12 lat później na dachu Poczty Głównej w Londynie zainstalowano pierwszy nadajnik radiowy.

Prędkość fal elektromagnetycznych w ośrodkach

Często mamy do czynienia z falami elektromagnetycznymi rozchodzącymi się nie w próżni, ale w powietrzu. W tym przypadku ich prędkość jest nieco mniejsza i w pewnym stopniu zależy od częstotliwości fali. Są to jednak różnice tak niewielkie, że na ogół można je pominąć (patrz tabela 16.1). Nabierają one większego znaczenia, kiedy fala elektromagnetyczna rozchodzi się na przykład w wodzie. Światło porusza się w niej z prędkością o ok. 30% mniejszą niż w próżni, a różnica między jego prędkościami w wodzie dla różnych częstotliwości, czyli dla różnych barw, jest zauważalna. W lekcji 16.8 pokażemy, że właśnie dzięki tej różnicy światło rozszczepia się i tworzy tęczę.

Tabela 16.1. Prędkość światła w zależności od częstotliwości i ośrodka

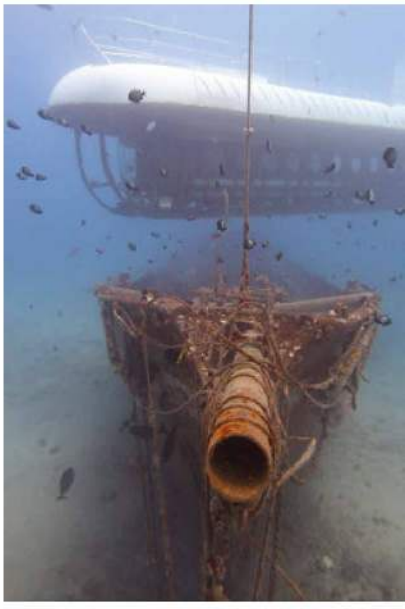
Częstotliwość fali [Hz]	Prędkość światła $\left[\frac{km}{s}\right]$		
	w próżni	w powietrzu	w wodzie
$7{,}5 \cdot 10^{14}$	299 792	299 708	223 176
$5{,}0 \cdot 10^{14}$	299 792	299 709	224 968
$4{,}3 \cdot 10^{14}$	299 792	299 710	225 374

Długość i częstotliwość fal elektromagnetycznych

Między długością λ, prędkością v i częstotliwością f fal elektromagnetycznych zachodzi ten sam związek co w przypadku fal mechanicznych:

$$v = \lambda f$$

Jak już powiedzieliśmy, fale elektromagnetyczne mogą mieć dowolną długość. Z jednej strony, np. długość fali elektromagnetycznej powstającej w wyniku drgań elektronów w domowej sieci prądu przemiennego ma częstotliwość równą częstotliwości zmian napięcia sieciowego, a więc 50 Hz. Zgodnie z podanym wyżej wzorem oznacza to, że taka fala ma długość 6000 km, czyli zbliżoną do promienia Ziemi. Z drugiej strony, promieniowanie gamma ze źródeł kosmicznych może mieć długość zaledwie 10^{-19} m, czyli 10 000 razy mniejszą niż promień protonu.



Rys. 16.3. Bardzo długie fale radiowe (λ > 3000 km) są pochłaniane przez wodę słabiej niż krótsze, dlatego znalazły zastosowanie w łączności z okrętami podwodnymi

Natężenie fali elektromagnetycznej

Każde źródło fali elektromagnetycznej można opisać za pomocą jego mocy, równej energii fali emitowanej przez to źródło w jednostce czasu. Dotyczy to też światła. Z codziennych obserwacji wiesz, że źródło światła wydaje się słabsze, gdy patrzymy na nie z daleka. Jest tak, ponieważ emitowana przez nie energia rozkłada się na większą powierzchnię. Jeśli chcemy np. określić, jak jasno lampa oświetla ścianę, nie wystarczy znać moc emitowanego przez nią światła. Istotne jest, jaka jego część oświetla daną powierzchnię, np. 1 m^2 ściany (rys. 16.4 na następnej stronie).



Rys. 16.4. Natężenie fali to energia fali padającej na 1 m² w ciągu sekundy

Tak określona wielkość to natężenie światła. Opisane zależności możemy ująć w następujący sposób:

$$I = \frac{P}{S}$$

gdzie: I – natężenie światła, P – moc światła, S – powierzchnia prostopadła do promieni świetlnych, na którą one padają.
Gdy skorzystamy z definicji mocy:

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

gdzie w naszym przypadku E to energia światła padającego w czasie t na powierzchnię S, otrzymamy zależność:

$$I = \frac{E}{S \cdot t}$$

Natężenie dźwięku, cz. II s. 267

Jak wiesz z części 2. podręcznika, ten sam wzór stosuje się do fal mechanicznych, w tym do fal dźwiękowych.

Jednostki związane z natężeniem światła

- **Natężenie światła** mierzymy w watach na metr kwadratowy $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.
- **Moc światła** emitowanego przez źródło mierzymy w watach [W].
  Przykładowo, tradycyjna żarówka o mocy 100 W i sprawności 5% emituje światło z mocą 5 W.

Powyższe jednostki nie odpowiadają naszej ocenie jasności, ponieważ ludzkie oko w różnym stopniu jest czułe na światło o różnej barwie. Dlatego wprowadzono wielkości uwzględniające te różnice. Nie obejmuje ich program nauczania, ale mogą ci się przydać przy zakupie żarówki albo projektowaniu oświetlenia.

- **Strumień świetlny** odpowiada mocy **źródła światła**. Jego jednostką jest lumen [lm].
  Strumień 1 lm jest wytwarzany przez źródło emitujące z mocą $\frac{4\pi}{683}$ W ≈ 18,4 mW światło o częstotliwości $5{,}4 \cdot 10^{14}$ Hz. Ta częstotliwość odpowiada największej czułości oka ludzkiego.
  Źródło światła o innej barwie (albo emitujące wiele barw), które także emituje 18,4 mW światła, wytwarza mniejszy strumień świetlny niż 1 lm.
  Np. świeczka: 1 lm, lampka na biurku: 800 lm, projektor kinowy w dużej sali: 50 000 lm.
- **Natężenie oświetlenia** charakteryzuje **oświetloną powierzchnię**. Jej jednostką jest luks [lx].
  Jeden luks to oświetlenie wywołane przez równomierny strumień światła o wartości jednego lumena padający na powierzchnię jednego metra kwadratowego 1 lx = 1 $\frac{lm}{m^2}$.
  Np. Ziemia w księżycową noc: 0,2 lx, stolik ucznia wg norm: 500 lx, Ziemia w słoneczne południe na równiku: 100 000 lx.

Po tej lekcji powinieneś

- wyjaśniać, jak powstaje i rozchodzi się fala elektromagnetyczna;
- stosować zależność między długością, prędkością i częstotliwością fali dla fal elektromagnetycznych;
- posługiwać się pojęciem natężenia fali elektromagnetycznej.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

W przewodzie płynie prąd zmienny o częstotliwości f, który powoduje powstawanie w powietrzu fali elektromagnetycznej o długości $\lambda = 1{,}5$ m. Oblicz częstotliwość prądu f.

Rozwiązanie

Częstotliwość prądu to inaczej częstotliwość drgań elektronów. Jest ona równa częstotliwości powstającej fali elektromagnetycznej. Aby obliczyć częstotliwość tej fali, skorzystamy ze wzoru: $v = \lambda f$. Prędkość v fali w powietrzu jest w praktyce równa jej prędkości w próżni, czyli c, co możemy zapisać jako: $c = \lambda f$.
Stąd po przekształceniu wzoru i podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$f = \frac{c}{\lambda} = 200 \text{ MHz}$$

Odpowiedź: Częstotliwość prądu wynosi 200 MHz.

1. Dlaczego wyładowaniu atmosferycznemu (piorunowi) albo przeskokowi iskry w źle zabezpieczonym urządzeniu elektrycznym towarzyszy trzask w głośniku radiowym lub w słuchawce telefonu?
2. W historycznym doświadczeniu Heinricha Hertza okres drgań układu wynosił jedną pięćdziesięciomilionową część sekundy. Jaka była długość emitowanej fali?
3. Światło porusza się w powietrzu nieco wolniej niż w próżni. Oblicz, o ile procent mniejsza jest to prędkość. Weź pod uwagę światło fioletowe o częstotliwości $7{,}5 \cdot 10^{14}$ Hz.

16.2. Widmo fal elektromagnetycznych

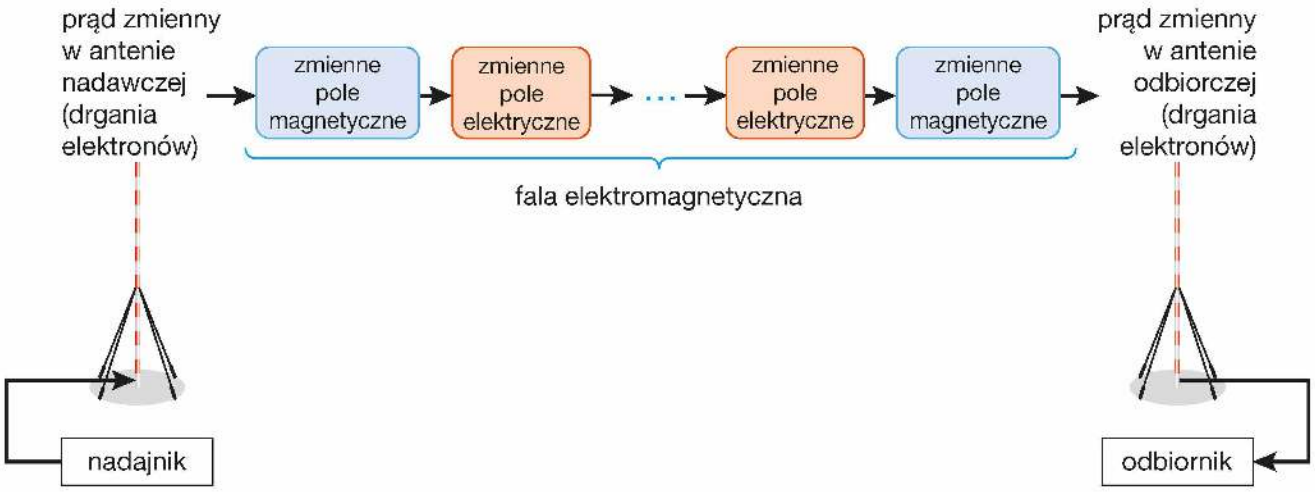
Przypomnij sobie

- Fala elektromagnetyczna to rozchodzące się w przestrzeni okresowe zmiany zależnych od siebie pól: elektrycznego i magnetycznego.
- Długość λ, częstotliwość f i prędkość v dowolnej fali spełniają zależność $v = \lambda f$.
- W próżni wszystkie fale elektromagnetyczne poruszają się z jednakową prędkością $c \approx 300\,000\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$, a w powietrzu tylko nieznacznie wolniej.

W tej lekcji przypomnimy, a także rozszerzymy znane ci ze szkoły podstawowej wiadomości na temat poszczególnych rodzajów fal elektromagnetycznych.
Musimy jednak pamiętać, że podział widma na poszczególne zakresy ma charakter umowny i nie wynika z podstawowych zasad fizyki.

Fale radiowe (ponad 1 mm)

Fale o największej długości (a więc najmniejszej częstotliwości) umownie określamy jako **fale radiowe**.
Jak sama nazwa wskazuje, są one wykorzystywane do łączności radiowej (w tym telewizyjnej i komórkowej). Częstotliwość fal radiowych jest na tyle mała, że można zbudować układ elektroniczny, który wytwarza prąd przemienny o takiej częstotliwości. Gdy płynie on w antenie, czyli gdy znajdujące się w niej elektrony poruszają się ruchem drgającym, powstaje fala elektromagnetyczna (rys. 16.5).



Rys. **16.5.** Schemat nadawania i odbierania fal radiowych

Zwróć uwagę na podobieństwo pomiędzy nadawaniem i odbieraniem fal radiowych a powstawaniem i słyszeniem dźwięku. W jednym i drugim przypadku źródłem fali są drgania, odpowiednio: elektronów w antenie nadawczej i ciała w powietrzu, np. struny. W obu przypadkach również przy odbiorze fali coś drga: odpowiednio elektrony w antenie odbiorczej i błona bębenkowa ucha.
Najkrótsze z fal radiowych (o częstotliwości $f > 1$ GHz) nazywamy **mikrofalami**. Stosujemy je do transmisji sygnału telewizyjnego i łączności komórkowej, a także w radarach (rys. 16.6).

W niektórych książkach mikrofal nie zalicza się do fal radiowych.

Zastosowania mikrofal

Radar składa się z nadajnika i odbiornika mikrofal. Wysłane promieniowanie po odbiciu od przedmiotu wraca i jest rejestrowane przez urządzenie, co pozwala wyznaczyć położenie otaczających go obiektów, a także – dzięki zjawisku Dopplera – ich prędkość. Najważniejszym zastosowaniem radaru jest pomoc w nawigacji.
Warto też wspomnieć o wykorzystaniu radarów w meteorologii, np. do wykonywania pomiarów potrzebnych przy prognozowaniu burz i trąb powietrznych.

Zjawisko Dopplera, cz. II s. 255



Rys. 16.6. Radar służy także do pomiaru prędkości

Mikrofal używamy także w kuchenkach mikrofalowych. Energia mikrofal jest zamieniana na energię wewnętrzną, co powoduje zwiększenie temperatury potrawy. Wprawdzie fale w kuchence mają częstotliwość podobną do fal stosowanych w telefonii komórkowej, jednak muszą mieć znacznie większą moc. Dlatego wytwarza się je nie za pomocą przedstawionego nadajnika (rys. 16.5), ale **magnetronu**. W tym urządzeniu elektrony są wybijane z rozgrzanego metalu przez ruchy termiczne, a następnie rozpędzane w polu elektrycznym. Tor ich ruchu jest zakrzywiany przez siłę Lorentza, a jak już wiesz, krzywoliniowy ruch ładunku elektrycznego powoduje powstawanie fali elektromagnetycznej.

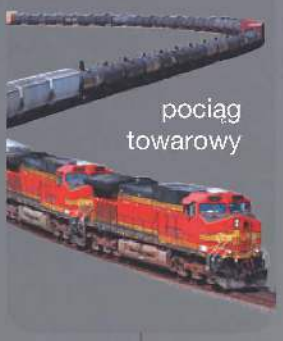
Podczerwień (od 780 nm do 1 mm)

Promieniowanie podczerwone to fale krótsze od mikrofal, ale dłuższe od światła widzialnego. Jak wiesz z części 3. podręcznika, każde ciało emituje promieniowanie cieplne, czyli promieniowanie elektromagnetyczne wywołane przez ruchy termiczne cząsteczek ciała. Im wyższa temperatura, tym wyższa częstotliwość promieniowania. Dla większości ciał, z którymi mamy do czynienia na co dzień, promieniowanie to należy właśnie do zakresu podczerwieni. Jest ona wykorzystywana w wielu urządzeniach do wykrywania ciał i wskazywania miejsc o temperaturze wyższej od otoczenia.

Podczerwień oznaczamy często skrótem *IR* (z ang. *infrared*).

WIDMO FAL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Własności i zastosowania fal elektromagnetycznych zależą od ich długości. Fale o wszystkich długościach tworzą widmo fal elektromagnetycznych. Fale o długościach mieszczących się w pewnych przedziałach mają swoje zwyczajowe nazwy. Na diagramie dla porównania przedstawiono obiekty o rozmiarach zbliżonych do długości fal z poszczególnych zakresów.









człowiek

pomarańcza

ziarenko maku

długość fali λ [m]

1000	100	10	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}

częstotliwość f [Hz]

10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}

FALE RADIOWE

DŁUGIE **ŚREDNIE** **UKF** **KRÓTKIE** **MIKROFALE**



transmisja radiowa



karty zbliżeniowe



rezonans magnetyczny



telefonia komórkowa



radar



kuchenka mikrofalowa

$\lambda = 780$ nm

$\lambda = 380$ nm

PROMIENIOWANIE WIDZIALNE

$f = 3{,}9 \cdot 10^{14}$ Hz

$f = 7{,}9 \cdot 10^{14}$ Hz

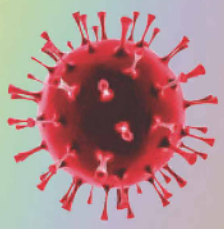
czerwona krwinka



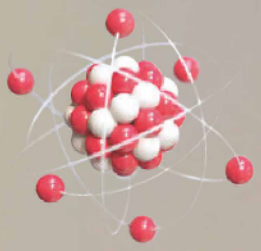
bakteria



wirus



atom

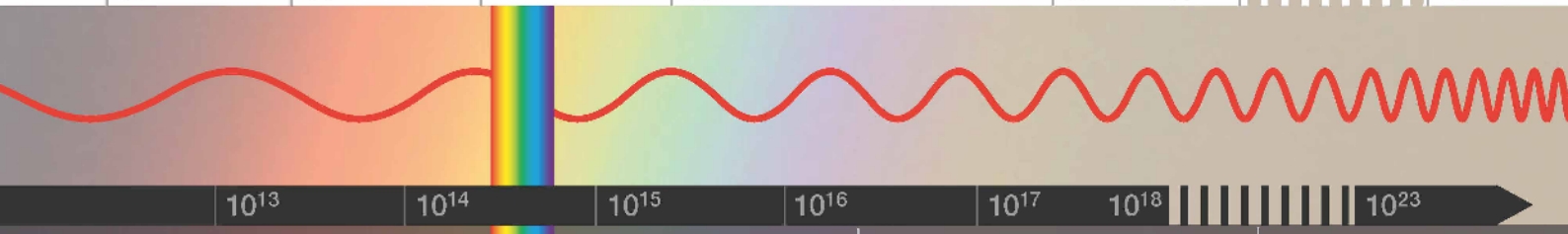


ziarenko piasku

cząsteczka

jądro atomowe

10^{-4} 10^{-5} 10^{-6} 10^{-7} 10^{-8} 10^{-9} 10^{-10} 10^{-15}



10^{13} 10^{14} 10^{15} 10^{16} 10^{17} 10^{18} 10^{23}

PROMIENIOWANIE PODCZERWONE



noktowizor



światłowód



pilot do telewizora

PROMIENIOWANIE NADFIOLETOWE



tester banknotów



solarium

PROMIENIOWANIE RENTGENOWSKIE



medyczne zdjęcie rentgenowskie



tomografia komputerowa



lotniskowy skaner bagażu

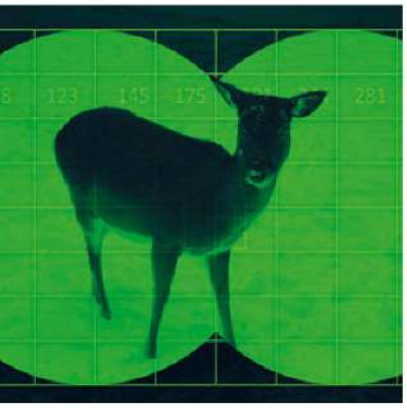
PROMIENIOWANIE GAMMA



medycyna nuklearna



konserwacja zabytków



Rys. 16.7. Przez noktowizor możemy obserwować zwierzęta nocą

W ten sposób można badać izolację cieplną budynku i znajdować miejsca, którymi ciepło ucieka do otoczenia, czy też prowadzić obserwacje w ciemności (rys. 16.7). W przypadku Słońca największe natężenie promieniowania przypada wprawdzie na światło widzialne, ponieważ jednak energia dostarczana przez naszą gwiazdę jest ogromna, więc jej część przypadająca na podczerwień też jest duża.
Istnieją również diody LED wytwarzające podczerwień zamiast światła widzialnego. Znajdziesz je w m.in. w pilotach do sprzętu audio-wideo.

Światło widzialne (od 380 nm do 780 nm)

Do widma fal elektromagnetycznych należy także światło (promieniowanie widzialne). Zajmuje ono niewielką część tego widma. W zależności od częstotliwości fal świetlnych widzimy je w różnych barwach. Światło czerwone ma najmniejszą częstotliwość fali, a fioletowe – największą. Światło białe to mieszanina fal o różnych częstotliwościach. W dalszych lekcjach przedstawimy dwa sposoby rozdzielenia światła białego na poszczególne zakresy częstotliwości (barwy): za pomocą siatki dyfrakcyjnej i za pomocą pryzmatu (s. 58).

Często określamy barwę światła poprzez jego długość fali. Trzeba pamiętać, że chodzi o długość fali **w próżni**. W dobrym przybliżeniu jest ona równa długości fali świetlnej w powietrzu, jednak na przykład w wodzie prędkość światła jest mniejsza, a więc też długość fali jest odpowiednio mniejsza. Nie obserwujemy jednak zmiany kolorów przedmiotów zanurzonych pod wodą, tak więc ściślejsze jest stwierdzenie, że barwa zależy od częstotliwości, niż że zależy ona od długości fali.
Dla człowieka światło jest głównym źródłem informacji o świecie. Otaczające nas przedmioty, które nie emitują światła, widzimy tylko dlatego, że odbite od nich światło trafia do naszych oczu.

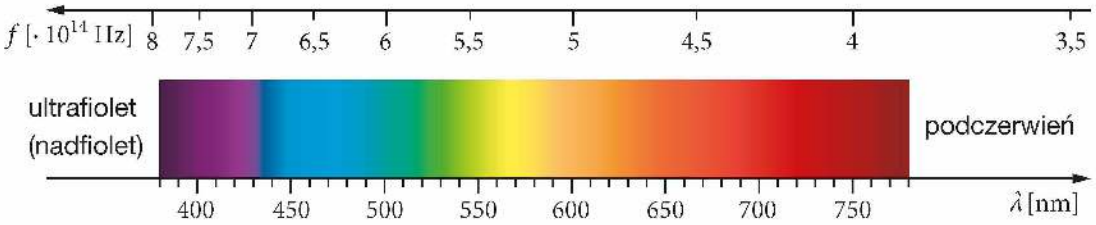
Światło widzialne zostało wyróżnione w widmie fal elektromagnetycznych nie ze względu na szczególne właściwości fizyczne, ale dlatego, że budowa ludzkiego oka umożliwia widzenie promieniowania mieszczącego się w tym właśnie zakresie częstotliwości.



A to ciekawe

Gazem odpowiedzialnym za pochłanianie promieniowania UV w atmosferze jest ozon, czyli trzyatomowy tlen O_3. Jego cząsteczki powstają z tlenu O_2 pod wpływem promieni słonecznych. W latach 80. XX w. odkryto, że zawartość ozonu w atmosferze zmniejsza się pod wpływem emitowanych do atmosfery przez człowieka związków chemicznych zwanych freonami. Co prawda związki te wycofano z użycia, jednak dziura ozonowa nie zniknęła. Największa jest nad Antarktydą z powodu jej małego nasłonecznienia.
Na zdjęciu: naukowcy wypuszczający balon do badania ozonu nad Antarktydą.

Gdybyśmy wyznaczali zakres światła widzialnego dla jakiejś grupy zwierząt, mogłoby się okazać, że ma ono inny zakres częstotliwości. Badania pokazują, że niektóre owady widzą także nadfiolet. Istnieją więc dla nich barwy, których my, ludzie, nigdy nie poznamy.



Rys. **16.8.** Widmo fal widzialnych (λ – długość fali w próżni)

Nadfiolet (od 10 nm do 380 nm)

Fale krótsze od fal fioletowych są dla nas niewidzialne i noszą nazwę nadfioletowych (ultrafioletowych, **UV**). Promieniowanie nadfioletowe stanowi znaczny procent promieniowania wysyłanego przez Słońce. Jednak do powierzchni Ziemi dociera jedynie jego niewielka część – większość jest pochłaniania przez ozon, znajdujący się w górnych warstwach atmosfery.
Promieniowanie nadfioletowe powoduje powstawanie opalenizny. Jest też konieczne do wytwarzania w organizmie witaminy D. Trzeba jednak pamiętać, że w nadmiarze trwale niszczy skórę, a co gorsza – powoduje uszkodzenia w jej materiale genetycznym prowadzące do nowotworów. Dlatego też należy chronić skórę wystawioną na działanie promieniowania UV, stosując kremy z odpowiednim filtrem.

Promieniowanie UV dzielimy czasem na UVA, UVB i UVC, według rosnącej częstotliwości i szkodliwości dla organizmu.

Nadfiolet powstaje także w świetlówkach. Pod wpływem wyładowań elektrycznych znajdujący się w takiej lampie gaz (zwykle pary rtęci) emituje promieniowanie ultrafioletowe. Jest ono pochłaniane przez luminofor – białą substancję pokrywającą bańkę od wewnątrz. Luminofor oddaje pochłoniętą energię w postaci światła widzialnego.
Wystarczy więc zbudować świetlówkę bez luminoforu, aby otrzymać lampę UV. Jej bańka nie może jednak być wykonana ze zwykłego szkła, które silnie pochłania nadfiolet. Wytwarza się ją ze szkła kwarcowego, które przepuszcza ten zakres fal. Stąd właśnie nazwa takiej lampy – lampa kwarcowa.

A to ciekawe

Nadfiolet jest szkodliwy także dla oczu. Okulary przeciwsłoneczne często produkuje się z tworzyw sztucznych, przepuszczających promieniowanie nadfioletowe, dlatego zazwyczaj są one wyposażone w filtr UV.
Przebywanie w ostrym słońcu w ciemnych okularach bez takiego filtra jest bardziej szkodliwe niż brak jakichkolwiek okularów: w słabszym świetle źrenice się rozszerzają i do oczu trafia więcej UV.



Lamp kwarcowych używamy do dezynfekcji pomieszczeń (np. w szpitalach i przychodniach) i przedmiotów (np. narzędzi medycznych), a także żywności. Za pomocą takich lamp sprawdza się też prawdziwość banknotów, zabezpieczonych znakami widocznymi po oświetleniu nadfioletem (rys. 16.9). Produkuje się również diody emitujące światło w zakresie nadfioletowym.



Rys. 16.9. W świetle UV widać elementy banknotów, które nie są widoczne w świetle widzialnym

Promienie Röntgena (od 1 pm do 10 nm)



Rys. 16.10. Zdjęcie rentgenowskie stomatologiczne

Promieniowanie rentgenowskie (promieniowanie X) zostało odkryte pod koniec XIX w. i niemal natychmiast znalazło zastosowanie w medycynie (rys. 16.10) i w inżynierii materiałowej. Ze względu na małą długość fali promieniowanie X może oddziaływać z pojedynczymi atomami, co pozwala badać wewnętrzną strukturę materiałów lub tkanek organizmu. Po przejściu przez badaną substancję promieniowanie jest kierowane na kliszę fotograficzną, na której tworzy się obraz, tak jak to się dzieje w przypadku zwykłego zdjęcia. W nowoczesnych urządzeniach kliszę zastąpiono światłoczułą matrycą (podobnie jak w cyfrowym aparacie fotograficznym). Dlatego najczęściej po prześwietleniu otrzymujemy w przychodni nie zdjęcie, ale płytę CD z otrzymanym obrazem. Promieniowanie rentgenowskie jest szczególnie szkodliwe dla szybko dzielących się komórek, np. dla płodów. Dlatego kobietom w ciąży nie powinno się wykonywać prześwietleń, jeżeli nie jest to konieczne, a gdy już zajdzie taka potrzeba, zdjęcie powinno zostać wykonane z zachowaniem szczególnych środków ostrożności.
Do promieniowania rentgenowskiego powrócimy w rozdziale „Fizyka atomowa i kwanty promieniowania elektromagnetycznego". Powiemy wtedy o sposobach jego wytwarzania.

Promieniowanie gamma (poniżej 1 pm)

W zakres promieniowania gamma wchodzą najkrótsze z fal elektromagnetycznych, o długości poniżej 10^{-12} m. Na ogół powstają one w przemianach jąder atomowych oraz w czasie ruchu przyspieszonego lub

zderzeń cząstek elementarnych w akceleratorach lub kosmosie. Badanie promieniowania gamma jest bardzo ważnym źródłem informacji o gwiazdach.
Promieniowanie gamma jest też wykorzystywane w medycynie. Służy m.in. do niszczenia komórek nowotworowych. Jego duża dawka jest szkodliwa dla zdrowia.
To bardzo przenikliwy typ promieniowania, co oznacza, że w bardzo małym stopniu jest ono pochłaniane przez przeszkody i trudno się przed nim osłonić. Powiemy o nim więcej w dalszej części podręcznika.

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać widmo fal elektromagnetycznych i wymieniać źródła fal w poszczególnych zakresach;
- wymieniać własności fal z poszczególnych zakresów widma;
- opisywać zastosowania fal z poszczególnych zakresów.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Obecnie programy radiowe są nadawane na falach o częstotliwościach od 88 MHz do 108 MHz. Oblicz, jaki zakres długości fal odpowiada temu przedziałowi częstotliwości.

2. Odczytaj z tabliczki znamionowej na kuchence mikrofalowej lub z instrukcji obsługi takiego urządzenia częstotliwość używanych w niej mikrofal. Oblicz długość tych fal.

3. Wykonaj doświadczenie.

a) Potrzebne będą: pilot do telewizora oraz aparat fotograficzny z wyświetlaczem, np. w telefonie komórkowym.

b) Włącz aparat fotograficzny i skieruj jego obiektyw na pilota w sposób pokazany na zdjęciu.

c) Wciskaj przyciski na pilocie i obserwuj ekran aparatu. Wyjaśnij zaobserwowane zjawisko.



OBSERWACJE W RÓŻNYCH ZAKRESACH FAL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Ciała niebieskie wysyłają promieniowanie w całym zakresie widma elektromagnetycznego. Obserwowanie nieba w różnych przedziałach częstotliwości fal elektromagnetycznych pozwala dostrzec to, czego nie widać w zakresie widzialnym. Na każdej z ilustracji przedstawiono całe niebo widziane z Ziemi (podobnie jak na mapie w kształcie elipsy przedstawia się powierzchnię Ziemi).

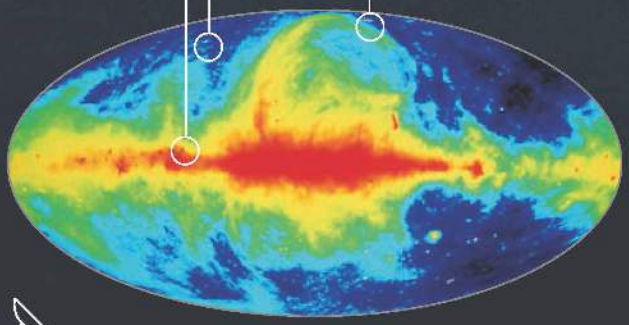
obserwacje prowadzone przez teleskop naziemny

obserwacje prowadzone za pośrednictwem satelity



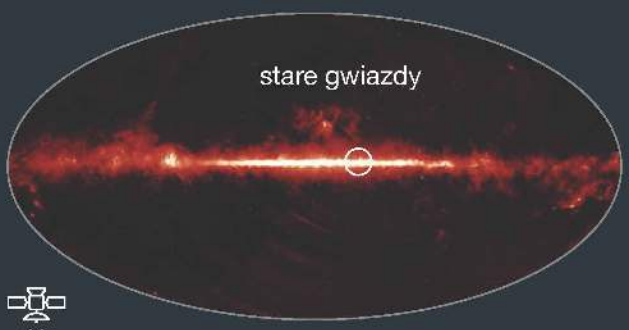
PROMIENIOWANIE WIDZIALNE

Obserwacje w świetle widzialnym są dla nas najbardziej naturalne, ale mają swoje ograniczenia. Przykładowo, obłoki międzygwiazdowego pyłu i gazu, pochłaniające światło gwiazd znajdujących się za nimi, skutecznie utrudniają obserwację dalekich obiektów.



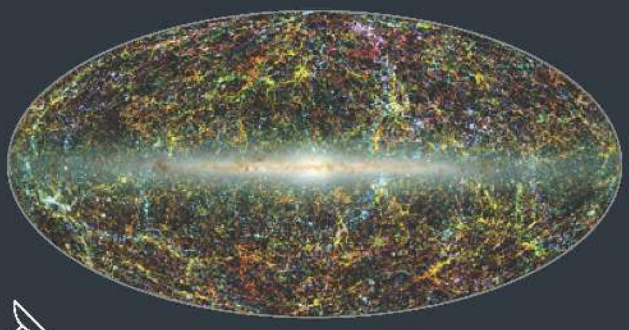
PROMIENIOWANIE RADIOWE 408 MHz

Dzięki falom radiowym, które przenikają przez obłoki pyłu przesłaniające nam widok w zakresie promieniowania widzialnego, możemy dostrzec obszary intensywnego formowania się gwiazd, pozostałości po wybuchach supernowych, kwazary oraz radiogalaktyki.



DALEKA I ŚREDNIA PODCZERWIEŃ

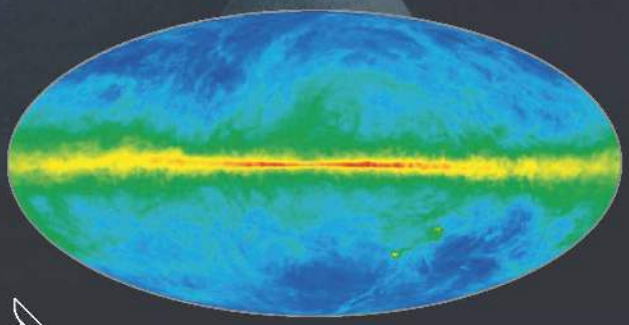
Jasne obszary w ramionach spiralnych to miejsca, gdzie rodzą się gwiazdy, ogrzewające pył i gaz, które wskutek tego emitują promieniowanie podczerwone. W najjaśniejszym obszarze Galaktyki (w zgrubieniu centralnym) gromadzą się stare gwiazdy.



BLISKA PODCZERWIEŃ

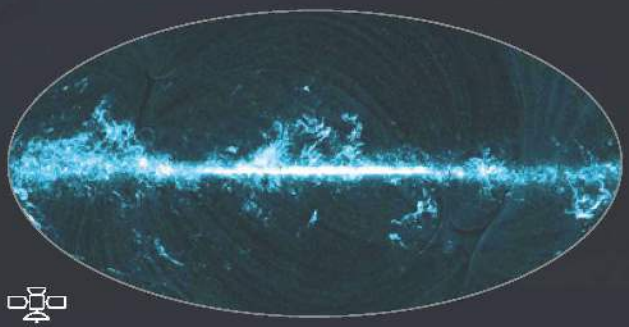
Pył jest przezroczysty i widać przez niego chłodne, małomasywne gwiazdy (zbyt zimne, aby mogły być wyraźnie obserwowane w świetle widzialnym) oraz odległe galaktyki.

Tylko część promieniowania elektromagnetycznego dociera do powierzchni Ziemi, reszta jest pochłaniana i rozpraszana przez atmosferę. Aby więc uzyskać pełny obraz Wszechświata, teleskopy umieszcza się nie tylko na powierzchni planety, lecz także na satelitach w przestrzeni kosmicznej.



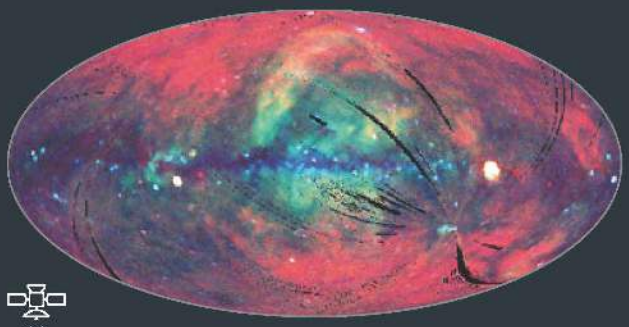
PROMIENIOWANIE RADIOWE 1420 MHz

Za pomocą obserwacji w tym zakresie uwidoczniono rozmieszczenie wodoru atomowego – najliczniejszego pierwiastka we Wszechświecie i głównego składnika gwiazd. Kolor czerwony wskazuje obszary, gdzie wodoru jest najwięcej. Na tej mapie nie widać gwiazd, a jedynie obłoki gazu rozciągające się wzdłuż płaszczyzny Galaktyki.



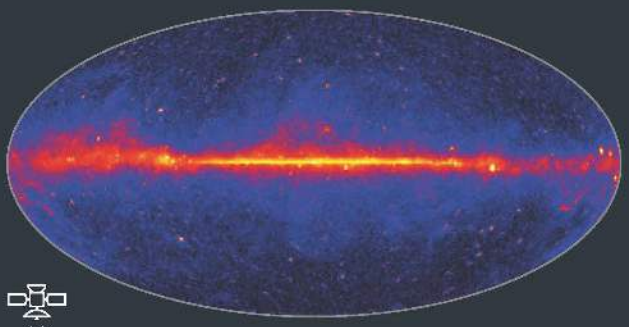
PROMIENIOWANIE MIKROFALOWE

Badania w zakresie mikrofal o częstotliwości 115 GHz pokazują rozmieszczenie chłodniejszego wodoru cząsteczkowego, czyli obszarów, w których rodzą się gwiazdy.



PROMIENIOWANIE RENTGENOWSKIE

W tym zakresie promieniowania są dobrze widoczne pozostałości po wybuchach supernowych i niektóre układy podwójne gwiazd. Kolor czerwony wskazuje obszary stosunkowo chłodne (o temperaturze ok. 100 tys. K). Kolorem białym wyróżniono miejsca, gdzie temperatura przekracza 20 mln K.



PROMIENIOWANIE GAMMA

Detekcja promieniowania gamma pozwala obserwować jego silne źródła, m.in. pulsary, aktywne jądra galaktyk oraz pozostałości po supernowych.

16.3. Dyfrakcja i interferencja fal elektromagnetycznych

Przypomnij sobie

- Dyfrakcja to ugięcie fali na przeszkodzie. Najłatwiej ją zaobserwować, gdy rozmiary przeszkody są porównywalne z długością fali.
- Dyfrakcję możemy wyjaśnić za pomocą zasady Huygensa.
- Interferencja fal to nakładanie się (superpozycja) fal pochodzących z różnych źródeł o jednakowych częstotliwościach.

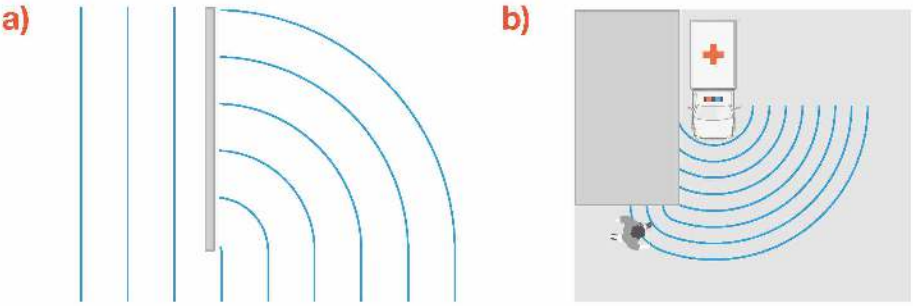


Rys. 16.11. Barwy bańki mydlanej powstają dzięki interferencji światła

W części 2. podręcznika (dział „Fale mechaniczne") pisaliśmy o dyfrakcji i interferencji fal mechanicznych. Zjawiska te zachodzą dla wszystkich rodzajów fal i – co ważne – tylko dla fal. Dlatego odkrycie dyfrakcji i interferencji światła zostało uznane za dowód jego falowej natury.

Dyfrakcja

Dyfrakcję (ugięcie) fal na wodzie można zaobserwować bezpośrednio (rys. 16.12a). W przypadku fal dźwiękowych to właśnie dzięki dyfrakcji możemy usłyszeć samochód, który znajduje się za rogiem. Jego dźwięk nie mógłby do nas dotrzeć, gdyby rozchodził się tylko po liniach prostych (rys. 16.12b).



Rys. 16.12. Dyfrakcja fal mechanicznych: a) fale na wodzie, b) fale dźwiękowe (widok z góry)

Dyfrakcję światła możemy zaobserwować m.in. wtedy, gdy:

- przechodzi ono przez bardzo wąską szczelinę,
- pada na równą krawędź (np. ostrze żyletki).

Dyfrakcję na szczelinie badaliśmy doświadczalnie w części 2. podręcznika dla fal mechanicznych. Dla światła zbadamy dyfrakcję na krawędzi przeszkody.



Uwaga. Pamiętaj, że nawet laser tak słaby jak umieszczony we wskaźniku laserowym może spowodować uszkodzenie lub nawet utratę wzroku, jeśli jego światło (bezpośrednio lub po odbiciu od jakiegoś przedmiotu) trafi do oka.

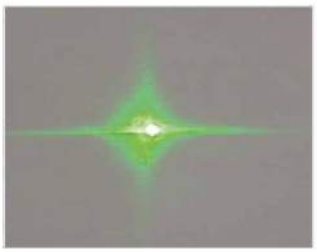
Doświadczenie 1

1. Przygotuj wskaźnik laserowy, kawałek folii aluminiowej o wymiarach ok. 5 cm × 2 cm i ekran. Ekranem może być jasna ściana. Doświadczenie najlepiej wykonać w zaciemnionym pomieszczeniu.
2. Zagnij kawałek folii i ustaw go w odległości ok. 30 cm od ekranu. Wskaźnik ustaw w jednej linii z kawałkiem folii w odległości ok. 60 cm od ekranu.
3. Skieruj światło wskaźnika na folię tak, aby padała na nią tylko część jego wiązki (zdjęcie a). Co obserwujesz na ekranie? Czy w całym obszarze zasłoniętym przez folię jest cień?

a)



b)



Gdy plamka światła częściowo padała na folię, a częściowo na ekran, na ekranie pojawiła się pozioma smuga światła. Co najciekawsze, była ona widoczna zarówno po jednej, jak i po drugiej stronie plamki (patrz zdjęcie b).

To dowodzi, że światło ulega dyfrakcji. Podobnie rzecz się ma z falami elektromagnetycznymi o innej długości, których nie będziemy jednak badać doświadczalnie, ponieważ wymaga to odpowiednich przyrządów.

Praktyczne znaczenie dyfrakcji

Dyfrakcja fal elektromagnetycznych ma duże znaczenie praktyczne. Na ogół jest dla nas zjawiskiem niekorzystnym, ponieważ ogranicza rozdzielczość przyrządów optycznych, czyli zdolność do rozróżniania za ich pomocą punktów znajdujących się blisko siebie. Dotyczy to zarówno sztucznych przyrządów, jak i przyrządu naturalnego, jakim jest ludzkie oko.

Kiedy widzimy oddalający się samochód, początkowo jego tylne światła są widoczne jako odrębne plamki. Następnie pojazd staje się pozornie coraz mniejszy, więc plamki się do siebie zbliżają – jednak ich rozmiar pozostaje ten sam, ponieważ wynika on z właściwości oka, a nie źródła światła. W pewnym momencie odległość między plamkami staje się mniejsza niż ich rozmiar i zamiast dwóch plamek widzimy jedną, nieco wydłużoną w poziomie. Z kolei gdy samochód się zbliża, najpierw widzimy jedną, a dopiero potem dwie plamy światła (rys. 16.13).

Analogicznie jest w przypadku aparatu fotograficznego, który – jak wiesz ze szkoły podstawowej – jest zbudowany podobnie do ludzkiego oka.

Podobne problemy ujawniają się podczas obserwacji za pomocą bardziej skomplikowanych przyrządów. Na przykład mikroskop optyczny nie pozwoli rozróżnić dwóch punktów oddalonych od siebie o znacznie mniej niż długość fali świetlnej. Dlatego za pomocą takiego mikroskopu nie możemy obserwować na przykład wirusów. W tym przypadku nie pomoże regulacja powiększenia – co najwyżej zobaczymy większą rozmytą plamę zamiast mniejszej.

Również w przypadku teleskopów dyfrakcja sprawia, że gwiazdy są widoczne jako plamki, których średnica nie ma nic wspólnego

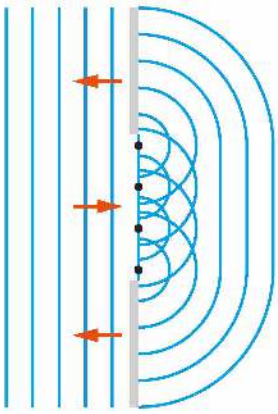


Rys. 16.13. Gdy samochód jest blisko, jego reflektory widać jako osobne źródła światła, a gdy jest daleko – jako jedną plamę światła

z rozmiarami prawdziwego ciała niebieskiego. Rozmycie obrazu wynika z dyfrakcji i może być zmniejszone dzięki zastosowaniu teleskopu o większym zwierciadle.

Zjawisko dyfrakcji powoduje także ograniczenie ilości informacji, które można zapisać na płytach CD i DVD. Dane (dźwięki, obrazy itd.) koduje się na nich za pomocą bardzo małych jasnych i ciemnych obszarów ułożonych w ścieżki i odczytuje za pomocą lasera. Odległość między ścieżkami nie może być znacznie mniejsza od długości fali, ponieważ dyfrakcja uniemożliwiłaby odczytywanie danych. To z kolei oznacza ograniczenie liczby ścieżek, a tym samym – pojemności dysku.

Aby na tej samej powierzchni zmieścić więcej informacji (na przykład film w wyższej rozdzielczości), musimy zmniejszyć szerokość ścieżki. W związku z tym w celu uniknięcia dyfrakcji musimy zamiast światła czerwonego, używanego w starszych typach odtwarzaczy, zastosować światło fioletowe, o mniejszej długości fali. Tak właśnie działają czytniki z fioletowym laserem, wykorzystywane w systemie BluRay.

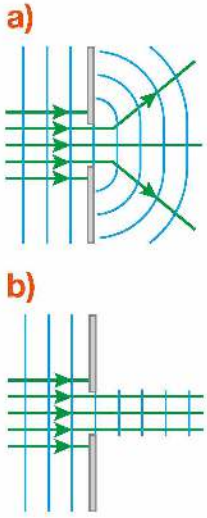


Rys. 16.14. Dyfrakcja fal elektromagnetycznych zachodzi zgodnie z zasadą Huygensa

Zasada Huygensa a dyfrakcja światła

Podobnie jak w przypadku fal mechanicznych, dyfrakcję światła można wyjaśnić za pomocą zasady Huygensa (czyt. hojhensa, rys. 16.14). Przypomnijmy jej brzmienie:

> Każdy punkt, do którego dochodzi fala, można traktować jako źródło wtórnej fali kulistej, rozchodzącej się z tego punktu.



Rys. 16.15. Przejście światła przez otwór: a) z uwzględnieniem dyfrakcji (optyka falowa), b) w przybliżeniu w optyce geometrycznej

Optyka geometryczna i falowa

Wszystko, co napisaliśmy do tej pory o dyfrakcji światła, wydaje się przeczyć codziennym obserwacjom i wiedzy ze szkoły podstawowej. Wiesz przecież, że światło rozchodzi się po liniach prostych i że za oświetlonym przedmiotem tworzy się cień. Jak ta wiedza ma się do wyniku doświadczenia 1.? Który ze schematów przechodzenia światła przez otwór (rys. 16.15) jest prawdziwy?

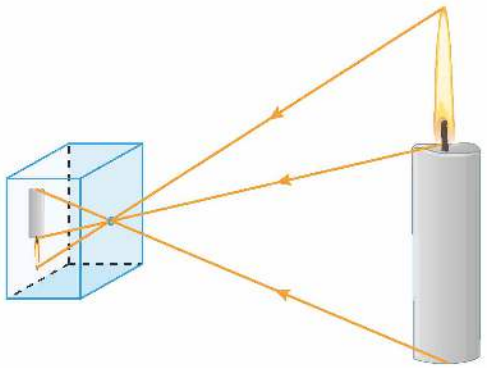
Ściśle mówiąc – tylko pierwszy. Jednak dyfrakcję światła obserwujemy stosunkowo rzadko. Powstawanie ostrych cieni za przedmiotami jest przybliżonym modelem rozchodzenia się światła (rys. 16.15b) w sytuacji, gdy rozmiar otworu jest znacznie większy od długości fali światła. Wtedy natężenie światła ugiętego jest tak małe, że można je pominąć.

W fizyce często korzystamy z uproszczonych modeli. Gdy badamy zachowanie się światła na soczewkach, pryzmatach i zwierciadłach, a także powstawanie cienia, możemy pominąć zjawiska falowe i założyć, że promienie rozchodzą się zawsze wzdłuż linii prostych.

Camera obscura

Przykładem zastosowania optyki geometrycznej w praktyce jest camera obscura (czyt. kamera obskura), czyli pudełko z otworem.

Otwór jest na tyle mały, aby można było przyjąć, że z każdego punktu przedmiotu dociera do niego tylko jeden promień światła, który oświetla tylko jeden punkt na ekranie z tyłu pudełka. W ten sposób z poszczególnych oświetlonych punktów powstaje obraz przedmiotu.



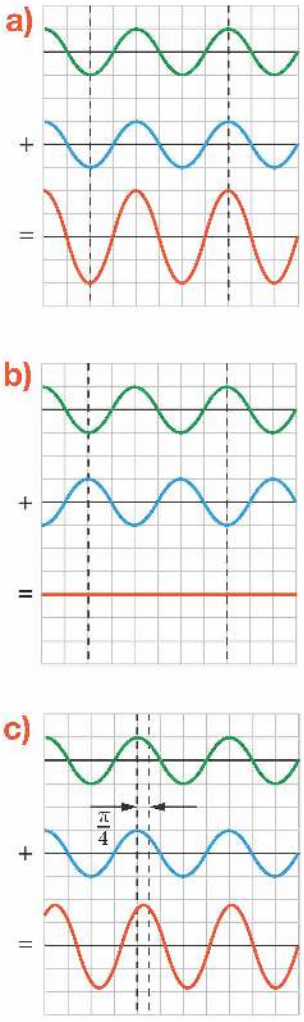
Im większy otworek, tym więcej światła wpada do pudełka. Obraz staje się wtedy jaśniejszy, ale mniej ostry. Im mniejszy jest otworek, tym obraz jest ciemniejszy, ale jednocześnie ostrzejszy. Dzieje się tak do czasu, gdy wielkość otworka osiągnie ok. 0,2–0,3 mm i dyfrakcja zaczyna odgrywać coraz większą rolę, a obraz ponownie staje się nieostry. W takim przypadku optyka geometryczna przestaje wystarczać do wyjaśnienia zjawiska.

Dział fizyki zajmujący się analizą biegu promieni światła zgodnie z tym modelem nazywamy **optyką geometryczną**. Z kolei badaniami falowej natury światła zajmuje się **optyka falowa**.

Interferencja

Przypomnijmy, że gdy dwie fale się spotkają, nakładają się na siebie. Nakładanie się fal o jednakowej częstotliwości, wysyłanych przez źródła, które mogą być albo zgodne w fazie, albo przesunięte w fazie, nazywamy **interferencją**. Możliwe są różne przypadki interferencji:

- Fale, które spotkają się w zgodnych fazach (grzbiet napotyka grzbiet, dolina napotyka dolinę), wzmacniają się (rys. 16.16a).
- Fale, które spotykają się w przeciwfazie (grzbiet napotyka dolinę), wygaszają się (rys. 16.16b).
- Fale spotykające się w innych fazach dają w sumie falę o amplitudzie pośredniej między zerem a $2A$, gdzie A jest amplitudą składanych fal (rys. 16.16c).



Rys. **16.16.** Interferencja dwóch fal: a) o zgodnej fazie, b) o przeciwnej fazie, c) przesuniętych w fazie o $\frac{\pi}{4}$

Zauważ: we wszystkich tych przypadkach zakładaliśmy, że różnica faz dwóch fal była stała przez cały czas obserwacji. Tak się rzeczywiście dzieje, gdy mamy do czynienia z dwiema idealnymi sinusoidami. Jak stwierdziliśmy doświadczalnie w części 2. podręcznika, czyste tony emitowane przez głośniki komputera są wystarczająco zbliżone do tego ideału, aby obserwować interferencję.

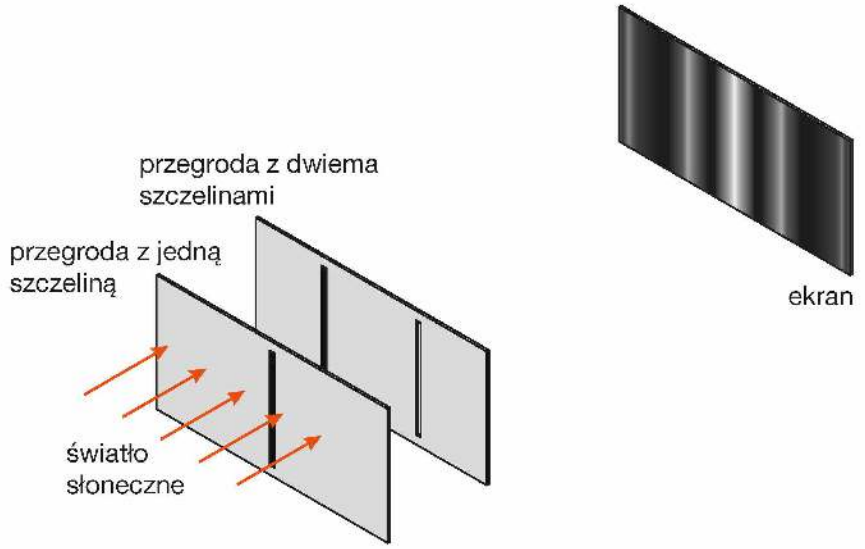
Inaczej jest ze światłem. W przypadku światła żarówki lub świetlówki mamy do czynienia z falami emitowanymi niezależnie przez różne atomy lub jony. Do przedmiotu oświetlonego światłem słonecznym docierają jednocześnie fale pochodzące z miejsc oddalonych od siebie o tysiące kilometrów. Nawet w ramach jednej barwy (a więc jednej częstotliwości światła) światło możemy wyobrażać sobie raczej w postaci

przypadkowo porozrywanych i posklejanych kawałków sinusoidy niż jako jedną sinusoidę. Mówimy, że takie światło jest **niespójne**. Uzyskanie światła **spójnego**, w którym różnica faz jest stała, jest trudnym do spełnienia warunkiem obserwowania interferencji.

Doświadczenie Younga

Falową naturę światła postulował w XVII w. Christiaan Huygens, ale dopiero w XIX w. została powszechnie przyjęta m.in. dzięki pracy Thomasa Younga.

W 1801 r. angielski fizyk i lekarz Thomas Young (czyt. tomas jang) wykazał doświadczalnie, że światło ma charakter falowy. Był to jeden z najważniejszych eksperymentów w dziejach fizyki.
W doświadczeniu przeprowadzonym przez Younga światło słoneczne padało najpierw na przesłonę z jedną szczeliną, potem na przegrodę z dwiema szczelinami, ustawioną równolegle do pierwszej przesłony, a następnie – na ekran (rys. 16.17).



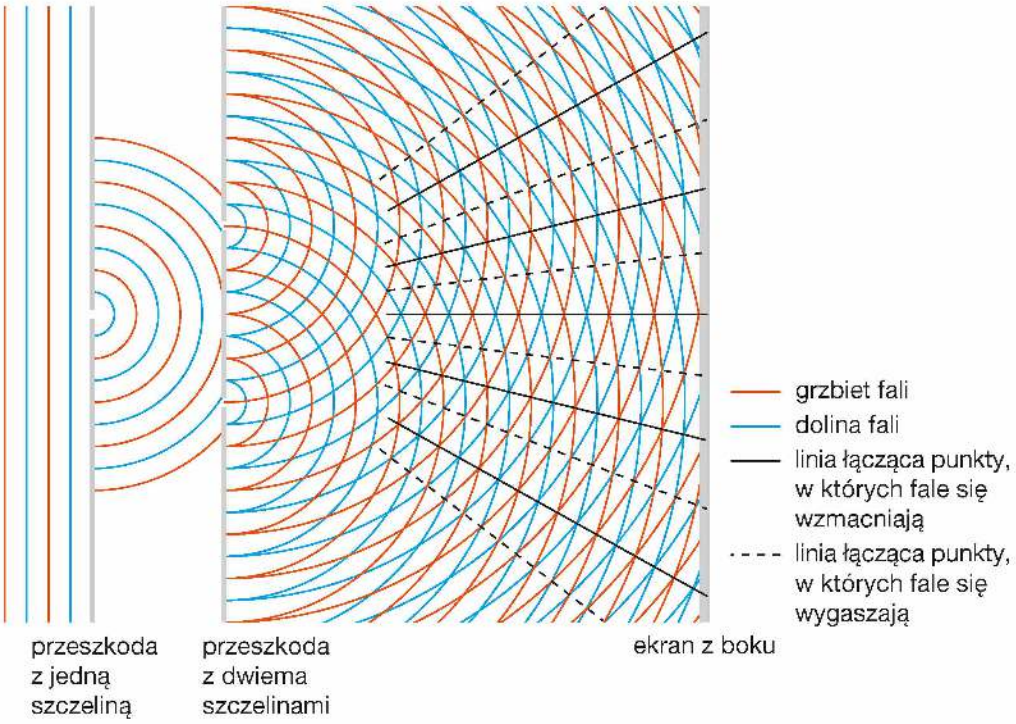
Rys. **16.17.** Układ doświadczalny eksperymentu Younga. W rzeczywistości szczeliny w drugiej przegrodzie były bardzo blisko siebie

Zgodnie z zasadami optyki geometrycznej ekran powinien pozostać ciemny, gdyż światło z pojedynczej szczeliny powinno padać na miejsce między szczelinami na drugiej przesłonie. Tak się jednak nie stało. Young zaobserwował, że na ekranie powstał obraz złożony z prążków, na przemian jasnych i ciemnych. Na dodatek najjaśniejszy z nich znajdował się dokładnie w miejscu, gdzie moglibyśmy oczekiwać cienia rzucanego przez obszar między szczelinami drugiej przesłony. Kolejne, słabsze prążki powstały symetryczne po dwóch stronach prążka środkowego.
Doświadczenie Younga można wyjaśnić przy założeniu **falowej natury światła**. Wiązka ugięła się na szczelinie pierwszej przesłony, padła na szczeliny drugiej przysłony, a następnie ugięła się na tych szczelinach i dotarła do ekranu (rys. 16.18 na następnej stronie).
Ponieważ do poszczególnych punktów ekranu docierało światło z obu szczelin, zachodziła interferencja, podobnie jak to jest w przypadku

W podobnym doświadczeniu z falami dźwiękowymi (podręcznik, cz. II s. 237) obserwowaliśmy wzmocnienia dźwięku i ciszę (odpowiednik jasnych i ciemnych prążków).

docierania do jednego punktu fal mechanicznych pochodzących z dwóch źródeł.

Jaka była rola pierwszej przesłony? Dzięki niej do obu szczelin drugiej przesłony docierało jednocześnie światło pochodzące z jednego punktu, a więc zgodne w fazie. Szczeliny drugiej przesłony można więc traktować jak dwa źródła światła o jednakowej fazie.



Rys. **16.18.** Schemat zjawiska obserwowanego w doświadczeniu Younga

Dzisiaj doświadczenie Younga jest łatwe do powtórzenia, tym bardziej, że mamy do dyspozycji źródło światła spójnego – laser. Dzięki jego zastosowaniu możemy od razu skierować światło na przesłonę z dwiema szczelinami. Nie straci ono przy tym na natężeniu, tak jak to się działo przy przejściu przez przesłonę z jedną szczeliną w doświadczeniu pierwotnie przeprowadzonym przez Younga.

Doświadczenie 2 – obowiązkowe

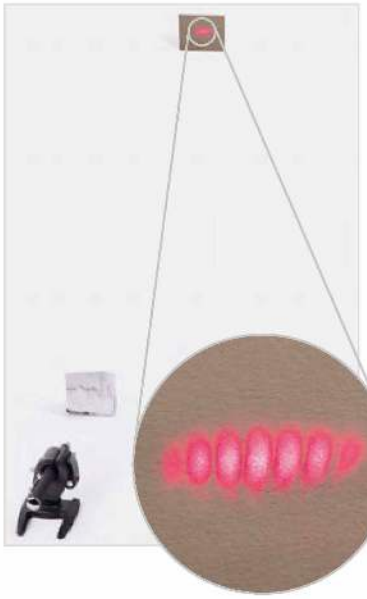
Badanie interferencji światła

1. Przygotuj czerwony wskaźnik laserowy, żyletkę lub nożyk do tapet i kawałek folii aluminiowej.

   Uwaga. Jeśli używasz słabego lasera, doświadczenie lepiej wykonać w częściowo zaciemnionym pomieszczeniu.

2. Za pomocą żyletki lub nożyka wytnij ostrożnie w kawałku folii dwa równoległe nacięcia długości ok. 1–2 cm, oddalone od siebie o ok. 0,5 mm. Aby uzyskać równoległe nacięcia, użyj ekierki i linijki.

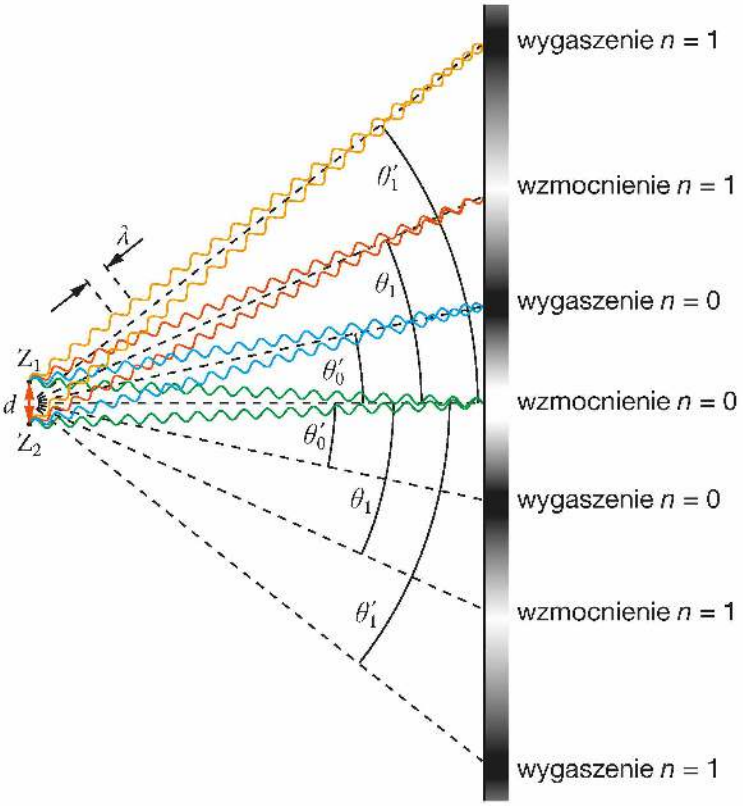
3. Ustaw folię pionowo na tle białej ściany lub białej kartki i skieruj na nacięcia strumień światła z lasera. Kartka powinna znajdować się kilka metrów od folii z nacięciami. Jaki obraz powstaje?



W części 2. podręcznika przedstawiliśmy schemat powstawania miejsc największego wzmocnienia i miejsc wygaszenia fali mechanicznej. Na jego podstawie udowodniliśmy wzór opisujący położenie miejsc najsilniejszego wzmocnienia oraz wygaszenia. Powiedzieliśmy wtedy, że są one prawdziwe dla wszystkich rodzajów fal. Przypomnijmy ten schemat (rys. 16.19) i wyprowadzone wówczas wzory, ponieważ mają one zastosowanie także dla światła. W tym przypadku miejsca wzmocnienia fali to jasne prążki, a miejsca wygaszenia pozostają nieoświetlone.

Maksymalne wzmocnienie zachodzi wtedy, gdy różnica dróg przebytych przez fale jest całkowitą wielokrotnością ich długości.

Całkowite wygaszenie zachodzi wtedy, gdy różnica dróg przebytych przez fale jest nieparzystą wielokrotnością połowy ich długości.



Rys. **16.19.** Interferencja fal z dwóch źródeł, widoczne miejsca wzmocnień i wygaszeń fal

Oto wzór na **wzmocnienie fali**:

$$\sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d}$$

gdzie:
$n = 0, 1, 2, \ldots$ oznacza numer prążka, λ – długość fali, d – odległość między szczelinami, θ_n – kąt, pod jakim ugina się promień fali.
Analogicznie dla **wygaszenia fali**:

$$\sin\theta_n' = \left(n + \tfrac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d}$$

Na podstawie tych wzorów możemy m.in. precyzyjnie wyznaczyć długość fali światła, a jeśli dysponujemy odpowiednimi przyrządami – także innych fal elektromagnetycznych. Albo odwrotnie: przy znanej długość fali wyznaczyć odległość między szczelinami.

Po tej lekcji powinieneś

- demonstrować doświadczalnie i wyjaśniać zjawisko dyfrakcji światła;
- demonstrować doświadczenie Younga i wyjaśniać jego wyniki;
- stosować wzory opisujące wzmocnienie i wygaszenie fali.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Uczniowie przeprowadzili doświadczenie Younga, w którym szczeliny znajdowały się w odległości $d = 1{,}5$ mm od siebie i w odległości $l = 2{,}6$ m od ekranu.
W wyniku doświadczenia uzyskali na ekranie jasne prążki, przy czym prążek drugiego rzędu był odległy od prążka zerowego o $x_2 = 2{,}5$ mm.
Oblicz długość fali świetlnej, jaką oświetlono szczeliny. Określ barwę światła.

Rozwiązanie

Sporządźmy schematyczny rysunek ilustrujący wynik doświadczenia i oznaczmy wszystkie punkty i wielkości, do których będziemy się odwoływać w rozwiązaniu.
Aby wyznaczyć długość fali, będziemy korzystać ze wzoru:

$$\sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d}$$

Stąd:

$$\lambda = \frac{d\sin\theta_n}{n}$$

czyli dla $n = 2$:

$$\lambda = \frac{d\sin\theta_2}{2}$$

Ponieważ kąt θ_2 jest bardzo mały (x_2 jest znacznie mniejsze od l), można przyjąć, że:

$$\sin\theta_2 \approx \operatorname{tg}\theta_2$$

gdyż dla kątów $\cos\theta_2 \approx 1$, a:

$$\operatorname{tg}\theta_2 = \frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2}$$

Przy takim założeniu:

$$\lambda = \frac{d}{2}\sin\theta_2 \approx \frac{d}{2}\operatorname{tg}\theta_2 = \frac{d}{2}\cdot\frac{x_2}{l}$$

czyli po podstawieniu danych liczbowych:

$$\lambda \approx 7{,}2\cdot 10^{-7}\ \text{m} = 720\ \text{nm}$$

Z rysunku widma na s. 17 odczytujemy, że tej długości fali w powietrzu odpowiada światło czerwone.

Odpowiedź: Szczeliny oświetlono falą świetlną o długości ok. 720 nm, czyli światłem czerwonym.

Zadania s. 30

Pytania i zadania

1. W doświadczeniu 2. opisanym na s. 27 użyto czerwonego lasera o długości fali 720 nm. Szczeliny w przesłonie były oddalone od siebie o 0,5 mm, a ekran odległy od szczelin o 3 m. Oblicz, w jakiej odległości od środkowego prążka (wzmocnienie $n = 0$) powstanie:

a) pierwszy obszar całkowitego wygaszenia ($n = 0$),

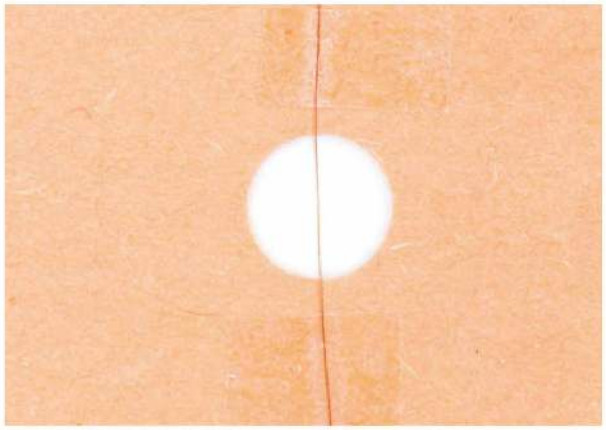
b) pierwszy prążek maksymalnego wzmocnienia ($n = 1$).

2. W wyniku interferencji światła z dwóch szczelin otrzymano na ekranie jasne prążki interferencyjne. Odległość od pierwszego prążka do środkowego (zerowego) wynosi 0,5 cm. Oblicz odległość między drugim a trzecim prążkiem interferencyjnym na ekranie. Przyjmij, że kąty, pod jakimi powstają prążki pierwszy i drugi, są bardzo małe.

3. Przeprowadzono doświadczenie Younga, w którym szczeliny były oświetlane światłem o długości 500 nm. W jakiej odległości od siebie znajdują się prążki piąty i szósty, jeśli odległość od ekranu wynosi 3 m, a odległość między szczelinami to 0,01 mm?

***4.** Udowodnij, że odległości między pierwszym a zerowym prążkiem interferencyjnym, drugim a pierwszym prążkiem itd. są w przybliżeniu takie same, jeśli kąty ugięcia są niewielkie. Oblicz błąd względny tego przybliżenia w przypadku opisanym w zad. 3.

5. Za pomocą wskaźnika laserowego i taśmy mierniczej wyznacz grubość ludzkiego włosa. Zaplanuj i opisz, jak przeprowadzić doświadczenie. Opracuj wyniki pomiarów i porównaj swój ostateczny wynik z danymi znalezionymi w wybranych źródłach informacji.
Wskazówka. Warto przykleić włos do kartonika z otworem, tak jak pokazano na zdjęciu.



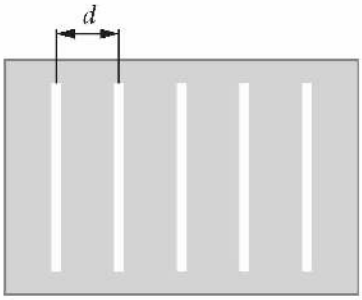
6. W dostępnych źródłach poszukaj informacji o plamce Poissona, zwanej także plamką Arago. Dowiedz się, jakie znaczenie w historii fizyki miało odkrycie mechanizmu powstawania tej plamki. Spróbuj samodzielnie wytworzyć ją doświadczalnie.

16.4. Siatka dyfrakcyjna

Przypomnij sobie

- Światło, jak każda fala, ulega dyfrakcji i interferencji.
- W doświadczeniu Younga interferuje światło pochodzące z dwóch szczelin.
- Obraz interferencyjny zależy od długości fali i odległości między szczelinami.

Wadą opisanego w lekcji 16.3 doświadczenia Younga jest to, że prążki powstające na skutek interferencji światła na dwóch szczelinach mogą być słabo widoczne. Wyrazistszy obraz uzyskuje się przy zastosowaniu **siatki dyfrakcyjnej** – układu bardzo wielu równoległych szczelin i przesłon, na przemian przepuszczających i pochłaniających światło.
Na rysunku 16.20 widzisz siatkę o pięciu szczelinach. W rzeczywistości rolę szczelin odgrywają rysy albo rowki, często są ich setki lub tysiące. W siatce dyfrakcyjnej odległość między środkami sąsiednich szczelin jest taka sama. Nazywamy ją **stałą siatki** i oznaczamy d.
Siatkę dyfrakcyjną można wykonać w prosty sposób z płyty CD.



Rys. 16.20. Siatka dyfrakcyjna o pięciu szczelinach

Doświadczenie 3

1. Na wierzchniej (niesrebrzystej) stronie płyty CD zarysuj nożykiem do tapet kwadrat o boku 2 cm (zdjęcie a).
2. Przyklej szeroką taśmę klejącą do naciętego fragmentu, a następnie oderwij ją szybkim ruchem. Wraz z taśmą oderwiesz metalizowaną powłokę płyty (zdjęcie b).
3. Ustaw płytę równolegle do ekranu (np. ściany) i poświeć na nią laserem, aby po przejściu przez płytę jego światło padało na ekran. Co obserwujesz (zdjęcie c)?

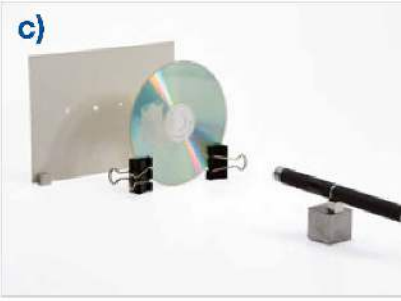
a)



b)



c)



Mimo że siatka wykonana z płyty ma setki szczelin, obraz interferencyjny składa się z prążków ułożonych podobnie jak w doświadczeniu z dwiema szczelinami. Dzieje się tak dlatego, że w przypadku siatki dyfrakcyjnej punkty najsilniejszego wzmocnienia (środków jasnych prążków) rozkładają się tak samo jak przy dwóch szczelinach i dają się opisać tym samym wzorem (ramka na następnej stronie). Ponieważ jednak szczelin są tysiące, wzmocnienie jest silniejsze, a prążki są znacznie lepiej widoczne.

a)



b)



Rys. 16.21. Porównanie obrazów: a) uzyskanego z dwóch szczelin, b) uzyskanego za pomocą płyty CD, na której jest 650 szczelin na 1 mm

Obraz interferencyjny tworzony przez siatkę dyfrakcyjną

Aby wyjaśnić, jak działa siatka dyfrakcyjna, przypomnijmy założenie przyjęte przy wyprowadzaniu wzoru opisującego położenie prążków. Otóż przyjęliśmy, że obraz interferencyjny powstaje daleko, czyli w odległości znacznie większej niż rozstaw szczelin i długość fali. To oznacza, że promienie wychodzące z obu szczelin padają w danym punkcie na ekran niemal równolegle (rys. a).

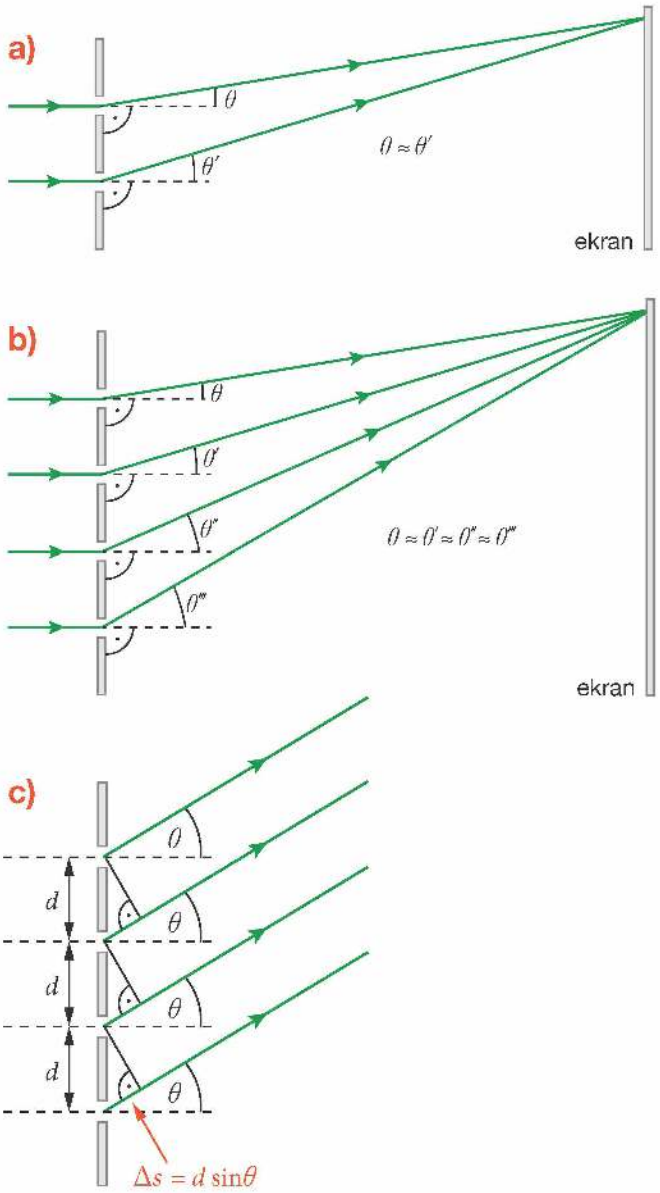
Podobnie można przyjąć przy opisie siatki dyfrakcyjnej (rys. b).

Gdy założymy, że promienie wychodzące z kolejnych szczelin są w przybliżeniu równoległe, sytuację możemy zobrazować w sposób pokazany na rysunku c).

Zauważmy, że różnica dróg Δs przebytych przez promienie ze szczelin 1 i 2, 2 i 3 itd., jest jednakowa. Jeśli więc $\Delta s = n\lambda$, to fale ze wszystkich szczelin spotykają się w zgodnej fazie i następuje ich wzmocnienie. Z zależności $\Delta s = d \sin\theta_n$ otrzymujemy wzór:

$$\sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d}$$

Ma on taką samą postać jak w przypadku dwóch szczelin: tam, gdzie w zgodnej fazie spotykają się fale z dwóch sąsiednich szczelin, również fale ze wszystkich pozostałych szczelin spotkają się z nimi w zgodnej fazie.



Interferencja a światło barwne

Do tej pory do doświadczeń używaliśmy światła laserowego, które jest jednobarwne (monochromatyczne, tzn. ma jedną, ściśle określoną długość fali). Wystarczy jednak popatrzeć na odbicie światła białego od płyty CD, aby dostrzec tęczowe prążki różnych kolorów. Skąd się one biorą? We wzorze:

$$\sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d}$$

występuje długość fali. Dla światła czerwonego jest ona prawie dwukrotnie większa niż dla światła fioletowego, a więc prążek czerwony wypadnie w innym miejscu niż fioletowy. Dlatego siatka dyfrakcyjna pozwala rozszczepić światło.

KOLORY NA BAŃKACH MYDLANYCH

Na bańki mydlane pada białe światło słoneczne, a same bańki nie mają własnego koloru. Skąd zatem biorą się tęczowe barwy na ich powierzchni? Są one efektem interferencji fal.

1 Na bańki pada światło białe, które jak wiemy, jest mieszaniną fal elektromagnetycznych o wszystkich kolorach tęczy.

2 Prześledźmy, co dzieje się z dwoma promieniami (**a** i **b**) o jednej barwie, np. czerwonej.

3 Światło dociera do powierzchni bańki i częściowo się od niej odbija, a częściowo załamuje i wnika w błonę bańki.

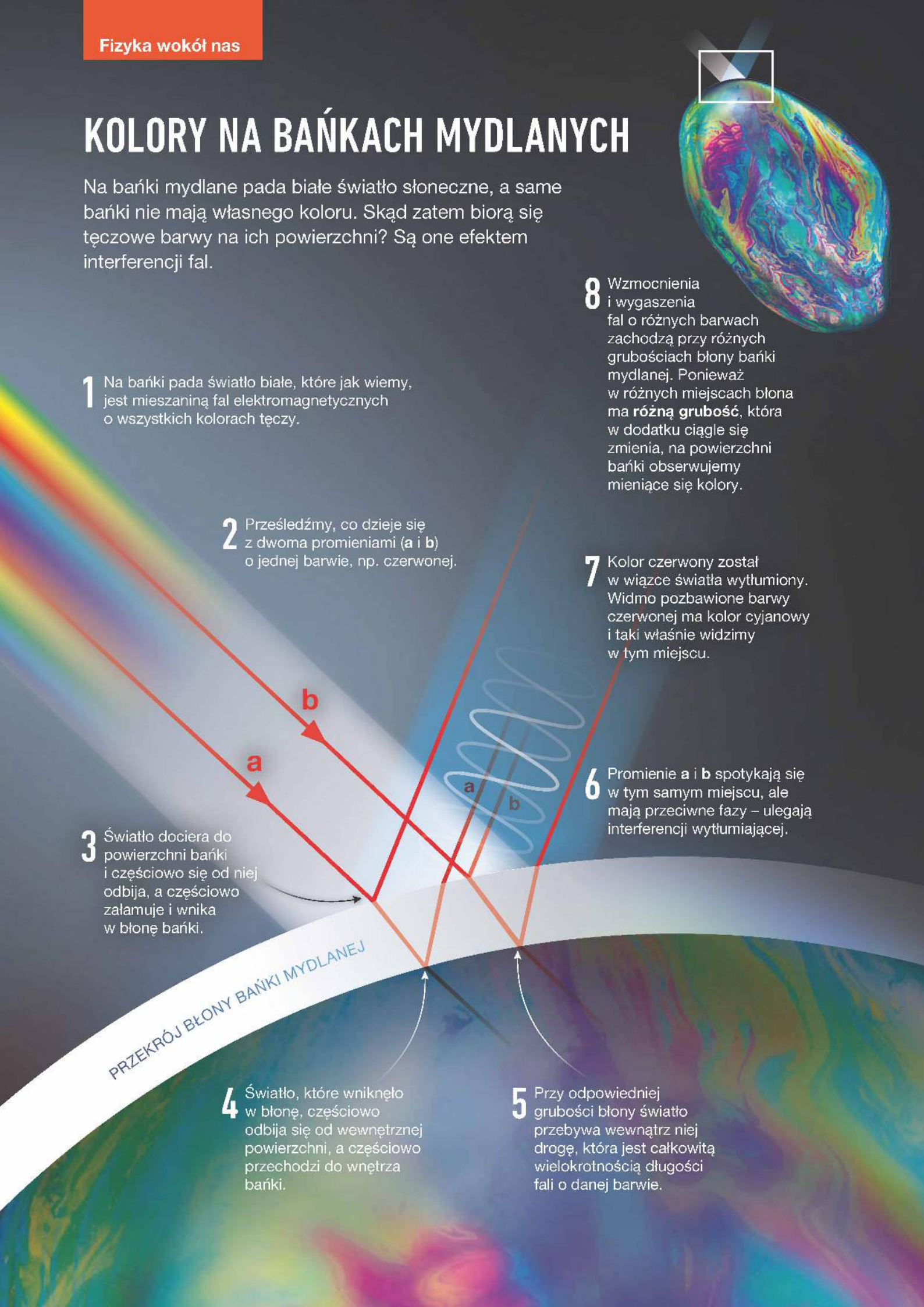
4 Światło, które wniknęło w błonę, częściowo odbija się od wewnętrznej powierzchni, a częściowo przechodzi do wnętrza bańki.

5 Przy odpowiedniej grubości błony światło przebywa wewnątrz niej drogę, która jest całkowitą wielokrotnością długości fali o danej barwie.

6 Promienie **a** i **b** spotykają się w tym samym miejscu, ale mają przeciwne fazy – ulegają interferencji wytłumiającej.

7 Kolor czerwony został w wiązce światła wytłumiony. Widmo pozbawione barwy czerwonej ma kolor cyjanowy i taki właśnie widzimy w tym miejscu.

8 Wzmocnienia i wygaszenia fal o różnych barwach zachodzą przy różnych grubościach błony bańki mydlanej. Ponieważ w różnych miejscach błona ma **różną grubość**, która w dodatku ciągle się zmienia, na powierzchni bańki obserwujemy mieniące się kolory.





A to ciekawe

W 1953 r. biologowie James Watson i Francis Crick analizowali obraz interferencji promieni Röntgena na materiałach zawierających strukturę DNA, otrzymany przez fizyczkę Rosalind Franklin. Ustalili, że struktura DNA ma postać podwójnej helisy.
Odkrycie to zostało uhonorowane Nagrodą Nobla z medycyny i fizjologii w 1962 r. i jest dzisiaj powszechnie uważane za jedno z największych odkryć naukowych XX w. Pozwoliło ono zrozumieć, w jaki sposób jest przekazywana informacja genetyczna.



Rys. **16.22.** Mandryl barwnolicy

Interferencja światła w przyrodzie

Powiedzieliśmy, że w doświadczeniu Younga człowiek po raz pierwszy zaobserwował interferencję światła. Dokładniej należałoby powiedzieć, że po raz pierwszy zrobił to świadomie, ponieważ nieświadomie widział ją już wcześniej, tyle że nie rozumiał natury tego zjawiska.
Interferencję światła zobaczymy także podczas podziwiania kolorowych barw baniek mydlanych (patrz infografika na s. 33).
Mandryl przedstawiony na zdjęciu (rys. 16.22) także zawdzięcza swoje niezwykłe ubarwienie interferencji światła. Skóra na jego pysku nie zawiera ani czerwonego, ani niebieskiego barwnika, za to znajdują się na niej ułożone równolegle włókna kolagenu, pełniące funkcję naturalnej siatki dyfrakcyjnej.
Taki mechanizm powstawania barw nazywamy **barwami strukturalnymi**. Mandryl nie jest jedynym organizmem wykorzystującym barwy strukturalne – tak samo powstają kolory pawich piór i skrzydeł niektórych motyli.
Interferencja światła słońca lub księżyca następuje także przy przejściu przez bardzo drobne krople wody w atmosferze lub odbiciu od takich kropel. W ten sposób powstają efektowne zjawiska optyczne, takie jak wieniec lub iryzacja chmur (rys. 16.23).

a)



b)



Rys. **16.23.** a) wieniec wokół księżyca, b) iryzacja chmury

Gdy patrzymy w dół ze szczytu góry lub z samolotu, czasami możemy dojrzeć swój cień na chmurach poniżej. W górach nazywamy go **widmem Brockenu** (od szczytu w Niemczech, gdzie stosunkowo często występuje to zjawisko). Wokół głowy zobaczymy tęczową aureolę zwaną **glorią** (rys. 16.24). Każdy widzi glorię tylko wokół własnej głowy. Możemy po tym rozpoznać, że zdjęcie 16.24b wykonywała osoba siedząca z przodu samolotu, ponieważ tam wypada środek okręgów glorii.

a)



b)



Rys. **16.24.** a) widmo Brockenu, b) gloria widziana z samolotu wokół jego cienia na chmurach

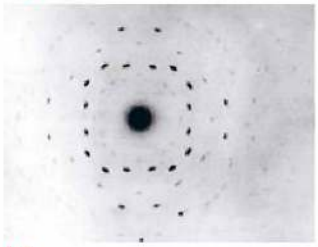
Interferencja innych fal elektromagnetycznych

Siatkę dyfrakcyjną dla światła można stosunkowo łatwo wyprodukować. Byłoby to bardzo trudne w przypadku promieni Röntgena, których długość fali jest znacznie mniejsza – zbliżona do wielkości atomów. Jednak w 1912 r. Max von Laue wpadł na pomysł, że kryształy dzięki regularnemu układowi atomów mogą pełnić funkcję naturalnych siatek dyfrakcyjnych.

W doświadczeniu przeprowadzonym zgodnie z tym pomysłem otrzymano obraz interferencyjny (rys. 16.25a), co stanowiło dowód falowej natury promieniowania X. Rentgenogram wygląda inaczej niż prążki w doświadczeniu 3. (s. 31), ponieważ siatka dyfrakcyjna dla światła widzialnego składa się z równoległych szczelin, podczas gdy struktura kryształu jest trójwymiarowa.

Interferencja promieniowania rentgenowskiego jest obecnie wykorzystywana do badania struktury mikroskopowej materiałów. Analiza układu plamek otrzymanych na ekranie po dyfrakcji promieni Röntgena na danym materiale pozwala odtworzyć wzajemne ułożenie atomów.

a)



b)



Rys. **16.25.** a) obraz interferencyjny promieniowania X na kryształach sfalerytu (siarczku cynku), b) zdjęcie kryształu sfalerytu

Po tej lekcji powinieneś

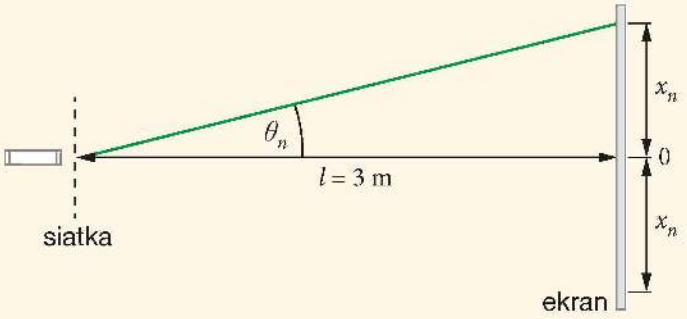
- stosować wzór opisujący obraz interferencyjny do obliczania długości fali lub stałej siatki dyfrakcyjnej;
- prowadzić doświadczenia z wykorzystaniem siatek dyfrakcyjnych;
- analizować zjawisko interferencji wiązek światła odbitych od obu powierzchni cienkiej warstwy.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Uczniowie przeprowadzili pomiar długości fali światła laserowego za pomocą siatki dyfrakcyjnej o 200 rysach na 1 mm. Zbudowali układ pomiarowy według schematu przedstawionego poniżej.



Wyniki pomiarów zebrali w tabeli.

Numer prążka interferencyjnego	Odległości prążków ugiętych od punktu 0 x [cm]			
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Pomiar 4
$n = 1$	38	35	36	38
$n = 2$	75	76	75	74
$n = 3$	110	116	120	115

Na podstawie tych wyników oblicz długość fali światła laserowego.

Rozwiązanie

Dla każdego z prążków wykonano cztery pomiary. Obliczmy średnią ich wyników.

Numer prążka interferencyjnego	Odległości prążków ugiętych od punktu 0 x [cm]				
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Pomiar 4	Średnia
$n = 1$	38	35	36	38	36,75
$n = 2$	75	76	75	74	75,00
$n = 3$	110	116	120	115	115,25

Długość fali można wyznaczyć dla jednego z prążków. My jednak obliczymy ją dla każdego prążka, a następnie wyznaczymy średnią wszystkich wyników. Dzięki temu uzyskamy dokładniejszy wynik końcowy. Skorzystajmy ze wzoru:

$$\sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d}$$

Stąd:

$$\lambda = \frac{d}{n}\sin\theta_n \qquad (1)$$

Ponieważ siatka ma 200 rys na 1 mm, jej stała wynosi $d = \frac{1}{200}\text{ mm} = 5 \cdot 10^{-6}\text{ m}$.
Przedstawimy obliczenia dla $n = 2$, a dla pozostałych prążków możesz wykonać je samodzielnie.

Aby obliczyć długość fali, musimy znać sin θ_2. Na rysunku widać, że:

$$\text{tg}\,\theta_2 = \frac{x_2}{l}$$

Podstawiamy dane, aby obliczyć miarę kąta θ_2, a następnie jego sinus:

$$\text{tg}\,\theta_2 = \frac{75}{300} = 0{,}25$$

$$\theta_2 \approx 14^\circ$$

$$\sin\theta_2 \approx 0{,}242$$

Stąd po podstawieniu danych do wzoru (1) otrzymujemy:

$$\lambda \approx 6{,}05 \cdot 10^{-7}\ \text{m} = 605\ \text{nm}$$

Długość fali dla $n = 1$, obliczona tą samą metodą, wynosi $\lambda = 608$ nm, a dla $n = 3$ jest równa $\lambda = 598$ nm. Średnia tych trzech wielkości to ok. 604 nm.

Odpowiedź: Długość fali światła lasera wynosiła ok. 604 nm.

1. Światło białe pada na siatkę dyfrakcyjną. Na podstawie wzoru opisującego obraz interferencyjny:

a) uzasadnij, dlaczego prążek zerowy (położony naprzeciwko siatki) jest biały,

b) określ, która część prążka pierwszego rzędu znajduje się bliżej prążka zerowego: czerwona czy fioletowa.

2. Gdy błonę mydlaną rozepniemy na ramce, pasy interferencyjne są poziome (patrz zdjęcie). Wyjaśnij, dlaczego tak się dzieje.



3. Na siatkę dyfrakcyjną, w której na 1 mm przypada 500 rys, pada prostopadle równoległa wiązka światła o długościach fali od 760 nm (barwa czerwona) do 400 nm (barwa fioletowa). Ile wynosi różnica kątów odchylenia końca widma pierwszego rzędu i początku widma drugiego rzędu?

4. Dlaczego patrząc przez szybę, nie obserwujemy tęczowych barw, jakie tworzą się na bańce mydlanej? Przecież w przypadku szyby światło także odbija się zarówno podczas wchodzenia do szkła, jak i wychodzenia z niego.

5. Przyjrzyj się zdjęciu. Przedstawia ono płytę CD oraz jej odbicie w lustrze. Zauważ, że kolorowe odblaski światła na płycie i jej odbiciu nie są symetryczne. Zaobserwuj to zjawisko samodzielnie i spróbuj je wyjaśnić.



16.5. Odbicie i rozproszenie światła

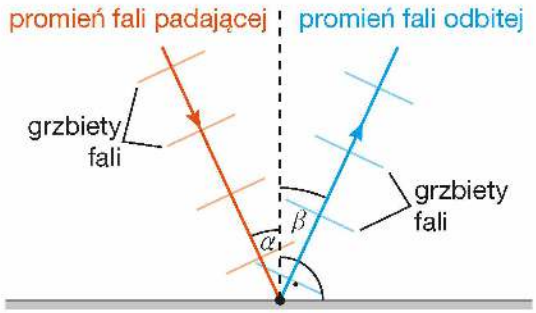
Przypomnij sobie

- Kąty padania i odbicia mierzymy względem prostej prostopadłej do odbijającej powierzchni.
- Przy odbiciu fali kąt odbicia jest równy kątowi padania, a oba te kąty leżą w tej samej płaszczyźnie.

W części 2. podręcznika omawialiśmy prawo odbicia:

> Kąt odbicia promienia fali jest równy kątowi jego padania. Promień padający i promień odbity oraz prosta prostopadła do granicy ośrodków leżą w tej samej płaszczyźnie.

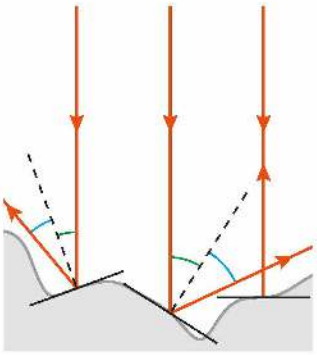
Treść tego prawa przedstawia rysunek 16.26.



Rys. **16.26.** Kąt odbicia β jest równy kątowi padania α

To prawo obowiązuje dla wszystkich fal, a więc także dla fal elektromagnetycznych, w tym – dla światła.

Rozpraszanie światła przy odbiciu



Rys. **16.27.** Rozproszenie przy odbiciu od nieregularnej powierzchni

Jak wiesz ze szkoły podstawowej, prawo odbicia stanowi wyjaśnienie dla powstawania obrazów w zwierciadłach, w tym w najprostszym przypadku – obrazu w zwierciadle płaskim, czyli zwykłym lusterku.

Prawo odbicia obowiązuje nie tylko w przypadku zwierciadeł. Zgodnie z nim światło odbija się także od kartki papieru. Różnica polega na tym, że powierzchnia kartki jest chropowata (nawet jeśli gołym okiem wydaje się gładka), dlatego **rozprasza** światło – po odbiciu biegnie ono w przypadkowych kierunkach.

Na rysunku 16.27 pokazaliśmy rozproszenie światła, przy czym dla każdego z promieni zaznaczyliśmy styczną do powierzchni, linię do niej prostopadłą oraz kąt padania i odbicia.

Rozpraszanie światła w ośrodku

Wiemy, że światło rozchodzi się po liniach prostych. Dotyczy to jednak tylko biegu przez **jednorodny** ośrodek.

Światło ulega rozproszeniu na niejednorodnościach ośrodka.

Doświadczenie 4 – obowiązkowe

Obserwacja rozpraszania światła w ośrodku

1. Przygotuj szklankę, odrobinę mleka, łyżeczkę oraz laser.

   Uwaga. Doświadczenie lepiej wykonać przy słabym oświetleniu, zwłaszcza jeśli laser ma niewielką moc.

2. Nalej wodę do szklanki. Zaświeć laserem z góry do wody. Co obserwujesz?
3. Dodaj do wody jedną małą kroplę mleka i dokładnie wymieszaj. Ponownie zaświeć z góry laserem. Jak się zmieniło obserwowane zjawisko?

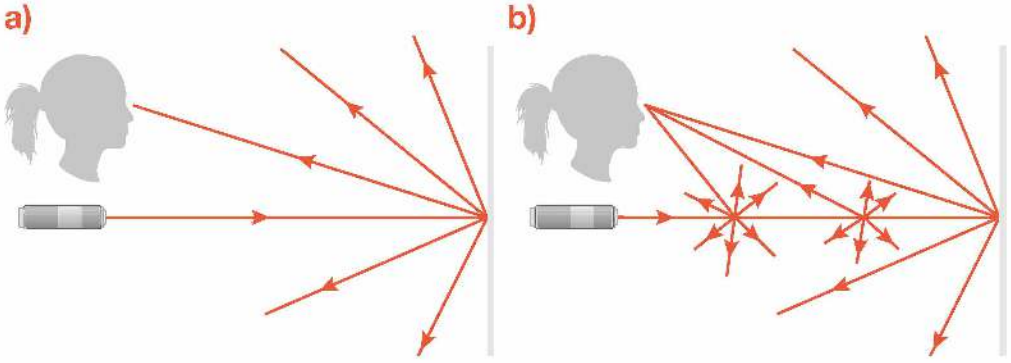


Jak widzimy, w czystej wodzie promień lasera jest niewidoczny lub ledwo widoczny. Natomiast po dodaniu mleka, które zawiera drobne cząsteczki tłuszczu, białek i innych substancji, światło ulega rozproszeniu na tych cząsteczkach i zaczyna być widoczne. To zjawisko nazywamy **zjawiskiem Tyndalla** (albo efektem Tyndalla, rys. 16.28).



Rys. 16.28. Rozpraszanie światła słonecznego

Podobnie jest w przypadku biegu światła przez powietrze. Gdy powietrze jest czyste, nie widzimy wiązki światła, a jedynie miejsce nią oświetlone (rys. 16.29a). Gdy jednak w powietrzu znajdują się pyłki kurzu, dym albo drobne kropelki wody (mgła), rozproszone światło jest widoczne jako linia od źródła do oświetlonego przedmiotu (rys. 16.29b).



Rys. 16.29. Widoczność wiązki lasera w powietrzu: a) czystym, b) zanieczyszczonym

W próżni nawet najsilniejszy promień światła jest niewidoczny. Takie świetlne linie w filmach fantastycznych (rys. 16.30) są więc tylko fikcją.



Rys. 16.30. Kadr z filmu *Gwiezdne Wojny: Atak Klonów* przedstawia sytuację niezgodną z prawami fizyki



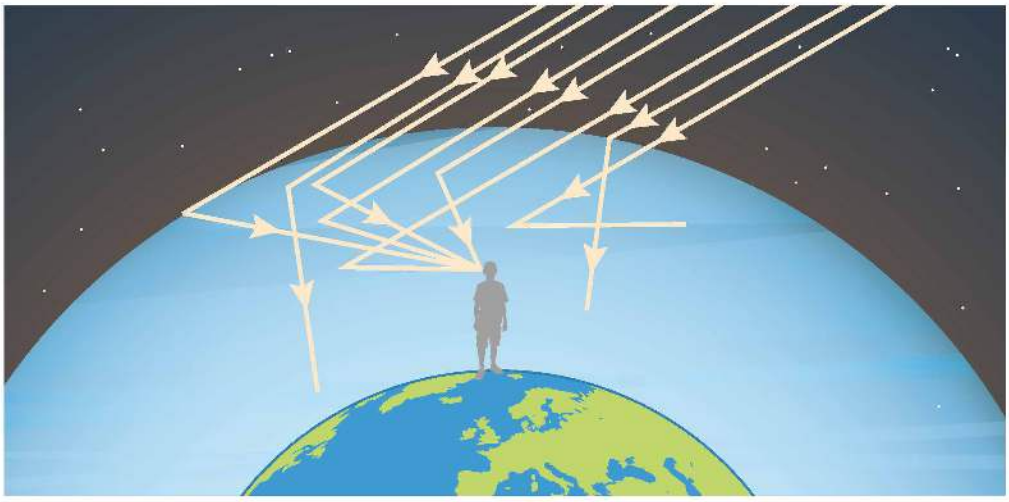
Rys. **16.31.** Niebo widziane z Księżyca

Błękit nieba

Niebo widziane z Księżyca jest całkowicie czarne, nawet gdy świecą na nim Słońce i Ziemia (rys. 16.31). Dlaczego więc widziane z Ziemi jest błękitne?

Zarówno do Ziemi, jak i do Księżyca dociera białe światło słoneczne. Na Ziemi jednak ulega ono rozproszeniu na niejednorodnościach atmosfery. To rozproszone światło oświetla znajdujące się na Ziemi przedmioty, dlatego w cieniu nie jest całkiem ciemno.

Rozproszone w atmosferze światło trafia także do naszych oczu (rys. 16.32). Ponieważ dociera ze wszystkich kierunków, ulegamy złudzeniu, że nad nami znajduje się wielka pokrywa, którą nazywamy właśnie niebem.



Rys. **16.32.** Droga światła słonecznego do naszych oczu. Na rysunku przedstawiono głównie promienie docierające do oczu obserwatora, ale znacznie więcej promieni po rozproszeniu biegnie w innych kierunkach

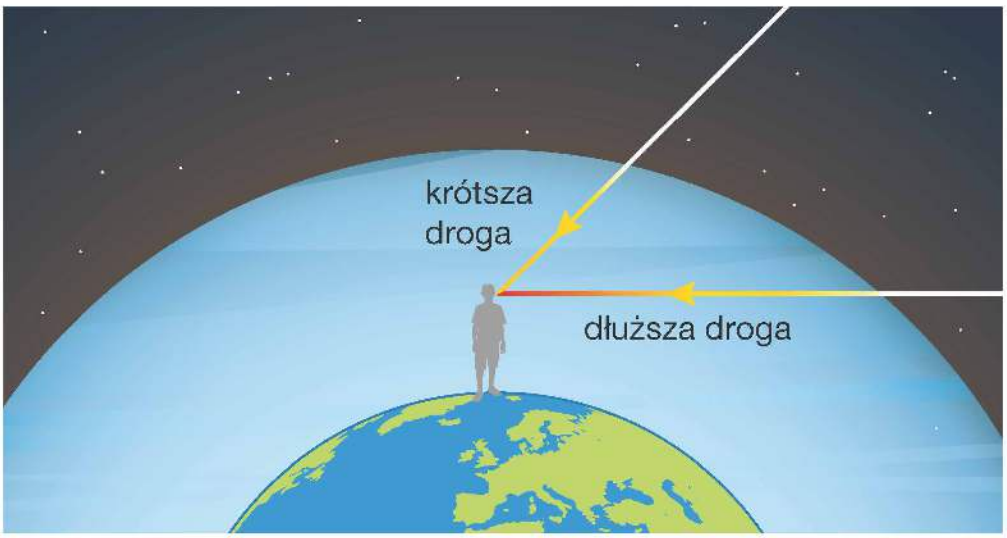
Aby wyjaśnić barwę nieba, a także kilka innych zjawisk, musimy poznać następujący fakt:

> Im mniejsza długość fali światła, tym silniejsze jego rozproszenie w atmosferze.

Tak więc światło fioletowe ulega rozproszeniu w największym stopniu, błękitne w nieco mniejszym i tak dalej, aż do czerwieni, rozpraszanej najsłabiej. Niebo jest błękitne, a nie fioletowe, ponieważ fiolet stanowi niewielką część światła słonecznego.

Powiedzieliśmy wcześniej, ze Słońce emituje światło białe. Może się to wydawać niezgodne z codziennym doświadczeniem: widzimy przecież, że nasza gwiazda jest żółta. Jednak również ten kolor wynika z rozpraszania. Atmosfera zabiera ze światła słonecznego najkrótsze fale (fioletowe i niebieskie), więc zostają w nim fale, których mieszaninę widzimy jako żółtą.

Wynika stąd również, że im dłuższą drogę przebywają promienie słoneczne w atmosferze, tym więcej krótszych fal ulega rozproszeniu, a więc tym większą część stanowią fale dłuższe.



Rys. **16.33.** Droga przebyta przez promienie słoneczne w atmosferze zależy od wysokości Słońca nad horyzontem

Taka sytuacja ma miejsce wkrótce po wschodzie Słońca i tuż przed jego zachodem (rys. 16.33). Rzeczywiście – Słońce wydaje się wówczas czerwone.

Po tej lekcji powinieneś

- wyjaśniać różnicę pomiędzy odbiciem od zwierciadła a odbiciem od matowej powierzchni;
- demonstrować rozpraszanie światła w ośrodku;
- wyjaśniać powstawanie błękitnego koloru nieba i czerwonego koloru zachodzącego Słońca.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Zastanów się, jaki kolor ma Słońce widziane z Księżyca:

a) gdy znajduje się wysoko na księżycowym niebie,

b) tuż przed zachodem.

2. Na zdjęciach widzisz tę samą białą kartkę sfotografowaną w jasny dzień w dwóch miejscach: oświetlonym bezpośrednio przez Słońce (zdjęcie A) oraz ocienionym (zdjęcie B). Dlaczego zdjęcie B jest niebieskawe? Dlaczego zdjęcie A nie ma takiego zabarwienia?

A.



B.



3. Niebo w nocy jest ciemne, ale nie jest całkowicie czarne. Wymyśl, jak można doświadczalnie poznać jego kolor. Możesz spróbować zastosować swój sposób w praktyce.

4. Atmosfera nie ma wyraźnej granicy, często jednak w szacunkowych obliczeniach przyjmujemy, że słup powietrza nad nami ma wysokość 10 km. Przyjmij to założenie i oblicz, jaką drogę przebywa w atmosferze światło Słońca, gdy dociera do twoich oczu:

a) w południe słoneczne najdłuższego dnia w roku,

b) w chwili, gdy Słońce zachodzi.

Wskazówka do punktu a). Możesz pominąć krzywiznę Ziemi.

Uwaga. Odpowiedź do punktu a) na końcu książki podajemy dla szerokości geograficznej Warszawy 52°N. Jeśli weźmiesz pod uwagę położenie własnej miejscowości, wynik może być nieco inny.

5. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj kadzidełko. Upewnij się, czy nie jesteś uczulony na jego dym. Doświadczenie przeprowadź w pokoju, w którym jest tylko jedno źródło światła – jedna lampa lub światło padające z okna po jednej stronie pokoju.

b) Zapal kadzidełko. Spójrz na jego dym dwa razy: pod światło oraz stojąc tyłem do światła. Czym się różni barwa dymu w obu przypadkach?

c) Wyjaśnij swoje obserwacje na podstawie wiadomości z tej lekcji.



6. Obejrzyj doświadczenie – symulację zachodu słońca w filmie *Západ slunce* (adres pod kodem QR i na s. 309).

Spróbuj powtórzyć je w domu.

16.6. Załamanie światła

Przypomnij sobie

- Fale ulegają odbiciu. Kąt odbicia jest równy kątowi padania.
- Gdy fala przechodzi do ośrodka, w którym porusza się z inną prędkością, załamuje się, czyli zmienia się kierunek jej rozchodzenia.
- Fala elektromagnetyczna to rozchodzące się w przestrzeni okresowe zmiany zależnych od siebie pól: elektrycznego i magnetycznego.

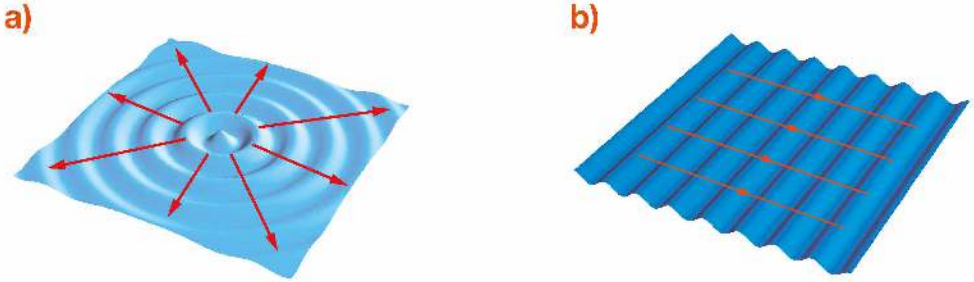


Rys. 16.34. Dzięki załamaniu światła ołówek wydaje się zgięty w miejscu, w którym przebija powierzchnię wody, i grubszy pod wodą niż w powietrzu

W poprzednich lekcjach badaliśmy falowe właściwości światła. Zauważyliśmy, że dość trudno je zaobserwować. W codziennym życiu nie mamy do czynienia choćby z dyfrakcją światła, dlatego możemy zakładać, że światło rozchodzi się po liniach prostych. Opieramy się wówczas na modelu nazywanym optyką geometryczną.
Na razie jednak przyjrzymy się światłu jako fali podobnej pod pewnymi względami do fal mechanicznych, omawianych w części 2. podręcznika. To pozwoli nam wyjaśnić, czym jest promień światła i skąd bierze się jego załamanie.

Grzbiety i promienie

W przypadku fal mechanicznych **grzbietem fali** nazywamy miejsce maksymalnego wychylenia cząsteczek z położenia równowagi, a **promieniem** – linię prostopadłą do grzbietów, wskazującą, jak rozchodzi się fala (rys. 16.35).

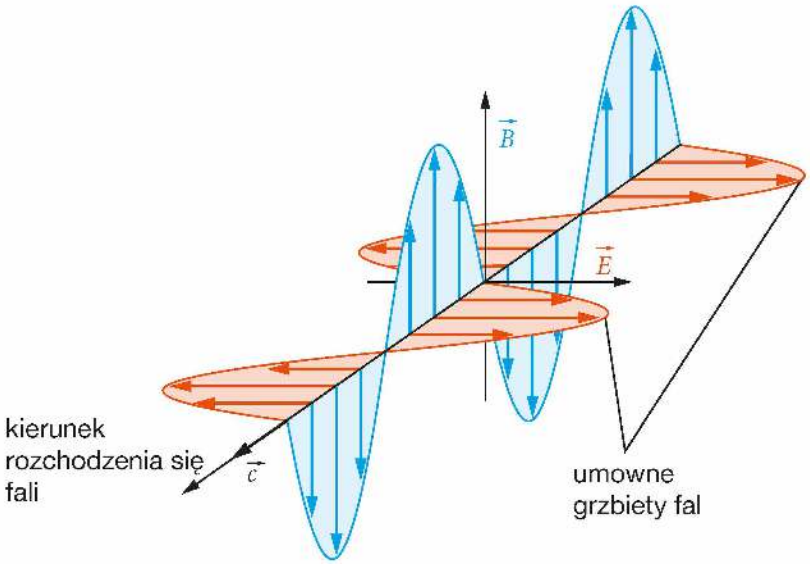


Rys. 16.35. Grzbiety i promienie fal na wodzie (promienie oznaczono czerwonymi strzałkami): a) fala kolista, b) fala płaska

W rozdziale 10. wśród fal mechanicznych wyróżniliśmy **fale podłużne** i **poprzeczne**. W falach podłużnych kierunek drgań cząsteczek ośrodka jest równoległy do kierunku rozchodzenia się fali, a w falach poprzecznych – prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali.
Wprawdzie w falach elektromagnetycznych mamy do czynienia nie z drganiami cząsteczek, ale z okresowymi zmianami pól elektrycznego i magnetycznego, jednak można zapytać o kierunek tych drgań, czyli o kierunek wektorów natężenia pola $\vec{E}$ i indukcji magnetycznej $\vec{B}$.

Okazuje się, że są one prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali i do siebie nawzajem (rys. 16.36). Dlatego mówimy, że:

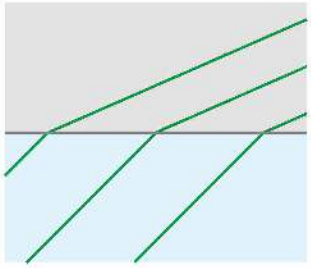
> Fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną.



Rys. 16.36. Wektory natężenia pola $\vec{E}$ i indukcji magnetycznej $\vec{B}$ w fali elektromagnetycznej w danej chwili

W przypadku fal elektromagnetycznych przyjmuje się, że grzbiet to miejsce, gdzie wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ osiąga maksymalną wartość.

Promień fali elektromagnetycznej jest natomiast definiowany tak samo jak w przypadku fal mechanicznych: jest to linia prostopadła do grzbietów, wzdłuż której rozchodzi się fala. W przypadku fal świetlnych mówimy o promieniu światła, czyli o linii, wzdłuż której rozchodzi się światło. Określenie *promień światła* często rozumiemy nieco inaczej: jest to bardzo cienka wiązka światła. Mówimy przecież, że coś zostało oświetlone promieniem światła, a sama prosta niczego nie oświetla. Te dwa znaczenia słowa *promień* są jednak na tyle zbliżone, że ich użycie nie prowadzi do nieporozumień.



Rys. 16.37. Na granicy ośrodków grzbiety fal tworzą linie ciągłe

Prawo Snelliusa

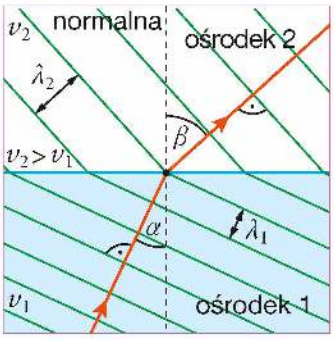
W rozdziale 10. w cz. 2 podręcznika mówiliśmy o załamaniu fal mechanicznych przy przejściu do innego ośrodka. Na podstawie faktu, że na granicy ośrodków grzbiety fali nie ulegają przerwaniu (rys. 16.37), oraz z zależności trygonometrycznych udowodniliśmy wówczas **prawo załamania**, które w przypadku światła zwane jest też **prawem Snelliusa**:

Prawo załamania, cz. II s. 232

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const}$$

gdzie: α – kąt padania, β – kąt załamania (mierzone względem normalnej, czyli prostej prostopadłej do granicy ośrodków, rys. 16.38),

v_1 i v_2 – prędkości fali odpowiednio w pierwszym i drugim ośrodku, przy czym kąt padania, kąt załamania i normalna leżą w jednej płaszczyźnie.



Rys. 16.38. Schemat załamania fali

Kiedy omawialiśmy prawo załamania, powiedzieliśmy, że spełniają je nie tylko fale mechaniczne, lecz także światło. Przedstawmy doświadczalne potwierdzenie tego faktu.
Nie mamy co prawda wystarczających możliwości, aby zmierzyć prędkości światła w wodzie i w powietrzu, jednak sprawdzimy, że spełniona jest zależność:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \text{const}$$

Doświadczenie 5

1. Przygotuj jasne, matowe, prostopadłościenne pudełko o wysokości co najmniej 8 cm (np. po lodach), laser, kątomierz i cienki niezmazywalny pisak, np. do płyt CD. Doświadczenie najlepiej jest wykonać w półmroku.
2. Nalej wody do pudełka (do połowy).
3. Ustaw laser równolegle do jednej ze ścianek naczynia, jak najbliżej niej, tak, aby światło lasera padało do wody pod pewnym kątem i jednocześnie tworzyło na ściance naczynia widoczną linię (patrz zdjęcie).
4. Zaznacz na pudełku trzy punkty leżące na linii określającej bieg promienia światła: A. przed granicą ośrodków, B. na granicy ośrodków, C. w drugim ośrodku, a następnie połącz je linią łamaną.
5. Powtórz czynności opisane w punktach 3. i 4. dla kilku różnych kątów padania.
6. Na podstawie linii obrazujących bieg promienia światła zmierz dla każdego z pomiarów kąt padania i kąt załamania.
7. Odczytaj z tablic lub oblicz na kalkulatorze sinusy tych kątów. Wyniki zapisz w tabeli.
8. Zaznacz w układzie współrzędnych wartości sinusów kątów załamania (na osi poziomej) i kątów padania (na pionowej). Sprawdź, czy punkty oznaczające wyniki pomiarów leżą na jednej prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych. Jeśli tak – odczytaj jej współczynnik kierunkowy.



Analiza wyników doświadczenia 5.

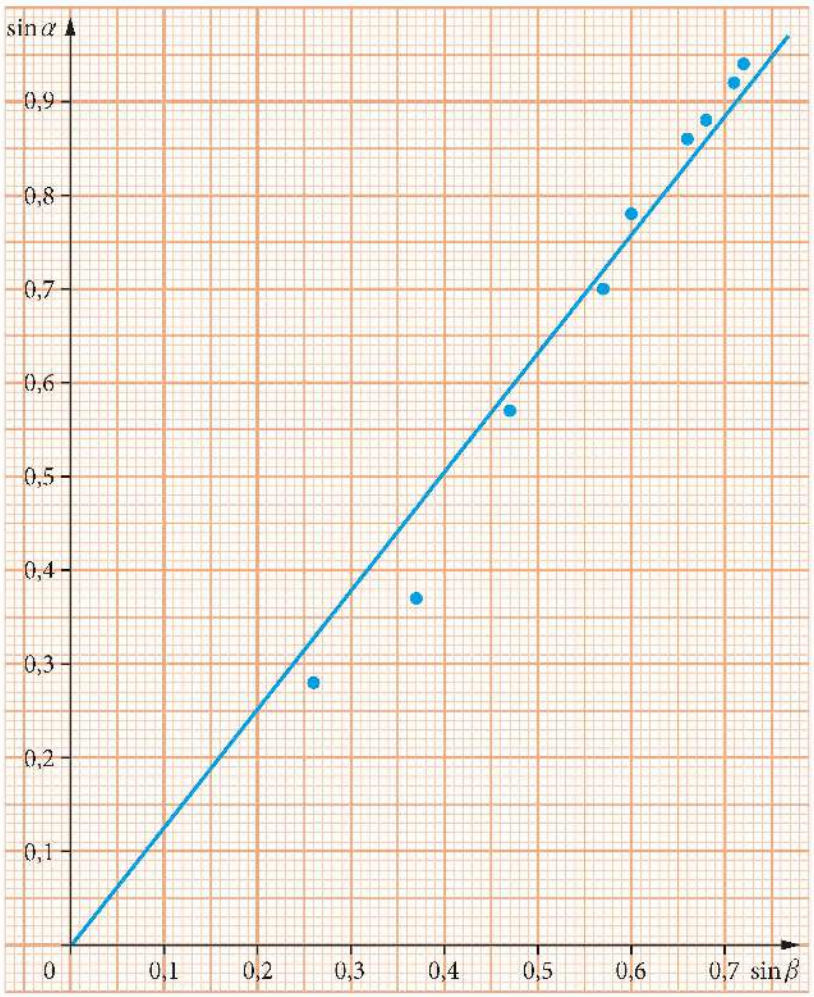
W naszym doświadczeniu przeprowadziliśmy 9 pomiarów dla różnych kątów padania. Ich wyniki przedstawiono w tabeli 16.2.

Tabela 16.2. Pomiary i obliczenia dla doświadczenia 5.

Pomiar	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α	16	22	34	44	51	59	62	67	70
β	15	22	28	35	37	41	43	45	46
$\sin\alpha$	0,28	0,37	0,56	0,69	0,78	0,86	0,88	0,92	0,94
$\sin\beta$	0,26	0,37	0,47	0,57	0,60	0,66	0,68	0,71	0,72

Punkty odpowiadające pomiarom zaznaczamy w układzie współrzędnych (rys. 16.39) zgodnie z instrukcją podaną w opisie doświadczenia.

Dla kąta padania $\alpha = 0°$ nie zachodzi załamanie, czyli $\beta = 0°$, a ponieważ $\sin 0° = 0$, wykres przechodzi przez początek układu współrzędnych.



Rys. 16.39. Wykres na podstawie danych z tabeli 16.2

Jak widzimy, układają się one w przybliżeniu na prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych, co oznacza, że sinusy kątów α i β są proporcjonalne, czyli że ich iloraz jest stały. Iloraz ten jest równy współczynnikowi kierunkowemu otrzymanej prostej:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \approx 1{,}26$$

Uwaga. Zaznaczyliśmy punkty pomiarowe na wykresie bez uwzględnienia niepewności, gdyż obliczenie niepewności sinusa kąta na podstawie niepewności miary tego kąta wymaga umiejętności spoza programu matematyki w szkole ponadpodstawowej.

Współczynnik załamania

Rozważmy promień światła przechodzący z próżni (gdzie rozchodzi się z prędkością $v_1 = c$) do ośrodka, w którym rozchodzi się z prędkością v_2.

Prawo załamania:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{v_1}{v_2}$$

przyjmuje w tym przypadku postać:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{c}{v_2}$$

Stały iloraz występujący z prawej strony tej równości nazywamy **współczynnikiem załamania** światła w danym ośrodku.

> Współczynnik załamania światła w ośrodku, w którym rozchodzi się ono z prędkością v, jest równy:
>
> $$n=\frac{c}{v}$$

Tak więc współczynnik załamania określa, ile razy wolniej światło rozchodzi się w danym ośrodku niż w próżni.
A co się dzieje, gdy światło załamuje się na granicy ośrodków, z których żaden nie jest próżnią? Wówczas wzór:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{v_1}{v_2}$$

przekształcamy do postaci:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{v_1}{v_2}=\frac{\frac{1}{v_2}}{\frac{1}{v_1}}=\frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}}=\frac{n_2}{n_1}$$

Udowodniliśmy więc, że prawo Snelliusa można zapisać następująco:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{n_2}{n_1}$$

Ta postać jest szczególnie wygodna, gdyż współczynniki załamania różnych substancji znajdziemy w tablicach (tabela 16.3). Ponieważ w powietrzu światło rozchodzi się praktycznie z taką samą prędkością jak w próżni, więc dla powietrza $n \approx 1$, a dokładniej $n = 1{,}0003$.
A ile wynosi współczynnik załamania dla wody? Jeśli światło przechodzi z powietrza do wody, spełniona jest zależność:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{n_2}{n_1}$$

gdzie n_1 jest współczynnikiem załamania światła dla powietrza, a n_2 – dla wody. Po podstawieniu $n_1 = 1$ i przekształceniu otrzymujemy:

$$n_2=\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$$

Z wyników doświadczenia 5. na s. 45 wynika, że przy przejściu światła z powietrza do wody:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\approx 1{,}26$$

co oznacza, że $n_2 \approx 1{,}26$.

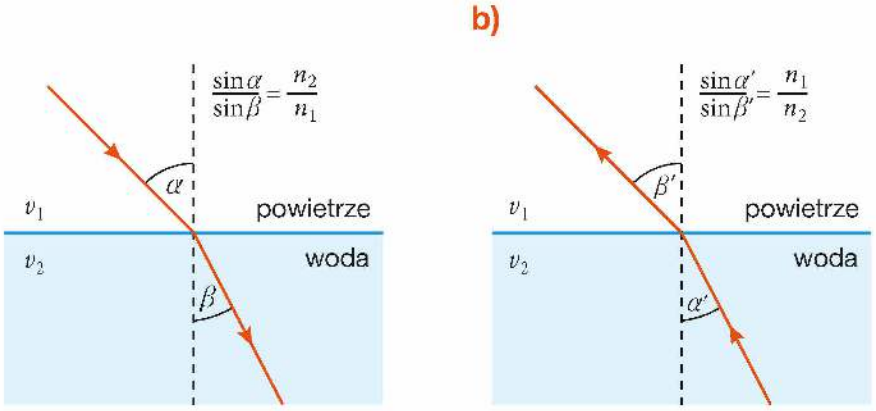
Tabela 16.3.

Współczynnik załamania światła (λ = 590 nm) dla wybranych substancji	
Lód	1,31
Woda	1,33
Alkohol etylowy	1,36
Szkło kwarcowe	1,46
Oliwa z oliwek	1,47
Pleksi	1,49
Szkło typu kron	1,50
Chlorek sodu	1,54
Szkło typu flint lekki	1,58
Cyrkonia	2,16
Diament	2,42

Wartość tablicowa współczynnika załamania dla wody to $n = 1{,}33$. Widzimy więc, że wyznaczyliśmy ten współczynnik stosunkowo dokładnie, mimo że wyniki poszczególnych pomiarów znacznie się różniły.

Odwracalność biegu światła

Rozważmy promień światła padający z powietrza na powierzchnię wody pod kątem $\alpha = 30°$. Zgodnie z prawem Snelliusa załamuje się on pod kątem $\beta = 22°$ (rys. 16.40a).
Jeśli z kolei promień przechodzący w przeciwną stronę, z wody do powietrza, pada na granicę ośrodków pod kątem $\alpha' = 22°$, to załamuje się on pod kątem $\beta' = 30°$ (rys. 16.40b).



Rys. **16.40.** Z powietrza do wody (a) i z wody do powietrza (b) światło może biec po tym samym torze

Nie jest to przypadek. Z prawa Snelliusa przy przejściu z ośrodka I do II (np. z powietrza do wody) i z ośrodka II do I (np. z wody do powietrza) wynikają następujące zależności:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}$$
$$\frac{\sin\alpha'}{\sin\beta'} = \frac{v_2}{v_1}$$

Można stąd obliczyć, że jeśli $\alpha' = \beta$, to $\beta' = \alpha$. Ogólnie można więc powiedzieć, że:

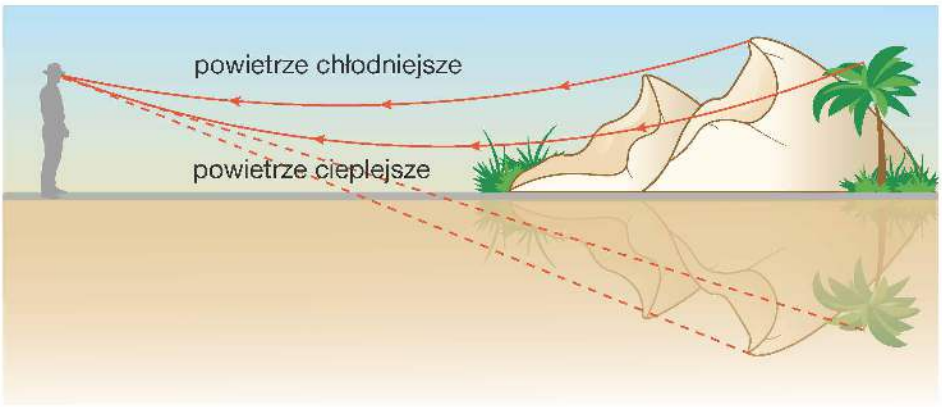
> Jeśli światło biegnie po określonej drodze z punktu A do B, to światło wysłane z punktu B może biec po tej samej drodze do punktu A.

Opisana zasada zwana jest zasadą odwracalności biegu promienia światła. Dotyczy ona nie tylko załamania światła, lecz także jego odbicia, gdyż w przypadku tego ostatniego zjawiska kąt odbicia jest równy kątowi padania.

Miraż dolny

Spektakularnym zjawiskiem wynikającym z załamania światła jest **miraż dolny**. Powstaje on, gdy powierzchnia ziemi jest mocno rozgrzana, dlatego często obserwujemy go na pustyni. Powietrze rozgrzane od gorącego piasku jest rozrzedzone, więc ma inny współczynnik załamania niż nieco chłodniejsze powietrze znajdujące się wyżej. Dlatego promień światła biegnący ukośnie w dół się zakrzywia, a jeśli to zakrzywienie jest dostatecznie duże, dociera on do obserwatora od dołu (rys. 16.41a).

a)



b)



Rys. **16.41.** Miraż dolny: a) schemat powstawania, b) zjawisko na pustyni

W Polsce miraże można czasem zaobserwować m.in. na Pustyni Błędowskiej i na Wyżynie Śląskiej.

Obraz niebieskiego nieba widoczny na poziomie ziemi wygląda jak tafla wody, a odwrócone obrazy innych przedmiotów wyglądają jak odbicie w wodzie. Dlatego patrzącemu na miraż wydaje się, że widzi wodę (rys. 16.41b). Jeśli do tego jest wyczerpany z odwodnienia, na miejscu pozornego jeziora czeka go wielkie rozczarowanie.

Aby zaobserwować miraż, nie trzeba wybierać się na pustynię. Wystarczy stanąć w upalny dzień na skraju szosy albo przyglądać się drodze, jadąc samochodem. Rozgrzany asfalt powoduje ogrzewanie powietrza, podobnie jak piasek pustyni. Droga wygląda wówczas, jakby znajdowały się na niej kałuże, które znikają, gdy się do nich zbliżamy (rys. 16.42).

Opis ilościowy tego zjawiska jest trudny, ponieważ gęstość powietrza (a więc również jego współczynnik załamania) zmienia się w sposób ciągły. W przybliżeniu możemy sobie wyobrażać kolejne cienkie warstwy powietrza różniące się współczynnikiem załamania. Promień światła ulega wtedy załamaniu na granicy kolejnych warstw (rys. 16.43).



Rys. **16.42.** Miraż – zjawisko na szosie



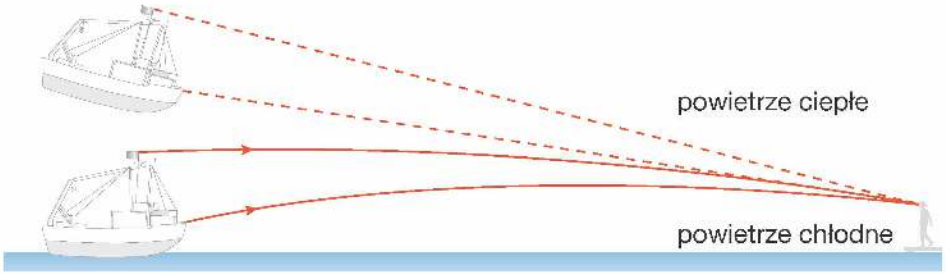
Rys. **16.43.** Powstawanie mirażu – ciągła zmiana współczynnika załamania przybliżona przez kolejne zmiany skokowe

Miraż górny

Znacznie rzadziej obserwujemy zjawisko przeciwne. Gdy powietrze jest o wiele chłodniejsze na mniejszych wysokościach, promienie światła biegnące ukośnie w górę zakrzywiają się w dół i docierają do obserwatora od góry (rys. 16.44a).

Efekt jest jeszcze dziwniejszy niż w przypadku mirażu dolnego – widać pozorny drugi obiekt unoszący się w powietrzu (rys. 16.44b). Jeśli rzeczywisty obiekt jest zasłonięty lub znajduje się za horyzontem, widać tylko ten pozornie latający.

a)



b)



Rys. **16.44.** Miraż górny: a) schemat powstawania, b) zjawisko widziane z plaży

Innym określeniem mirażu jest **fatamorgana** (po włosku *Fata Morgana* to Czarodziejka Morgana, postać ze średniowiecznych legend). Terminologia okazuje się jednak niejednoznaczna: czasami to określenie jest zarezerwowane tylko dla określonego typu mirażu, a czasem – zwłaszcza w języku potocznym – oznacza każdy ich rodzaj.

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać załamanie światła przy przejściu do innego ośrodka;
- wyznaczać doświadczalnie współczynnik załamania światła w danej substancji;
- posługiwać się prawem Snelliusa;
- wyjaśniać powstawanie mirażu.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Promień światła przechodzi z wody do szkła typu kron. Na granicę ośrodków pada pod kątem 60°. Oblicz kąt załamania.

Rozwiązanie

Skorzystamy z prawa Snelliusa:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

czyli sinus kąta załamania:

$$\sin\beta = \frac{n_1}{n_2}\sin\alpha$$

Współczynniki załamania dla wody (n_1) i szkła (n_2) sprawdzamy w tabeli 16.3 na s. 47:

$$n_1 = 1{,}33$$

$$n_2 = 1{,}50$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy sinus kąta załamania:

$$\sin\beta \approx 0{,}77$$

a stąd kąt załamania wynosi:

$$\beta \approx 50^\circ$$

Odpowiedź: Kąt załamania wynosi ok. 50°.

Uwaga. Tabela 16.3 dotyczy światła o określonej długości fali. Zależnością współczynnika załamania od długości fali zajmiemy się dokładniej w lekcji 16.8. Nie ma ona jednak wpływu na wynik zadania przy przyjętej przez nas dokładności obliczeń.

1. Oblicz, pod jakim kątem załamie się światło, jeśli kąt padania wynosi 20°, a światło przechodzi:

a) z wody do szkła typu kron,

b) ze szkła typu kron do wody.

2. Promień światła pada z powietrza pod kątem α na szybę o grubości d wykonaną ze szkła o współczynniku załamania n. Udowodnij, że po przejściu przez szybę promień jest równoległy do promienia padającego. Oblicz odległość między prostymi, na których leżą te promienie.

3. Światło przechodzi przez płaską szybę o grubości 5 mm wykonaną ze szkła o współczynniku załamania $n = 1{,}5$ i załamuje się dwukrotnie: raz przy wejściu z powietrza do warstwy szkła, drugi raz – przy wyjściu. Po przejściu przez szybę promień biegnie w kierunku równoległym do początkowego, ale jest nieco przesunięty (jak to stwierdziłeś podczas rozwiązywania zadania 2.). Oblicz:

a) o ile przesunięty jest promień padający na szybę pod kątem 45°,

b) przy jakim kącie padania promień nie ulega przesunięciu.

16.7. Częściowe i całkowite wewnętrzne odbicie

Przypomnij sobie

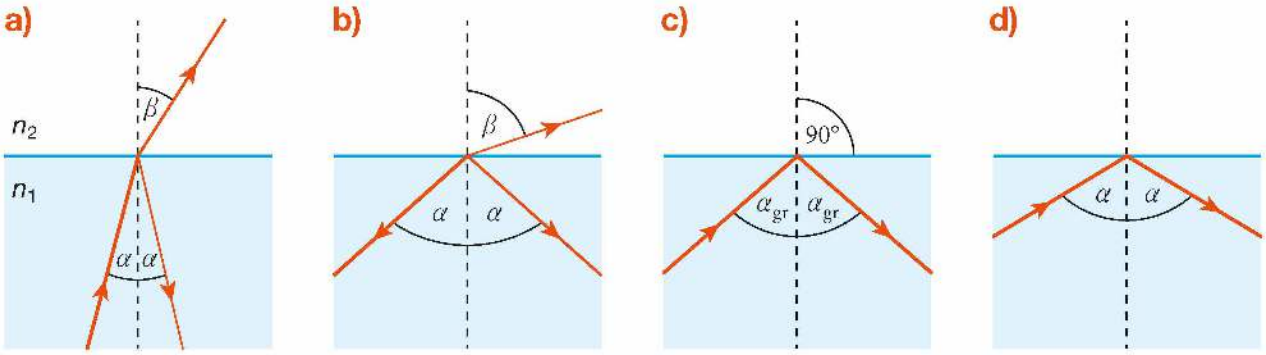
- Na granicy ośrodków światło ulega załamaniu, czyli zmienia się kierunek jego rozchodzenia.
- Kąt załamania zależy od kąta padania i współczynnika załamania dla danej pary ośrodków.

Wiemy, że na granicy dwóch ośrodków dochodzi do załamania światła. Trzeba jednak pamiętać, że załamuje się wówczas tylko jego część, a reszta ulega odbiciu. Właśnie dlatego można się przeglądać w powierzchni wody.

Gdy światło przechodzi do ośrodka, w którym rozchodzi się z większą prędkością, np. z wody do powietrza, kąt załamania jest większy od kąta padania (rys. 16.45a). Gdy kąt załamania jest już bliski 90°, coraz mniej światła ulega załamaniu, a coraz więcej – odbiciu (rys. 16.45b).
Przy pewnym kącie padania, zwanym **kątem granicznym** α_{gr}, kąt załamania wynosi 90° (rys. 16.45c) – a raczej wynosiłby 90°, jednak dla tej wartości kąta padania (α_{gr}) natężenie światła załamanego maleje do zera, czyli cała padająca fala odbija się od granicy ośrodków (nie ma promienia załamanego).

Całkowite wewnętrzne odbicie fal mechanicznych, cz. II s. 233

Podobnie dzieje się wówczas, gdy kąt padania jest większy od kąta granicznego (rys. 16.45d). Mówimy wówczas o **całkowitym wewnętrznym odbiciu.**



Rys. **16.45.** Odbicie wewnętrzne: a) i b) częściowe, c) i d) całkowite

Aby obliczyć kąt graniczny, korzystamy z prawa Snelliusa:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

A to ciekawe

Dzięki dużemu współczynnikowi załamania kąt graniczny dla diamentu wynosi tylko ok. 24°. Poprzez szlifowanie jubiler nadaje mu kształt, który sprawia, że promień świetlny opuszcza kryształ tylko w określonych kierunkach. Dlatego brylanty (oszlifowane diamenty) mienią się tak niepowtarzalnie, kiedy delikatnie nimi poruszamy. Podobnie do diamentu zachowuje się jego imitacja: cyrkonia, czyli krystaliczna forma tlenku cyrkonu (ZrO_2). Oba te kryształy występują bardzo rzadko w przyrodzie, ale w przeciwieństwie do diamentów cyrkonie można stosunkowo łatwo i tanio wytwarzać metodami przemysłowymi.



Należy przyjąć $\beta = 90°$, a więc $\sin\beta = 1$. Otrzymujemy stąd:

$$\sin\alpha_{gr} = \frac{n_2}{n_1}$$

W przypadku, gdy drugi ośrodek to próżnia lub powietrze, czyli gdy $n_2 = 1$, mamy:

$$\sin\alpha_{gr} = \frac{1}{n_1}$$

Zauważ, że im większy współczynnik załamania, tym mniejszy kąt graniczny. Na przykład, gdy światło przechodzi z wody ($n = 1{,}33$) do powietrza, kąt graniczny spełnia warunek:

$$\sin\alpha_{gr} = \frac{1}{1{,}33}$$

stąd:

$$\alpha_{gr} \approx 49°$$

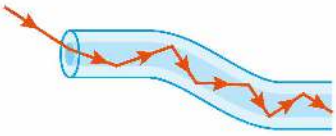
Zatem dla kąta padania równego co najmniej 49° promień światła padający na granicę woda–powietrze od strony wody nie ulega załamaniu, a tylko całkowitemu wewnętrznemu odbiciu.

Światłowody

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia znalazło zastosowanie w światłowodach (rys. 16.46).

Światłowód to elastyczne włókno wykonane z przezroczystego tworzywa o możliwie dużym współczynniku załamania. Gdy światłowód skręca, biegnący przez niego promień światła ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu i nie opuszcza wnętrza włókna.

Modulacja natężenia światła pozwala na wykorzystanie go do przesyłania informacji w formie analogowej lub cyfrowej. Dziś najczęściej stosuje się sygnał cyfrowy: internetowy, telefoniczny czy telewizyjny. Innym zastosowaniem jest diagnostyka medyczna. Światłowody umieszcza się m.in. w endoskopach, urządzeniach pozwalających w nieoperacyjny sposób dotrzeć w trudno dostępne miejsca wewnątrz ciała człowieka, np. do żołądka pacjenta.



Rys. 16.46. Schemat budowy i działania światłowodu

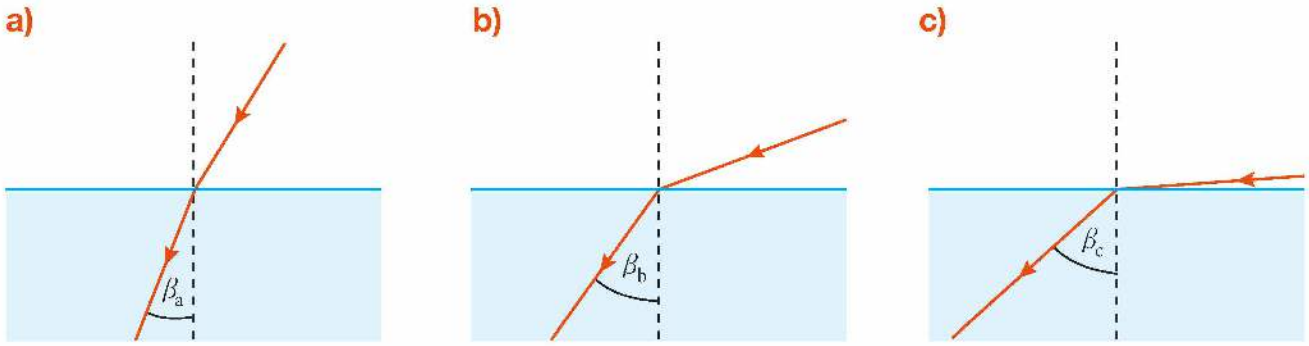


Rys. 16.47. Pojedynczy światłowód służący do transmisji danych ma średnicę włosa

Okno Snelliusa

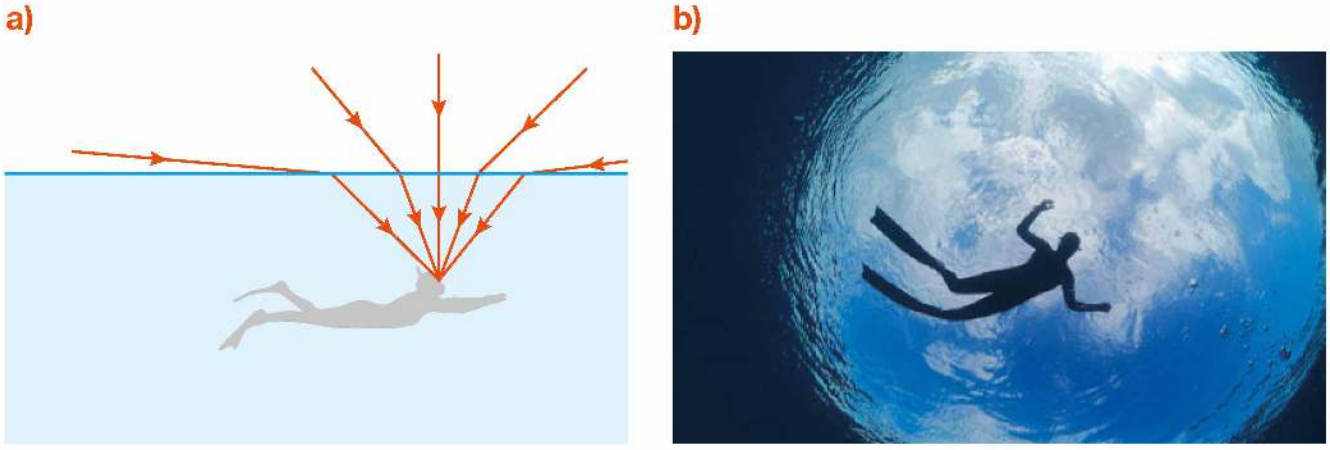
Zgodnie z zasadą odwracalności biegu promienia światła możemy spojrzeć z drugiej strony na istnienie kąta granicznego. Zauważmy, że każdy promień wchodzący do wody z powietrza załamuje się pod kątem nie większym niż kąt graniczny (rys. 16.48):

$$\beta_a < \beta_b < \beta_c < \alpha_{gr}$$



Rys. **16.48.** Załamanie promieni światła padających z powietrza do wody pod różnymi kątami

Oznacza to, że obserwator znajdujący się pod wodą widzi wszystko, co znajduje się nad wodą, ściśnięte do koła o promieniu kątowym (kącie między promieniem prostopadłym do powierzchni wody a promieniem najbardziej skrajnym) równym kątowi granicznemu (rys. 16.49a). Poza tym kołem widać albo całkowitą ciemność (jeśli woda jest głęboka, rys. 16.49b), albo odbicie dna.



Rys. **16.49.** Okno Snelliusa: a) mechanizm powstawania, b) zdjęcie spod wody

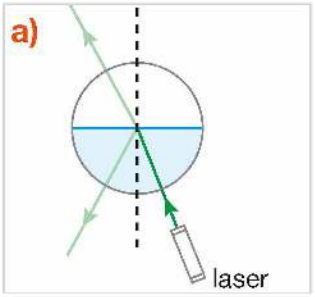
Wyznaczanie współczynnika załamania na podstawie kąta granicznego

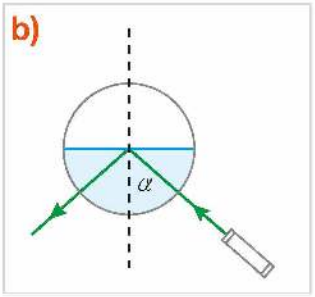
Współczynnik załamania światła można wyznaczać na wiele sposobów. Jeden z nich poznałeś w doświadczeniu 5. na s. 45. Teraz wykonasz kolejne doświadczenie, które pozwoli ci wykorzystać wiadomości na temat całkowitego wewnętrznego odbicia.

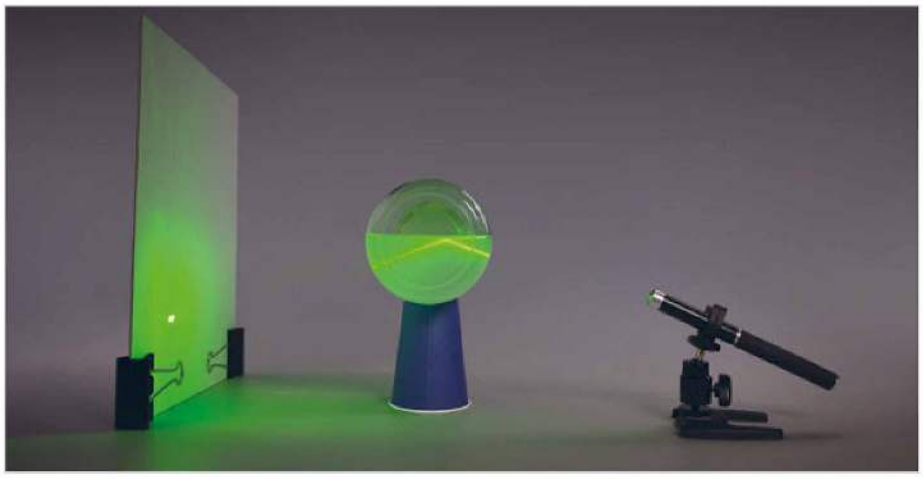
Doświadczenie 6 – obowiązkowe

Wyznaczanie współczynnika załamania światła z pomiaru kąta granicznego

1. Przygotuj przezroczysty słoik, wskaźnik laserowy, dużą kartkę, mleko, ołówek i kątomierz. Wygodnie jest zamocować kątomierz na statywie.
2. Do słoika nalej wody do połowy wysokości, dodaj kroplę mleka, wymieszaj ciecze i starannie zakręć słoik.
3. Ustaw słoik poziomo i poświeć laserem skośnie od dołu z prawej strony, aby promień padał wzdłuż promienia podstawy walca, którego kształt ma słoik (rys. a). Na ścianie albo kartce postawionej z boku zobaczysz dwie plamki. Jedna z nich jest oświetlona światłem załamanym na granicy wody i powietrza, a druga – światłem odbitym od tej granicy.
4. Zwiększaj stopniowo kąt padania promieni światła, aż górna plamka zniknie (patrz zdjęcie). To oznacza, że osiągnąłeś kąt graniczny. Zmierz kątomierzem kąt między promieniami (padającym i odbitym) i podziel przez 2, aby otrzymać kąt padania, czyli kąt α na rys. b).
5. Powtórz pomiary kilkakrotnie. Na podstawie wykonanych pomiarów wyznacz współczynnik załamania światła w wodzie.







Analiza wyników

W naszym doświadczeniu wykonaliśmy pięć pomiarów. Ich wyniki przedstawiliśmy w tabeli 16.4. Dla każdego z nich obliczyliśmy współczynnik załamania ze wzoru $n = \frac{1}{\sin\alpha_{gr}}$.

Średnia tak wyznaczonych wartości współczynnika załamania wynosi:

$$n \approx 1{,}29$$

Pomiarem najbardziej odbiegającym od średniej jest pomiar 1. Różnica wynosi 0,1. Ponieważ było 5 pomiarów, niepewność średniej możemy szacować na:

$$\frac{0{,}1}{\sqrt{5}} \approx 0{,}0447 \approx 0{,}04$$

Tak więc wynikiem naszych pomiarów jest:

$$n = 1{,}29 \pm 0{,}04$$

Tablicowa wartość 1,33 mieści się na granicy wyznaczonego przez nas przedziału.

Tabela 16.4. Wyniki doświadczenia 6.

Numer pomiaru	α_{gr} [°]	n
1	46	1,39
2	55	1,22
3	52	1,27
4	54	1,24
5	49	1,33

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia;
- wyznaczać kąt graniczny;
- wyznaczać doświadczalnie współczynnik załamania światła na podstawie pomiaru kąta granicznego.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Oblicz, pod jakim kątem załamie się światło padające na granicę wody i powietrza:

a) od strony wody pod kątem 20°,

b) od strony powietrza pod kątem 20°,

c) od strony wody pod kątem 80°,

d) od strony powietrza pod kątem 80°.

Wskazówka. Zastanów się, czy w opisanych sytuacjach załamanie w ogóle nastąpi.

2. Pryzmat wykonany ze szkła typu flint lekki ma kształt graniastosłupa o podstawie trójkąta prostokątnego równoramiennego. Oblicz i narysuj w zeszycie, w jaki sposób należy skierować na niego promień światła z czerwonego lasera, aby po wyjściu z pryzmatu biegł on:

a) prostopadle do promienia padającego,

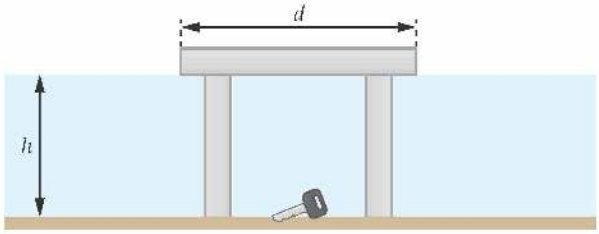
b) równolegle do promienia padającego.

Wskazówka. W pryzmacie może zachodzić całkowite wewnętrzne odbicie.

3. Oblicz kąt graniczny dla diamentu. Porównaj wynik swoich obliczeń z wartością podaną w ciekawostce na s. 53.

4. Dla szafiru kąt graniczny wynosi 34,4°. Jaki jest współczynnik załamania dla szafiru?

5. Na przystani woda ma głębokość 1,5 m. Turysta stojący na pomoście o szerokości d upuścił klucz, który upadł na dno dokładnie pośrodku pomostu (patrz rys.). Współczynnik załamania wody względem powietrza wynosi 1,33. Oblicz, przy jakiej minimalnej szerokości pomostu klucz nie będzie widoczny znad powierzchni wody.



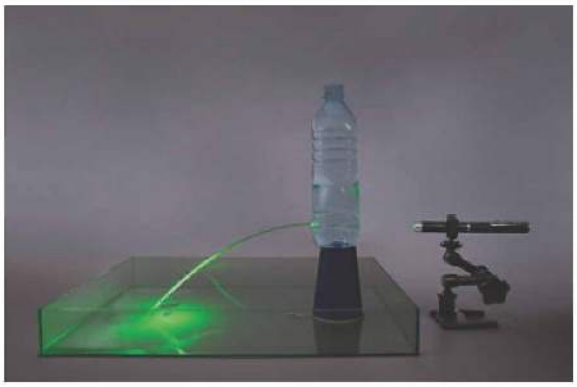
6. Wykonaj doświadczenie, które pozwoli ci zbudować działający, choć nietrwały światłowód.

a) Przygotuj laser oraz dużą butelkę po wodzie mineralnej. Przyda się pomoc drugiej osoby.

b) W ściance butelki w pobliżu dna wybij gwoździem niewielki otwór. Ścianka powinna być pionowa, przynajmniej w okolicach otworu.

c) Nalej do butelki wody i trzymaj ją nad wanną. Poproś o zgaszenie światła.

d) Trzymaj butelkę pionowo i świeć na nią laserem po przeciwnej stronie niż znajduje się otwór. Obserwuj, jak światło biegnie przez zakrzywiony strumień wody.



16.8. Rozszczepienie światła

Przypomnij sobie

- Światło ulega załamaniu na granicy ośrodków, czyli zmienia się tam kierunek jego rozchodzenia.
- Światło białe jest mieszaniną fal o różnych częstotliwościach. Można je rozszczepić za pomocą pryzmatu.

Mówiliśmy już, że barwa światła odpowiada jego częstotliwości. Wiesz również, że światło białe jest mieszaniną fal o różnych długościach. Rozszczepienie światła na poszczególne długości fal może nastąpić na skutek interferencji, np. na kropelkach wody podczas zjawiska iryzacji chmury. Ten sam efekt można uzyskać dzięki zjawisku załamania światła. Co więcej, to samo zjawisko pozwala połączyć ponownie poszczególne barwy w światło białe.

Doświadczenie 7

1. Przygotuj pryzmat, latarkę, ekran i dwie soczewki skupiające.
2. Ustaw latarkę i pryzmat tak, aby światło padało na pryzmat.
3. Za pryzmatem ustaw ekran i obracaj pryzmatem tak, aby na ekranie uzyskać kolorowe widmo światła.
4. Między pryzmatem a ekranem (bliżej pryzmatu) ustaw jedną soczewkę – dzięki temu wiązka rozszczepionego światła wychodząca z pryzmatu będzie mniej rozbieżna (rys. a).
5. Ustaw drugą soczewkę między ekranem i pierwszą soczewką (rys. b). Co obserwujesz?

Jeśli wiązka światła z latarki jest bardzo rozbieżna, to pomiędzy latarką a pryzmatem ustaw tekturkę z otworem przepuszczającym tylko część wiązki.

a)



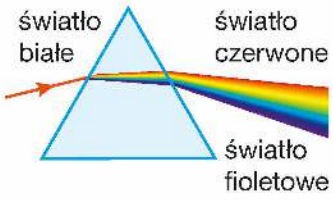
b)



W pierwszej części doświadczenia na ekranie można było zaobserwować barwne widmo światła. Ustawienie drugiej soczewki na drodze wiązki światła sprawiło, że na ekranie pojawiła się jasna plama światła – rozszczepione światło zostało połączone w światło białe.

Rozszczepienie światła w pryzmacie wynika z faktu, że prędkość światła w szkle zależy od długości fali. Światło fioletowe (o długości fali 400 nm

Każdy gatunek szkła ma inny współczynnik załamania.



Rys. 16.50. Podwójne załamanie światła w pryzmacie

w powietrzu) porusza się w szkle, z którego był zrobiony pryzmat, z prędkością 195 600 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$, a czerwone (o długości fali 700 nm w powietrzu) – z prędkością 198 400 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$. Wobec niemal jednakowej prędkości w powietrzu różna prędkość w szkle oznacza różny współczynnik załamania. Obliczmy go dla światła fioletowego:

$$n_{\text{fiol}} = \frac{299\,700\ \frac{\text{km}}{\text{s}}}{195\,600\ \frac{\text{km}}{\text{s}}} = 1{,}532$$

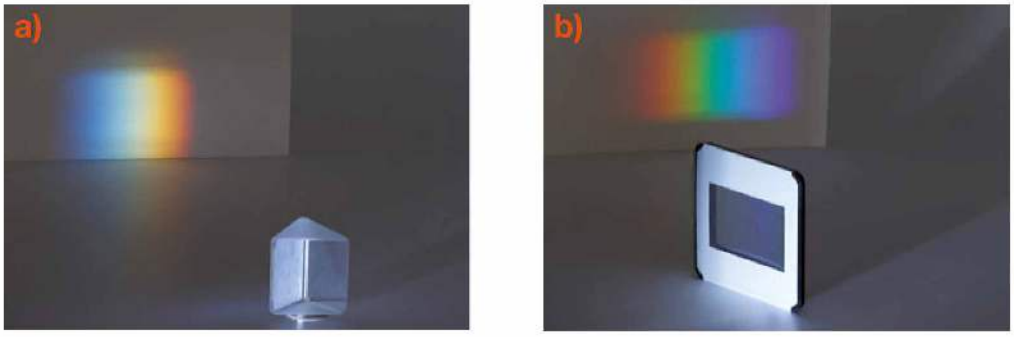
i dla światła czerwonego:

$$n_{\text{czerw}} = \frac{299\,700\ \frac{\text{km}}{\text{s}}}{198\,400\ \frac{\text{km}}{\text{s}}} = 1{,}511$$

Przy przejściu przez pryzmat światło załamuje się dwukrotnie: podczas przejścia z powietrza do szkła i podczas przejścia ze szkła do powietrza. Przy każdym załamaniu następuje rozszczepienie światła, dlatego łączny efekt jest większy i łatwy do zaobserwowania (rys. 16.50). Wcześniej, gdy badaliśmy jednokrotne załamanie, mogliśmy go pominąć.
W tabeli 16.5 podano, jak zmienia się współczynnik załamania światła w zależności od długości fali.

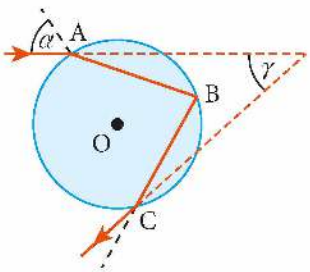
Tabela 16.5. Współczynniki załamania, λ – długość fali w próżni

λ [nm]	Woda	Szkło flint lekki
400	1,3433	1,603
450	1,3393	1,591
500	1,3363	1,584
550	1,3340	1,577
600	1,3326	1,574
650	1,3311	1,571
700	1,3302	1,569
750	1,3292	1,567



Rys. 16.51. Pryzmat (a) i siatkę dyfrakcyjną (b) oświetlono z tej samej strony. Zwróć uwagę, że mimo to kolory tęczy są w nich ułożone odwrotnie

W doświadczeniu obserwowaliśmy także połączenie światła o różnych barwach w światło białe. Zauważ, że przebiega ono zgodnie z zasadą odwracalności promieni świetlnych.
Światło może ulec rozszczepieniu nie tylko w pryzmacie. Na tej samej zasadzie powstaje tęcza.



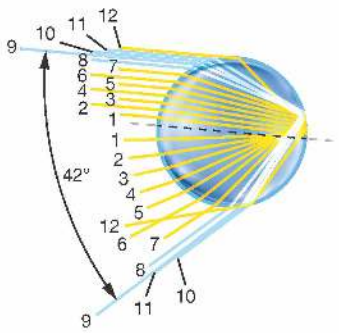
Rys. 16.52. Bieg światła przez kroplę wody

Jak powstaje tęcza

Na rysunku 16.52 przedstawiono bieg promienia światła przez kulistą kroplę wody. Promień światła wchodzi do niej w punkcie A, w którym się załamuje, następnie odbija od wewnętrznej powierzchni kropli w punkcie B, a wreszcie w punkcie C załamuje i wychodzi z kropli do powietrza.

Kąt padania światła na kroplę w punkcie A oznaczono przez α, a kąt między promieniem padającym a wychodzącym z kropli wody – przez γ.

Promienie światła słonecznego padają na kroplę równolegle. Po załamaniu nie są już równoległe. Jednak kąt γ pomiędzy ich początkowym a końcowym kierunkiem nie przekracza 42°. W dodatku wiele promieni biegnie pod kątem zbliżonym do 42° (rys. 16.53). Dlatego właśnie widzimy na niebie jasny łuk o promieniu kątowym 42°, wewnątrz niego niebo jest także dość jasne (to promienie, dla których $\gamma < 42°$), a z kolei na zewnątrz – ciemniejsze.



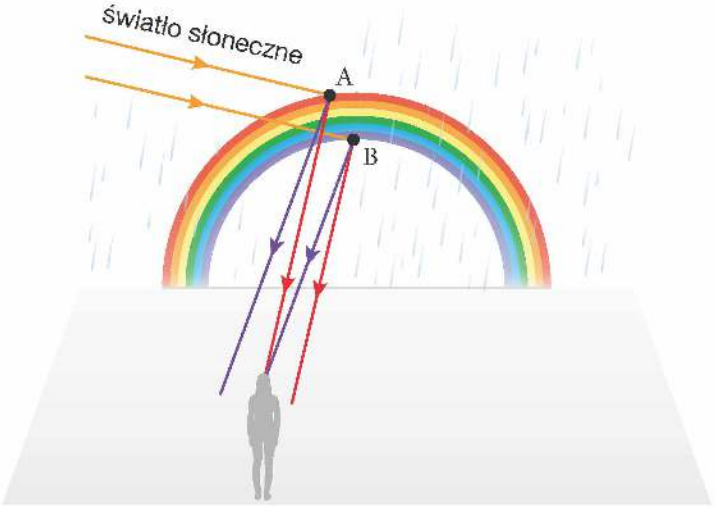
Rys. **16.53.** Załamanie poszczególnych promieni w kropli wody w zależności od miejsca padania promieni

Dlaczego jednak tęcza jest nie tylko jasna, ale i barwna? Otóż dla poszczególnych długości fali różne są kąty, pod jakimi ugina się najwięcej promieni. Dla czerwieni wynosi ok. 42°, a dla fioletu ok. 40°.
Można by sądzić, że kolor czerwony, załamujący się pod większym kątem, znajduje się wewnątrz łuku. Byłoby tak, gdyby jedna jedyna kropla wody tworzyła całą tęczę na jakimś ekranie. Aby zrozumieć, dlaczego kolejność barw jest odwrotna – z czerwienią na zewnątrz – trzeba rozważyć tworzenie tęczy przez bardzo wiele kropli.

Jedna tęcza z wielu kropel

Opisaliśmy rozszczepienie światła przez pojedynczą kroplę. Jednak do powstania tęczy jedna kropla nie wystarczy. Obserwator znajduje się na tyle daleko, że do jego oczu od jednej kropli dociera tylko światło jednej barwy. Tęczę widzimy dlatego, że dociera do nas światło od wielu kropel.

Na rysunku 16.54 przedstawiamy obserwatora i dwie przykładowe krople wody znajdujące się w punktach A i B. Każda z nich rozszczepia światło na wszystkie barwy (dla uproszczenia zaznaczyliśmy tylko skrajne – czerwoną i fioletową). Jednak z kropli A do obserwatora dociera tylko światło czerwone, a z kropli B – tylko fioletowe.



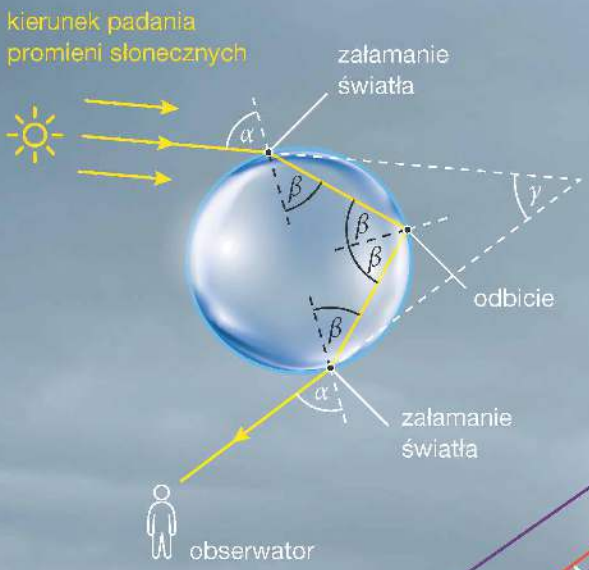
Rys. **16.54.** Powstawanie tęczy

TĘCZA

Czy zwróciłeś kiedyś uwagę, że często powyżej jasnego łuku tęczy widać drugi, nieco słabszy łuk o kolorach ułożonych w odwrotnej kolejności? Albo że wewnątrz tęczy niebo jest jaśniejsze? Przyjrzyjmy się temu ciekawemu i złożonemu pod względem fizycznym zjawisku.

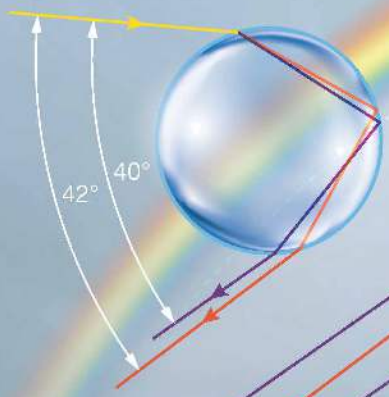
W JAKI SPOSÓB WIDZIMY ŚWIATŁO SŁONECZNE, KTÓRE PADA ZZA NASZYCH PLECÓW

W każdej z kropli część promieni słonecznych zawraca. Dzieje się tak dlatego, że promień światła ulega **załamaniu** na krawędzi kropli, a następnie **odbija się** od jej wewnętrznej powierzchni i ponownie ulega **załamaniu**, gdy wychodzi z kropli do powietrza.

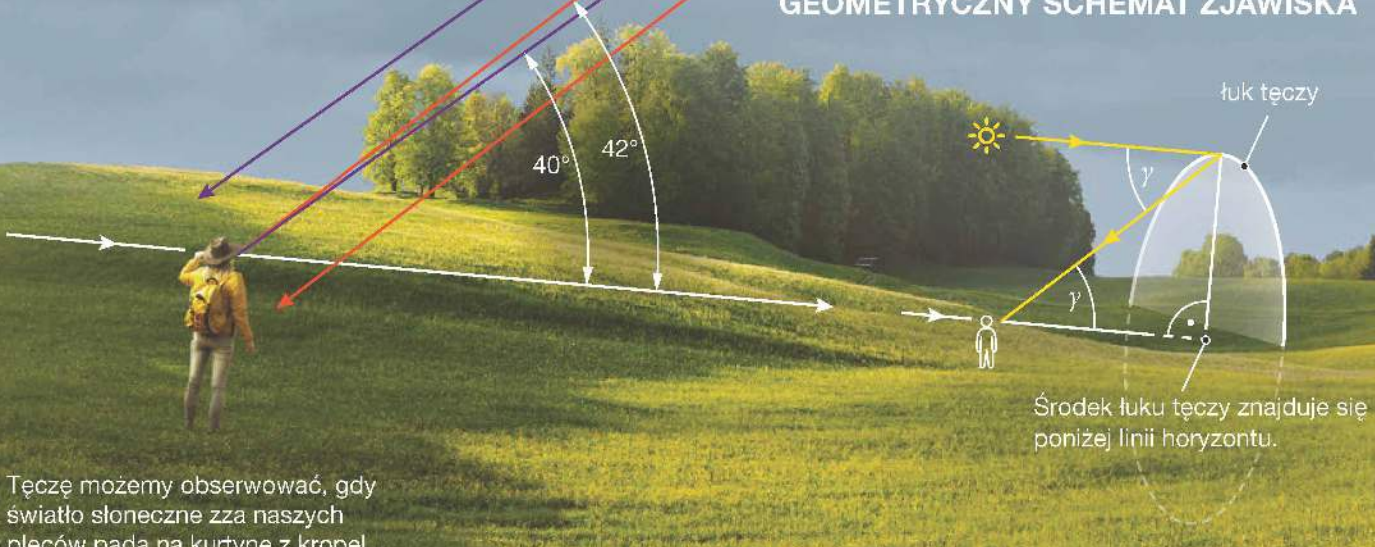


BARWY TĘCZY

Barwy tęczy są skutkiem rozszczepienia światła białego w podobny sposób jak w pryzmacie. Poszczególne barwy składające się na światło białe ulegają załamaniu pod różnymi kątami.



GEOMETRYCZNY SCHEMAT ZJAWISKA



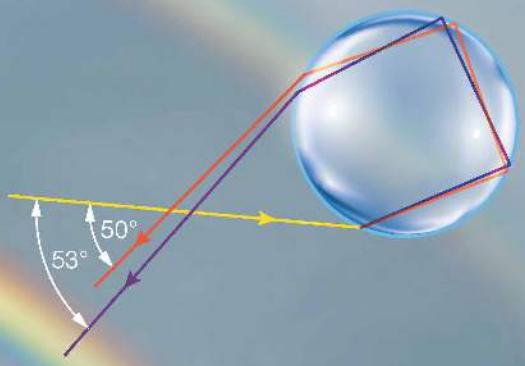
Tęczę możemy obserwować, gdy światło słoneczne zza naszych pleców pada na kurtynę z kropel wody przed nami.

Do naszego oka z niektórych kropel dociera światło czerwone, z innych światło fioletowe, a z jeszcze innych o pozostałych barwach.



DRUGI ŁUK TĘCZY

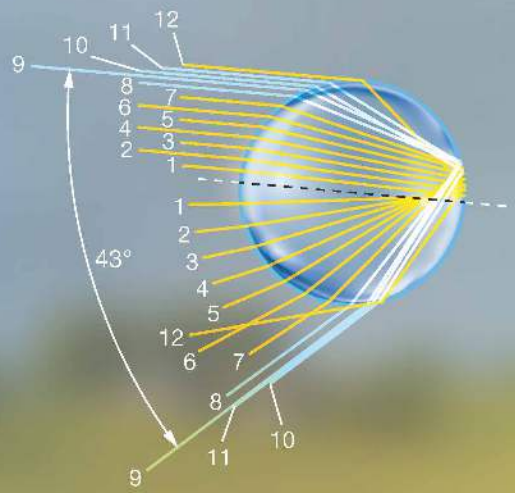
Z niektórych kropel do oka dociera światło odbite wewnątrz kropli dwukrotnie. Właśnie te promienie tworzą drugi łuk tęczy, w którym barwy układają się w odwrotnej kolejności. Jest on znacznie słabiej widoczny.

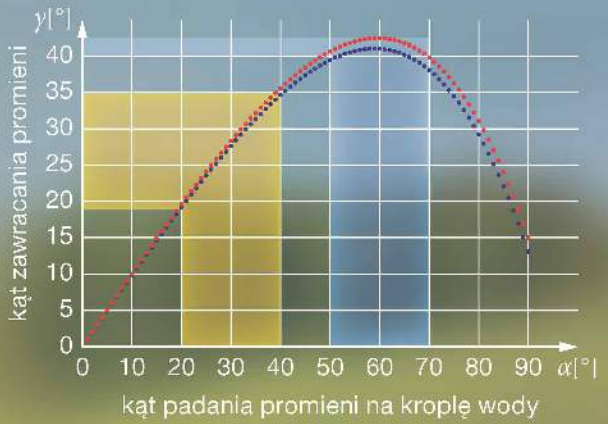


ROZJAŚNIENIE WEWNĄTRZ TĘCZY

Kąt γ, pod jakim w kropli światło zawraca, zależy od tego, w jakiej odległości od środka kropli promienie wniknęły do jej wnętrza, czyli od kąta padania α. Przykładowo, promienie wychodzące światła czerwonego tworzą wachlarz od 0 do 42,3°, przy czym maksimum intensywności przypada na 42° (patrz wykres).

Łuki poszczególnych kolorów tęczy obserwujemy w zakresie od 40° do 42°, ponieważ właśnie w tym przedziale poszczególne barwy osiągają swoje maksima intensywności. Poniżej 40° barwy mieszają się ze sobą, co w efekcie daje światło białe, obserwowane jako rozjaśnienie wewnątrz tęczy.



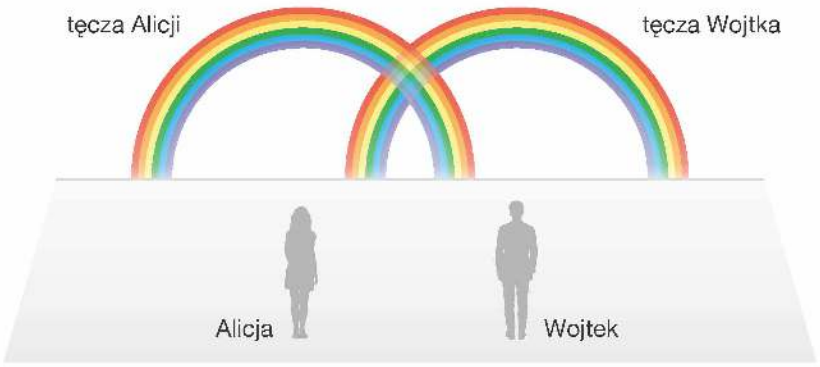


Za tworzenie tęczy odpowiadają promienie 8–11. Pozostałe promienie są skierowane pod kątem mniejszym niż 42°.

Promienie, których kąt padania α jest inny (np. od 20° do 40°), zawracają w znacznie szerszym przedziale kątów γ.

Promienie padające na krople pod kątem α w przedziale od 50° do 70° zawracają pod kątem ok. 42°.

Zwróćmy uwagę, że rysunek 16.54 na s. 59 przedstawia tęczę widzianą przez jednego konkretnego obserwatora. Gdyby stanął on gdzie indziej, dochodziłoby do niego światło z innych kropel. Tęczę zawsze widzimy naprzeciwko siebie. Nawet jeśli druga osoba stoi obok nas i wspólnie oglądamy tęczę, to tak naprawdę każdy ogląda własną tęczę – powstaje ona w innych kropelkach wody (rys. 16.55). Podsumowanie informacji na temat tęczy znajdziesz na infografice na s. 60–61.



Rys. **16.55.** Każdy obserwator widzi własną tęczę, powstającą w innych kroplach wody

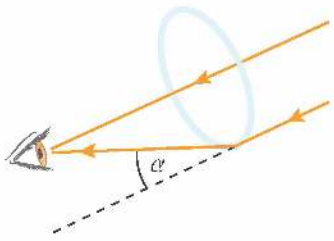
Halo

Ciekawym zjawiskiem jest też halo (rys. 16.56), czyli bardzo jasny pierścień tworzący się na niebie wokół Słońca w mroźny, słoneczny dzień. Powstaje on w podobny sposób jak tęcza, z tą różnicą, że zamiast w kroplach deszczu światło załamuje się w sześciokątnych kryształkach lodu. Kryształki powodują odchylenie promieni słonecznych o ok. 22°. Kąt ten w bardzo małym stopniu zależy od długości fali, dlatego halo jest raczej białe (barwy widać o wiele słabiej niż w przypadku tęczy).

a)



b)



Rys. **16.56.** Halo słoneczne (a) i schemat jego powstawania (b)

Po tej lekcji powinieneś

- wyjaśniać zjawisko rozszczepienia światła przy jego załamaniu;
- opisywać bieg światła przez pryzmat;
- wyjaśniać, jak powstaje tęcza.

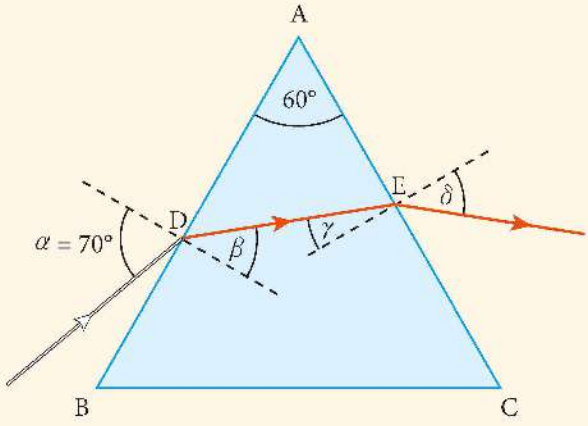
Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Pryzmat wykonany ze szkła typu flint lekki ma kształt graniastosłupa, którego podstawa jest trójkątem równobocznym. Promień światła białego pada na jedną ze ścian bocznych tego pryzmatu pod kątem $\alpha = 70°$. Oblicz kąt między promieniami czerwonym i fioletowym opuszczającymi pryzmat.

Rozwiązanie

Zacznijmy od sporządzenia odpowiedniego rysunku (patrz obok). Przeanalizujmy bieg promienia światła białego w opisanej sytuacji. Przyjmijmy, że pada on na pryzmat w punkcie D.



Wiemy, że promień pada na pryzmat pod kątem $\alpha = 70°$ i załamuje się pod kątem $\beta < \alpha$. Następnie biegnie wewnątrz pryzmatu, pada na ściankę pryzmatu w punkcie E pod kątem γ i załamuje się pod kątem $\delta > \gamma$.

Światło białe jest złożone z wielu barw, m.in. czerwonej i fioletowej, o których mowa w zadaniu. Najpierw wykonamy obliczenia dla barwy czerwonej. Aby obliczyć miarę kąta β dla tej barwy (oznaczmy ją β_{cz}), skorzystamy z prawa Snelliusa:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta_{cz}} = \frac{n_{cz}}{1}$$

gdzie n_{cz} jest współczynnikiem załamania światła dla szkła flint lekki w przypadku barwy czerwonej. Dla powietrza przyjęliśmy współczynnik załamania równy 1.

W tablicach sprawdzamy, że światło o takiej barwie ma w próżni długość 750 nm, a współczynnik załamania wynosi w tym przypadku $n_{cz} = 1{,}567$. Za pomocą kalkulatora z funkcjami trygonometrycznymi lub zwykłego kalkulatora i tablic obliczamy kąt β_{cz}:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta_{cz}} \approx 1{,}567$$

$$\sin\beta_{cz} = \frac{\sin\alpha}{1{,}567} \approx 0{,}5997$$

$$\beta_{cz} \approx 36{,}8°$$

Przejdźmy do obliczenia miary kąta γ. W tym celu wykorzystamy wiedzę z geometrii.

Kąty β i EDA tworzą kąt prosty, więc:

$$\sphericalangle EDA = 90° - \beta$$

Kąty DEA, EDA i 60° są kątami jednego trójkąta, czyli:

$$\sphericalangle DEA + \sphericalangle EDA + 60° = 180°$$

Wyznaczamy kąt DEA:

$$\sphericalangle DEA = 120° - \sphericalangle EDA = 120° - (90° - \beta) = \beta + 30°$$

a następnie za jego pomocą kąt γ:

$$\gamma = 90° - \sphericalangle DEA = 60° - \beta$$

W naszym przypadku:

$$\gamma_{cz} = 60° - \beta_{cz} = 23{,}2°$$

Do obliczenia pozostał kąt załamania światła przy przejściu ze szkła do powietrza, oznaczmy go jako δ_{cz}.

Ponownie skorzystamy z prawa Snelliusa. Tym razem światło przechodzi ze szkła ($n_{cz} = 1{,}567$) do powietrza ($n = 1$), a więc prawo to przyjmuje postać:

$$\frac{\sin\gamma_{cz}}{\sin\delta_{cz}} = \frac{1}{n_{cz}}$$

Stąd:

$$\sin\delta_{cz} = n_{cz}\sin\gamma_{cz} \approx 0{,}617$$

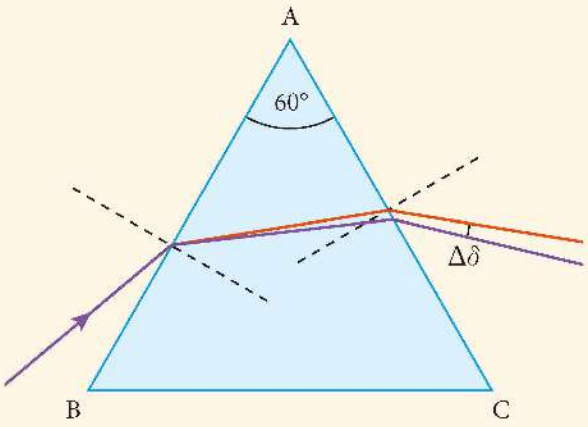
$$\delta_{cz} \approx 38{,}2°$$

Analogiczne obliczenia wykonujemy dla światła fioletowego (400 nm, $n_f = 1{,}603$). Otrzymujemy odpowiednio:

$$\beta_f \approx 35{,}9°,\ \gamma_f \approx 24{,}1°,\ \delta_f \approx 40{,}9°$$

Kąt między promieniami załamanymi jest równy różnicy kątów załamania $\delta_f - \delta_{cz}$ i wynosi:

$$\Delta\delta = 40{,}9° - 38{,}2° = 2{,}7°$$



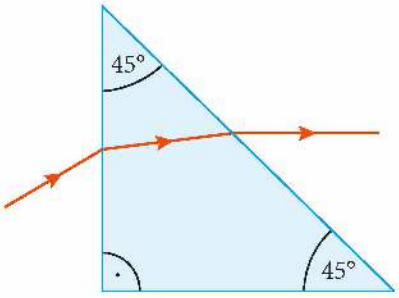
Odpowiedź: Kąt między załamanym promieniem czerwonym i fioletowym wynosi ok. 3°.

1. Podaj przykłady sytuacji, w których udało ci się zaobserwować rozszczepienie światła.

2. Na rysunku przedstawiono schematycznie przejście jednobarwnego promienia światła przez pryzmat wykonany ze szkła flint lekki. Kąt padania wynosił 30°. Promień zastąpiono promieniem światła białego. Oblicz kąt pomiędzy promieniem czerwonym a fioletowym:

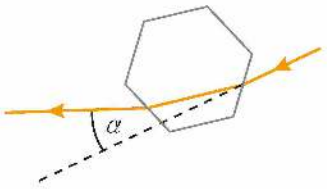
a) po pierwszym załamaniu po wejściu do pryzmatu,

b) przy wyjściu z pryzmatu.



3. Promień światła białego pada z powietrza do wody pod kątem 30°. Oblicz kąt pomiędzy załamanym promieniem fioletowym a załamanym promieniem czerwonym.

4. Na rysunku przedstawiono schemat załamania światła w kryształku lodu. Taki bieg promienia prowadzi do powstawania halo. Kryształek ma kształt graniastosłupa prawidłowego sześciokątnego, a wewnątrz kryształka promień biegnie równolegle do ściany bocznej.



Uzasadnij za pomocą odpowiednich obliczeń, że promień światła słonecznego zostaje odchylony o kąt 22° (na rysunku oznaczony jako α).

16.9. Soczewki

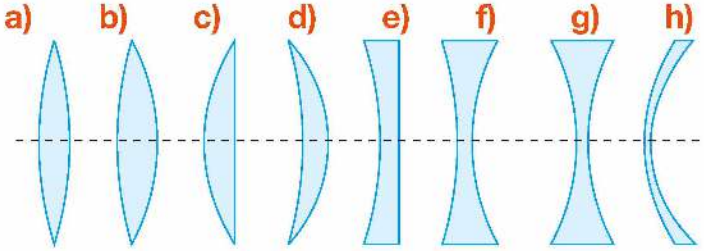
Przypomnij sobie

- Gdy światło przechodzi do innego ośrodka, ulega załamaniu.
- Zależność między kątem załamania a kątem padania jest określona prawem Snelliusa.
- Soczewka skupiająca skupia równoległą wiązkę światła w jednym punkcie zwanym ogniskiem.
- Soczewka rozpraszająca zmienia równoległą wiązkę światła w wiązkę rozbieżną.



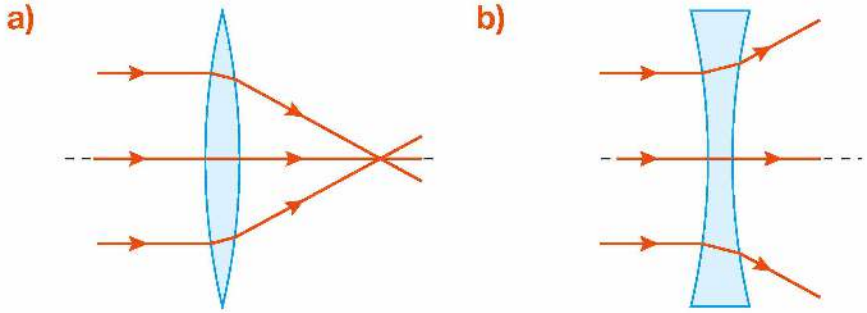
Rys. 16.57. Soczewka skupiająca może służyć do powiększania blisko położonych obiektów

Soczewki mogą mieć różne kształty (rys. 16.58). Na ogół jednak mają oś symetrii, czyli **oś optyczną**, na rysunkach poniżej zaznaczoną linią przerywaną



Rys. 16.58. Soczewki o różnych kształtach (widok w przekroju)

Soczewka działa dzięki dwukrotnemu załamaniu światła: promień załamuje się zarówno wtedy, gdy przechodzi z otoczenia do soczewki, jak i wtedy, gdy przechodzi z soczewki do otoczenia.
Najważniejszy podział soczewek – na **skupiające** i **rozpraszające** – opiera się na sposobie, w jaki soczewka zmienia padającą na nią równoległą do osi optycznej wiązkę światła (rys. 16.59).



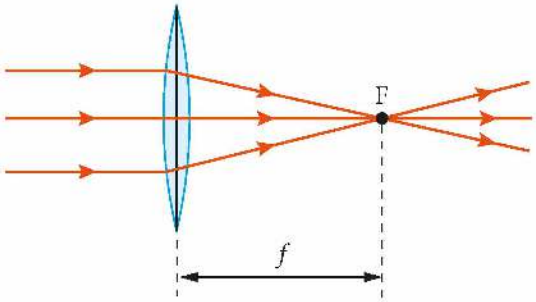
Rys. 16.59. Przejście równoległej wiązki światła przez soczewkę: a) skupiającą, b) rozpraszającą

Zwykle korzystamy z soczewek wykonanych ze szkła lub tworzyw sztucznych, a otaczającym je ośrodkiem jest powietrze. Wówczas jeśli grubość soczewki jest większa przy jej osi niż przy brzegu, soczewka jest skupiająca, a jeśli jest na odwrót – soczewka jest rozpraszająca. Między innymi do soczewek skupiających należą soczewki wypukłe, a do rozpraszających – wklęsłe.

Ognisko i ogniskowa soczewki

Pomijamy zależność współczynnika załamania od długości fali (czyli od barwy światła).

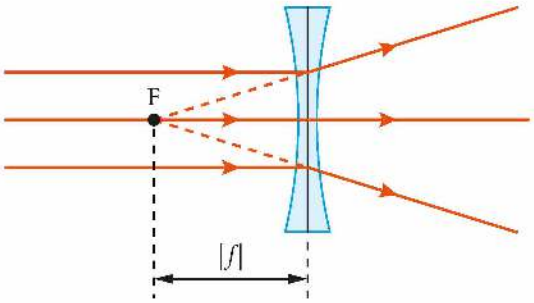
Gdy soczewka skupia równoległą wiązkę światła, po przejściu przez nią promienie spotykają się w jednym punkcie (rys. 16.60), który nazywamy **ogniskiem** i oznaczamy F. Za ogniskiem wiązka staje się rozbieżna. Odległość ogniska od środka soczewki nazywamy **ogniskową** i oznaczamy symbolem f. Przekonasz się, że ta wielkość ma decydujące znaczenie dla tworzenia obrazów przez soczewkę.



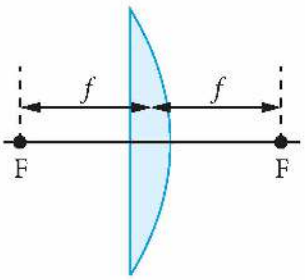
Rys. 16.60. Ognisko i ogniskowa soczewki skupiającej

W przypadku soczewki rozpraszającej wiązka promieni jest rozbieżna i nigdzie się nie skupia. Okazuje się jednak, że przedłużenia promieni przecinają się w jednym punkcie (rys. 16.61) – nazywamy go **ogniskiem pozornym** soczewki.

Aby zaznaczyć, że ognisko pozorne znajduje się przed soczewką, ogniskową zapisujemy ze znakiem minus (np. $f = -20$ cm).



Rys. 16.61. Ognisko pozorne i ogniskowa soczewki rozpraszającej



Rys. 16.62. Nawet w soczewce niesymetrycznej ogniska są położone w takich samych odległościach po obu stronach soczewki

Do wyznaczenia ogniska soczewki posługiwaliśmy się padającą na nią równoległą wiązką światła. Gdyby wiązka padała z drugiej strony, znaleźlibyśmy drugie ogniskowe tej samej soczewki.

> Ogniska soczewki leżą na osi soczewki po jej dwóch stronach, w jednakowej odległości od soczewki.

Ostatnie ze stwierdzeń wymienionych powyżej pozostaje prawdziwe nawet wtedy, gdy soczewka jest niesymetryczna, np. jest to soczewka płasko-wypukła (rys. 16.62). Obowiązuje ono przy założeniu, że pomijamy grubość soczewki, tzn. że grubość ta jest znacznie mniejsza od jej ogniskowej, a także od średnicy soczewki.

Zdolność skupiająca

Gdy soczewka ma mniejszą ogniskową, czyli gdy ognisko jest położone bliżej soczewki, skupia ona promienie światła mocniej – mówimy, że jest w większym stopniu zdolna do skupiania. Dlatego odwrotność ogniskowej soczewki nazywamy jej **zdolnością skupiającą**:

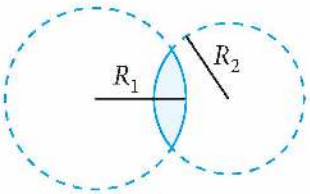
$$Z = \frac{1}{f}$$

W przypadku soczewki rozpraszającej, o ujemnej ogniskowej, z powyższego wzoru wynika, że również jej zdolność skupiająca jest ujemna.
Jednostką zdolności skupiającej jest **dioptria** ($1\ \mathrm{D} = \frac{1}{\mathrm{m}}$). Z tą jednostką spotykamy się przy doborze okularów. Na przykład soczewka okularowa „+2" to soczewka skupiająca o zdolności skupiającej $Z = 2$ D, czyli o ogniskowej $f = \frac{1}{2}\ \mathrm{m} = 50\ \mathrm{cm}$, natomiast soczewka „–1,5" to soczewka rozpraszająca o $Z = -1{,}5$ D, a więc o ogniskowej:

$$f = -\frac{1}{1{,}5}\ \mathrm{m} = -\frac{2}{3}\ \mathrm{m} \approx -67\ \mathrm{cm}$$

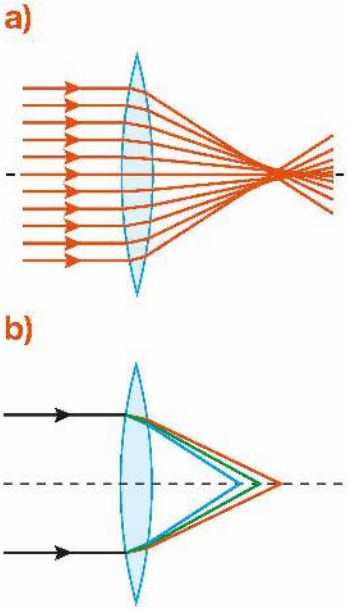
Soczewki sferyczne i asferyczne

Powierzchnia większości obecnie produkowanych soczewek po obu stronach ma kształt części sfery (rys. 16.63) lub płaską powierzchnię z jednej strony. Stąd ich nazwa: **soczewki sferyczne**. Soczewki takie mają jednak jedną podstawową wadę – wbrew temu, co powiedzieliśmy wcześniej, w ich ognisku przecinają się tylko promienie biegnące **blisko osi** soczewki (w przypadku soczewek rozpraszających w ognisku pozornym przecinają się tylko przedłużenia promieni biegnących blisko osi).



Rys. 16.63. Soczewka sferyczna

Zjawisko to nazywamy **aberracją sferyczną** (rys. 16.64a). W naszych rozważaniach pominiemy to zjawisko. W przypadku precyzyjnych przyrządów optycznych, aby zniwelować negatywne skutki aberracji sferycznej, stosuje się układy kilku soczewek.
Obecnie coraz częściej można spotkać **soczewki asferyczne**, które mają bardziej skomplikowany kształt, a przez to są droższe w produkcji, ale za to działają dokładnie tak, jak to opisaliśmy.
Jednak nawet soczewki asferyczne nie pozwalają uniknąć innej istotnej wady: **aberracji chromatycznej**, czyli skupiania w różny sposób światła o różnych barwach (rys. 16.64b). Ta wada wynika ze znanego ci już faktu, że światło o różnych barwach załamuje się w różnym stopniu.



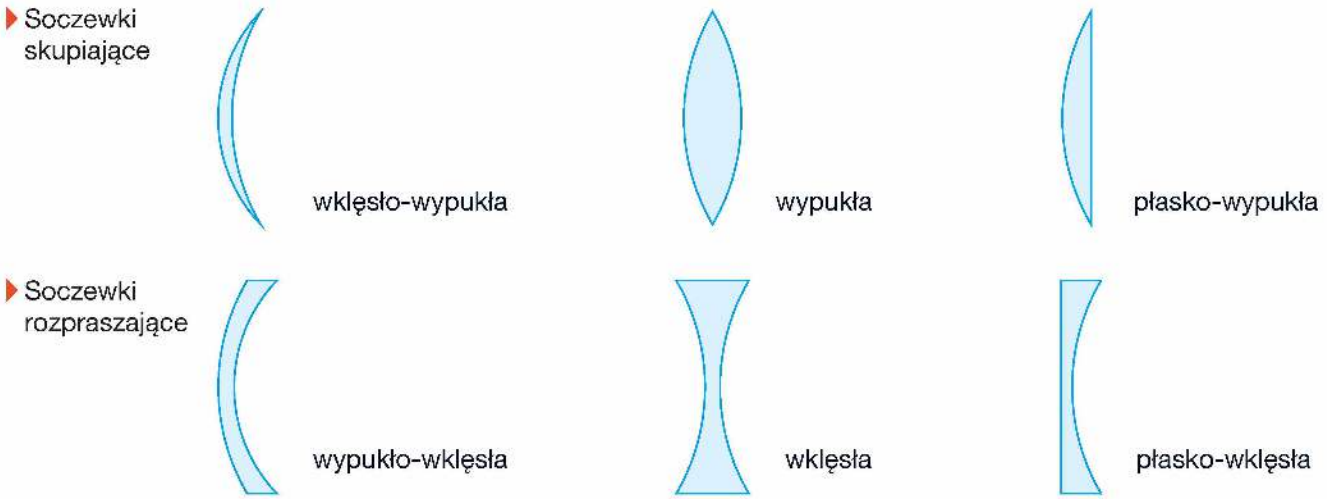
Rys. 16.64. Aberracja
a) sferyczna,
b) chromatyczna

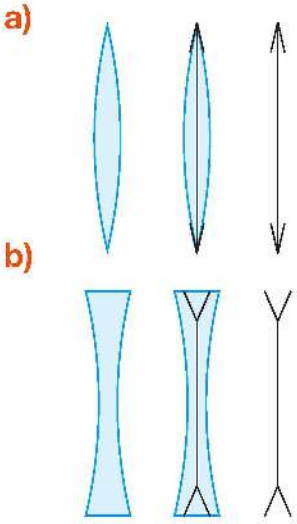
Od czego zależy ogniskowa soczewki

Ogniskowa soczewki zależy od **materiału**, z jakiego została wykonana (punkt 1), oraz od jej **kształtu** (punkt 2).

1. Im większy współczynnik załamania materiału, tym większa zdolność skupiająca soczewki, a więc tym mniejsza ogniskowa.
2. Im mocniej są zakrzywione powierzchnie soczewki, tym większa jej zdolność skupiająca, a więc tym mniejsza ogniskowa.

Różne kształty soczewek





Rys. 16.65. Schematyczne oznaczenia soczewki: a) skupiającej, b) rozpraszającej

Przybliżenie cienkiej soczewki

Promień światła przechodzący przez soczewkę załamuje się dwa razy: gdy do niej wchodzi i gdy z niej wychodzi. W naszych rozważaniach pominiemy ten dość skomplikowany mechanizm, a także grubość soczewki. Dlatego w uproszeniu będziemy rysować załamanie światła w soczewce tylko w jednym miejscu – w jej środku.

Umownie cienką soczewkę przedstawiamy w postaci strzałki zakończonej grotami z obu stron. Kierunek jej grotów odwzorowuje zakrzywienie powierzchni rzeczywistej soczewki (rys. 16.65). Przedstawionych symboli używamy na oznaczenie wszystkich soczewek skupiających i rozpraszających, niezależnie od ich rzeczywistego kształtu.

Po tej lekcji powinieneś

- rozróżniać soczewki skupiające i rozpraszające;
- opisywać bieg wiązki światła przez soczewkę skupiającą i rozpraszającą;
- posługiwać się pojęciami: ogniskowa i zdolność skupiająca soczewki;
- obliczać zdolność skupiającą soczewki;
- wyjaśniać, na czym polega przybliżenie cienkiej soczewki.

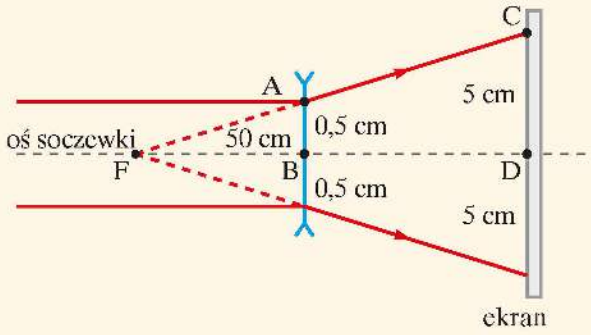
Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

W jakiej odległości od soczewki o ogniskowej $f = -50$ cm należy ustawić ekran, aby wiązka światła o średnicy 1 cm padająca na soczewkę wzdłuż jej osi oświetliła na ekranie koło o średnicy 10 cm?

Rozwiązanie

Podstawową częścią rozwiązania tego zadania jest sporządzenie poprawnego rysunku i zaznaczenie na nim danych. Zwróćmy uwagę, że ujemna ogniskowa oznacza, że mamy do czynienia z soczewką rozpraszającą. Wiązka składa się z nieskończenie wielu promieni, ale na rysunku wystarczy zaznaczyć dwa promienie na jej brzegach.



Przyjmijmy oznaczenia jak na rysunku: A – punkt, w którym skrajny promień pada na soczewkę, B – środek soczewki, C – punkt, w którym skrajny promień pada na ekran, D – punkt, w którym oś soczewki przecina ekran, F – ogniskowe pozorne soczewki po stronie przeciwnej niż ekran.

Musimy ustalić długość odcinka BD. Zauważmy, że trójkąty AFB i CFD są podobne. Możemy więc zapisać:

$$\frac{AB}{BF} = \frac{CD}{DF}$$

Po przekształceniu i podstawieniu danych otrzymujemy: $DF = 5$ m.

Skoro znamy ogniskową soczewki, to długość odcinka BD wynosi: $BD = DF - BF = 4{,}5$ m.

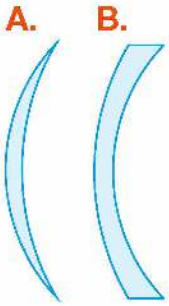
Odpowiedź: Ekran należy ustawić w odległości 4,5 m od soczewki.

1. Określ, czy soczewka o danej zdolności skupiającej jest soczewką skupiającą czy rozpraszającą. Oblicz jej ogniskową.

a) $Z = 4$ D

b) $Z = -5$ D

2. Na ilustracji widzisz dwie soczewki umieszczone w powietrzu. Która z nich jest soczewką skupiającą, a która rozpraszającą?



3. Równoległa wiązka światła o średnicy 5 cm pada na soczewkę o ogniskowej $f = 10$ cm równolegle do jej osi. W jakiej odległości od soczewki należy ustawić ekran, aby wiązka światła skupiona przez soczewkę oświetlała na nim koło o średnicy 2 cm?

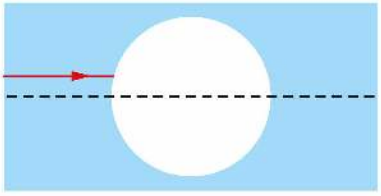
Wskazówka. Są dwa rozwiązania.

4. Punktowe źródło światła emituje promienie świetlne jednakowo we wszystkich kierunkach.

a) Jaką soczewkę należy zastosować, aby część tego światła zamienić w wiązkę równoległą? Jak w stosunku do soczewki należy umieścić źródło światła?

b) Jakie zastosowania może mieć taki układ?

***5.** Przyjmij, że kulisty pęcherzyk powietrza pod wodą jest soczewką wypukłą. Naszkicuj w zeszycie bieg przechodzącego przez nią promienia światła (patrz rys.). Uwzględnij dwukrotne załamanie promienia. Czy pęcherzyk powietrza uwięziony w wodzie jest soczewką skupiającą czy rozpraszającą?



16.10. Obraz rzeczywisty tworzony przez soczewkę wypukłą

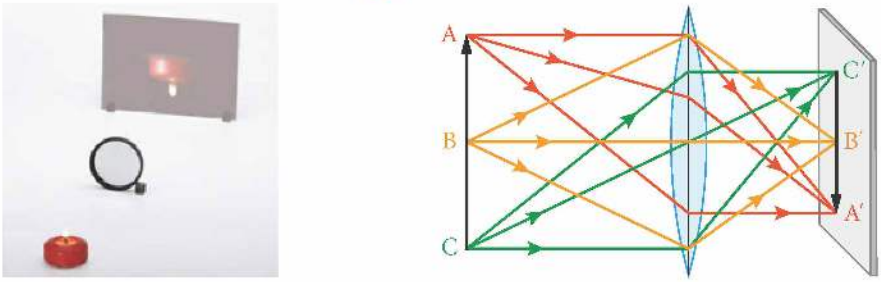
Przypomnij sobie

- Soczewka skupiająca skupia w jednym punkcie, który nazywamy ogniskiem, wszystkie promienie padające na nią równolegle do osi optycznej.
- Odległość od ogniska do soczewki skupiającej nazywamy ogniskową.
- Jeśli światło biegnie po określonej drodze z punktu A do punktu B, to światło wysłane z punktu B może biec po tej samej drodze do punktu A (zasada odwracalności biegu promieni światła).

Tworzenie obrazu rzeczywistego

W szkole podstawowej prawdopodobnie wykonywałeś już doświadczenie z tworzeniem na ekranie obrazów odległych przedmiotów przez soczewkę skupiającą (jeśli nie, możesz to nadrobić – wystarczy, że zbudujesz układ doświadczalny przedstawiony na rysunku 16.66a). Obraz taki powstaje, gdy przedmiot znajduje się dalej od soczewki niż jej ognisko.

a) b)



Rys. **16.66.** Tworzenie obrazu rzeczywistego przez soczewkę skupiającą: a) układ doświadczalny, b) schemat wyjaśniający przebieg zjawiska

Przypomnijmy mechanizm tworzenia się takiego obrazu. Wszystkie promienie światła wychodzące z tego samego punktu przedmiotu, oznaczonego na rysunku 16.66b jako A, przechodząc przez soczewkę, załamują się i trafiają w jeden punkt, oznaczony A'.
Jeśli w punkcie A' znajduje się ekran, promienie światła go oświetlą. To samo zjawisko zachodzi dla wszystkich punktów przedmiotu, dlatego na ekranie powstanie obraz całego przedmiotu.

Rozważmy promienie światła, które wychodzą z danego punktu przedmiotu, a następnie załamują się w soczewce. Jeśli wszystkie przecinają się w jednym punkcie, to powstaje w nim **obraz rzeczywisty** danego punktu. Taki obraz możemy zobaczyć na ekranie.

Obraz rzeczywisty jest widoczny także bez ekranu

Obraz rzeczywisty można zobaczyć na ekranie, ale także zaobserwować gołym okiem. Łatwo się o tym przekonać, gdy spojrzy się przez soczewkę wypukłą (np. lupę) na odległe przedmioty.

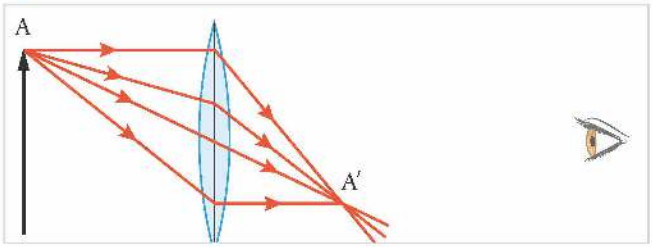


Jak to się dzieje? Przypomnijmy uproszczony schemat powstawania obrazu na ekranie (rys. a). Dla przejrzystości ograniczymy się do jednego punktu przedmiotu (w naszym przypadku – grotu strzałki).

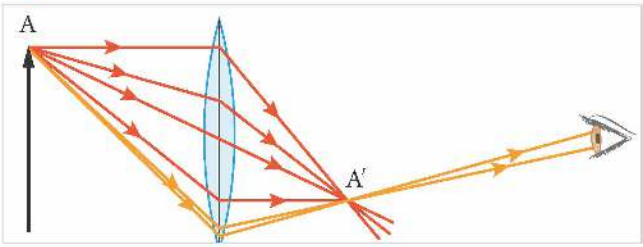
Taki rysunek nie wyjaśnia jednak, dlaczego widzimy obraz – przecież promienie, które nie wpadają do oka, nie mają wpływu na to, co widzimy. Trzeba jednak pamiętać, że rozważaliśmy tylko kilka przykładowych promieni. Dorysujmy więc (na żółto) takie, które trafią do narządu wzroku (rys. b).

Te promienie, a także wszystkie znajdujące się między nimi docierają do oka dokładnie tak samo, jakby ich źródło znajdowało się w punkcie A′ (obrazie punktu A). Dlatego wydaje nam się, że grot strzałki znajduje się właśnie w tym punkcie. W odróżnieniu od ekranu obserwator może się znajdować bliżej lub dalej, a i tak zobaczy ostry obraz tworzony przez soczewkę.

a)



b)



Zarówno wynik doświadczenia, jak i schemat powstawania obrazu rzeczywistego pokazują, że obraz jest odwrócony o 180°. Możemy więc powiedzieć, że:

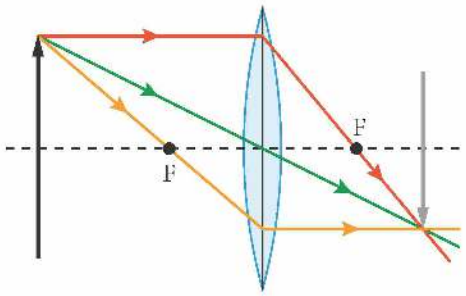
> Jeśli przedmiot znajduje się dalej niż ognisko soczewki skupiającej, to tworzy ona rzeczywisty, odwrócony obraz tego przedmiotu.

Obraz ten powstaje w ściśle określonym miejscu (gdzie konkretnie – tym zajmiemy się za chwilę). Jeśli umieścimy w nim ekran, zobaczymy ostry obraz. Jeśli ekran znajdzie się nieco bliżej lub nieco dalej od soczewki, także zobaczymy obraz przedmiotu, ale rozmyty.

Aby wyznaczyć miejsce powstania obrazu przedmiotu, należy wykonać precyzyjny rysunek przedstawiający bieg wychodzących z niego promieni świetlnych. Jest on zwany **konstrukcją obrazu**. Promieni takich jest nieskończenie wiele, więc trudno byłoby śledzić je wszystkie, ale do wyznaczenia miejsca powstania obrazu punktu przedmiotu wystarczy prześledzić bieg wychodzących z niego dwóch promieni. Najlepiej jest wybrać takie, których bieg łatwo skonstruować. Tam, gdzie się one przetną, przecinają się także wszystkie pozostałe promienie wychodzące z danego punktu przedmiotu.

Pojęcia *konstrukcja obrazu* nie należy mylić z konstrukcją znaną ci być może z lekcji geometrii.

Na rysunku 16.67 widzisz trzy promienie, z których do konstrukcji obrazu wystarczy wybrać dowolne dwa.



Rys. 16.67. Konstrukcja obrazu utworzonego przez soczewkę skupiającą, gdy przedmiot znajduje się w odległości większej niż ogniskowa soczewki

1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę przechodzi przez ogniskowy.
2. Promień przechodzący przez ognisko po przejściu przez soczewkę jest równoległy do osi optycznej.
3. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku.

Uzasadnijmy reguły konstruowania obrazu opisane obok rysunku:
Reguła 1. Wynika wprost z definicji ogniska.
Reguła 2. Opisaną w punkcie 1. regułę możemy odwrócić, skoro bieg promieni świetlnych jest odwracalny.
Reguła 3. Wynika z przyjętego przez nas modelu cienkiej soczewki. Ponieważ soczewka jest cienka, promień przejdzie przez jej środek, jeśli padnie na soczewkę bardzo blisko jej osi optycznej. W tym obszarze obie powierzchnie soczewki są już niemal prostopadłe do osi optycznej, a więc światło przechodzi przez soczewkę jak przez płaską płytkę. Promień wychodzący jest zatem równoległy do padającego, być może tylko trochę przesunięty. Jeśli jednak ponownie przypomnimy sobie, że soczewka jest bardzo cienka, to przesunięcie także możemy pominąć.

Zadania dotyczące promieni padających na płaską płytkę rozwiązałeś w temacie 16.6 (zad. 2. i 3. s. 51).

Równanie soczewki

W zależności od odległości przedmiotu od soczewki zmienia się też odległość obrazu od soczewki. Zbadajmy tę zależność – najpierw doświadczalnie, a następnie za pomocą obliczeń.

Doświadczenie 8 – obowiązkowe

Badanie związku między ogniskową soczewki a położeniem przedmiotu i obrazu

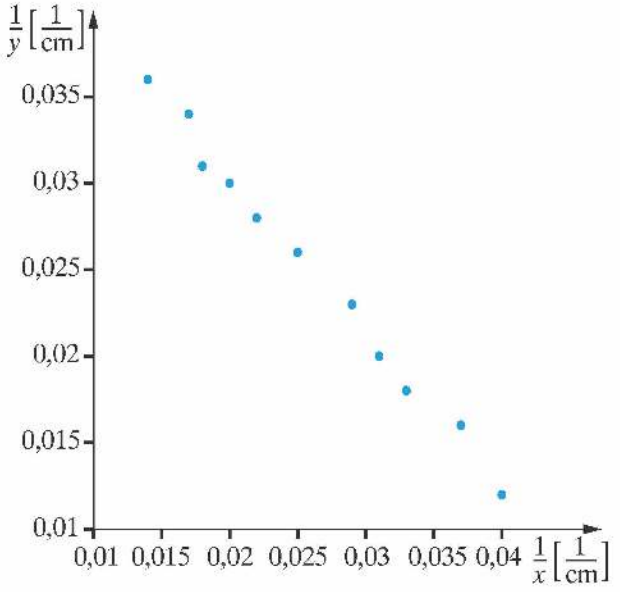


1. Przygotuj soczewkę skupiającą, świeczkę lub żarówkę z przezroczystą bańką i widocznym włóknem, ekran (np. białą tekturę) oraz miarkę budowlaną albo metr krawiecki. Doświadczenie najlepiej jest wykonać przy słabym oświetleniu.
2. Ustaw pionowo soczewkę, a w pewnej odległości od niej – świeczkę (lub żarówkę).
3. Ustaw ekran w takiej odległości od soczewki, aby powstał na nim ostry obraz świeczki. Zmierz odległość ekranu od soczewki (y) i odległość świeczki od soczewki (x). Powtórz opisane czynności dla kilku innych odległości świeczki od soczewki.
4. Za pomocą arkusza kalkulacyjnego narysuj wykresy różnych zależności zachodzących między odległościami x i y, np. $y(x)$, $y\left(\frac{1}{x}\right)$, $y(x^2)$, $\frac{1}{y}\left(\frac{1}{x}\right)$ itd. W którym przypadku wykres jest linią prostą? Ile jest równy współczynnik kierunkowy tej prostej i jaki jest jej punkt przecięcia z osią pionową?

W naszym doświadczeniu wykonaliśmy pomiary i obliczenia dla 11 położeń soczewki. Wyniki zebraliśmy w tabeli 16.6.

Tabela 16.6. Wyniki dla doświadczenia 8.

Pomiar	x [cm]	y [cm]	$\frac{1}{x}\left[\frac{1}{\text{cm}}\right]$	$\frac{1}{y}\left[\frac{1}{\text{cm}}\right]$
1	25	82	0,040	0,012
2	27	63	0,037	0,016
3	30	57	0,033	0,018
4	32	50	0,031	0,020
5	35	44	0,029	0,023
6	40	39	0,025	0,026
7	45	36	0,022	0,028
8	50	33	0,020	0,030
9	55	32	0,018	0,031
10	60	29	0,017	0,034
11	70	28	0,014	0,036



Rys. 16.68. Wykres na podstawie danych z tabeli 16.6

Spośród różnych sporządzonych na podstawie tych danych wykresów tylko w przypadku zależności $\frac{1}{y}$ od $\frac{1}{x}$ punkty układają się wzdłuż linii prostej (rys. 16.68). Jej współczynnik kierunkowy wynosi ok. –1. Tak więc równanie prostej możemy zapisać jako:

$$\frac{1}{y} = -\frac{1}{x} + \text{const}$$

Aby wyznaczyć występującą w powyższym wzorze stałą, zauważamy, że gdy $x \to \infty$, czyli kiedy przedmiot znajduje się bardzo daleko od soczewki, pochodzące od niego promienie są praktycznie równoległe. Wynika z tego, że:

$$y \to f$$

Tak więc dla $x \to \infty$ mamy zgodnie z powyższym wzorem zależność:

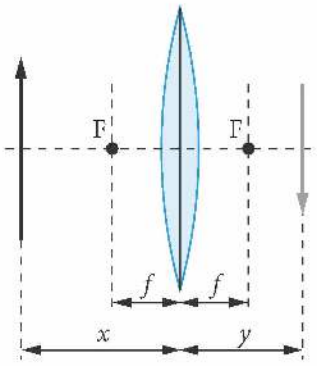
$$\frac{1}{f} = -0 + \text{const}$$

Stąd obliczamy nieznaną stałą: $\text{const} = \frac{1}{f}$.

Po przekształceniu wzoru $\frac{1}{y} = -\frac{1}{x} + \frac{1}{f}$ uzyskujemy równanie:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$$

zwane **równaniem soczewki**. Jest to więc zależność między odległością przedmiotu od soczewki (x), obrazu od soczewki (y) i ogniskowej soczewki (f, rys. 16.69).

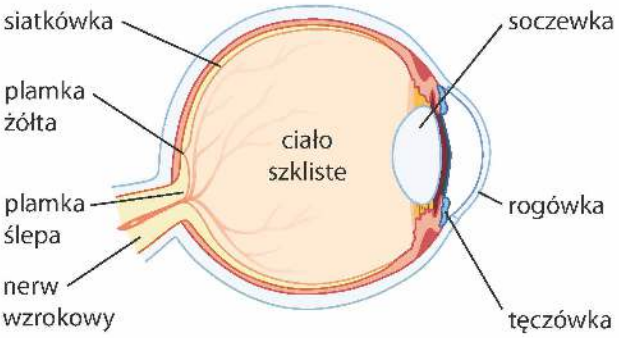


Rys. 16.69. Ogniskowa soczewki (f), odległość przedmiotu od soczewki (x), odległość obrazu od soczewki (y)

Wady wzroku i ich korygowanie

Rogówka i soczewka oka tworzą układ soczewek działający jak pojedyncza soczewka skupiająca. Dzięki niemu na siatkówce oka powstaje obraz widzianych przedmiotów. Siatkówka składa się z komórek czułych na światło, które za pośrednictwem nerwów przenoszą do mózgu informację o obrazie.

Ponieważ odległość między soczewką oka a siatkówką jest stała, mięśnie oka zmieniają kształt, a co za tym idzie – ogniskową i zdolność skupiającą soczewki. Pozwala to widzieć ostro zarówno przedmioty bliskie, jak i dalekie.



Schemat budowy oka

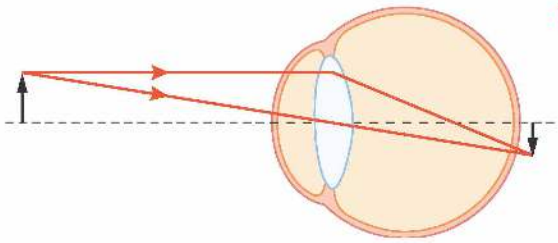
Dalekowzroczność

U osób cierpiących na dalekowzroczność soczewka oka nie jest w stanie osiągnąć zdolności skupiającej wystarczającej do wytworzenia ostrych obrazów bliskich przedmiotów.

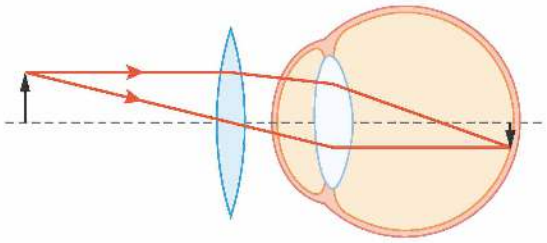
Mówimy czasem, że u osób z tą wadą wzroku obraz tworzy się za siatkówką (rys. a). Jeżeli chcielibyśmy być bardziej precyzyjni, powinniśmy powiedzieć, że tworzyłby się tam, gdyby była ona przezroczysta – w rzeczywistości ostry obraz nie powstaje w ogóle.

Aby zniwelować tę wadę wzroku, trzeba wstępnie skupić światło wpadające do oka za pomocą **soczewki skupiającej** (rys. b). Dlatego u dalekowidzów stosujemy okulary z soczewkami skupiającymi (tzw. plusy, nazywane tak od dodatniej zdolności skupiającej).

a)



b)

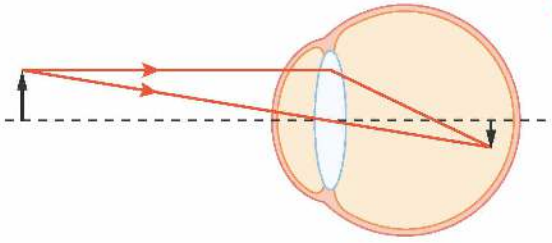


Krótkowzroczność

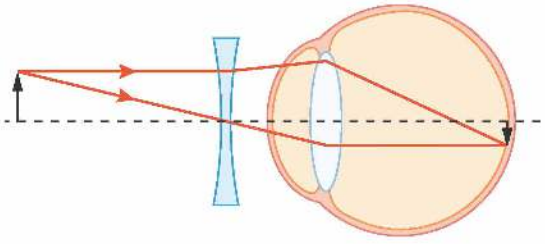
Jest też wiele osób, które dobrze widzą bliskie przedmioty, ale nie widzą dalekich. Dzieje się tak, gdyż ich soczewka zbyt mocno skupia światło.

Obraz przedmiotu u krótkowidzów tworzy się przed soczewką (rys. c), dlatego noszą oni okulary z **soczewkami rozpraszającymi** (nazywane minusami od ujemnej zdolności skupiającej). Soczewka taka rozprasza światło, które po skupieniu przez soczewkę oka daje ostry obraz na siatkówce (rys. d).

c)

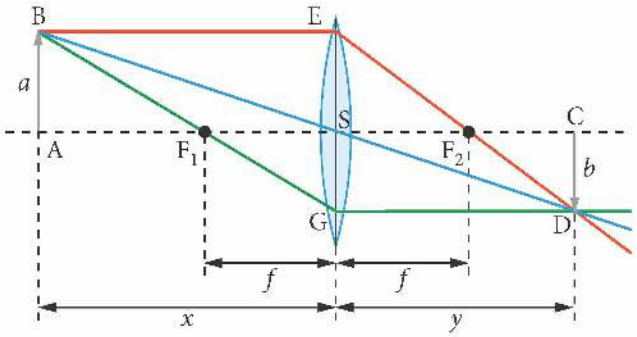


d)



Wyprowadzenie równania soczewki

Przedstawmy matematyczne uzasadnienie równania soczewki. Na rysunku 16.70 pokazano konstrukcję obrazu tworzonego przez soczewkę skupiającą.



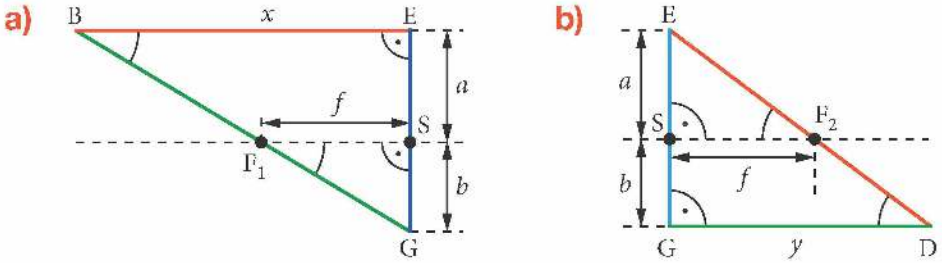
Rys. 16.70. Schemat konstrukcji obrazu w soczewce skupiającej

Trójkąty BEG i F_1SG są podobne, więc (rys. 16.71a):

$$\frac{SG}{EG}=\frac{F_1S}{BE},\ \text{czyli}\ \frac{b}{a+b}=\frac{f}{x}$$

Również trójkąty EGD i ESF_2 są podobne. Stąd (rys. 16.71b):

$$\frac{ES}{EG}=\frac{SF_2}{GD},\ \text{czyli}\ \frac{a}{a+b}=\frac{f}{y}$$



Rys. 16.71. Trójkąty BEG, F_1SG, EGD i ESF_2 z oznaczeniami

Po dodaniu tych proporcji stronami otrzymujemy:

$$\frac{b+a}{a+b}=\frac{f}{x}+\frac{f}{y}\ \rightarrow\ 1=\frac{f}{x}+\frac{f}{y}$$

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{x}+\frac{1}{y}$$

Tak więc wyprowadziliśmy sformułowane wcześniej równanie soczewki.

Pomiar ogniskowej soczewki

Z równania soczewki płynie ważny wniosek. Gdy odległość x jest bardzo duża, wówczas $\frac{1}{x}\approx 0$, a więc $y\approx f$. Oznacza to, że obraz bardzo odległych przedmiotów powstaje niemal w ognisku soczewki.
Jeśli więc chcemy poznać ogniskową soczewki, wystarczy wytworzyć obraz odległych przedmiotów (np. domów po drugiej stronie ulicy) i zmierzyć odległość obrazu od soczewki (rys. 16.72). Jest ona w przybliżeniu równa ogniskowej.



Rys. 16.72. Pomiar ogniskowej soczewki skupiającej

Po tej lekcji powinieneś

- demonstrować doświadczalnie tworzenie obrazu rzeczywistego przez soczewkę skupiającą i wyjaśniać to zjawisko;
- konstruować obraz rzeczywisty tworzony przez soczewkę;
- posługiwać się równaniem soczewki.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

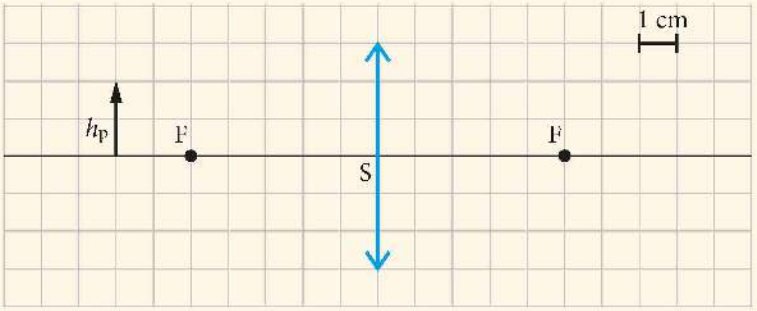
Przedmiot o wysokości $h_p = 2$ cm jest ustawiony w odległości $x = 7$ cm od soczewki o zdolności skupiającej $Z = 20$ D prostopadle do osi optycznej. Skonstruuj obraz tego przedmiotu. Zmierz wysokość obrazu oraz jego odległość od soczewki, a następnie te same wielkości wyznacz obliczeniowo. Porównaj uzyskane wyniki.

Rozwiązanie

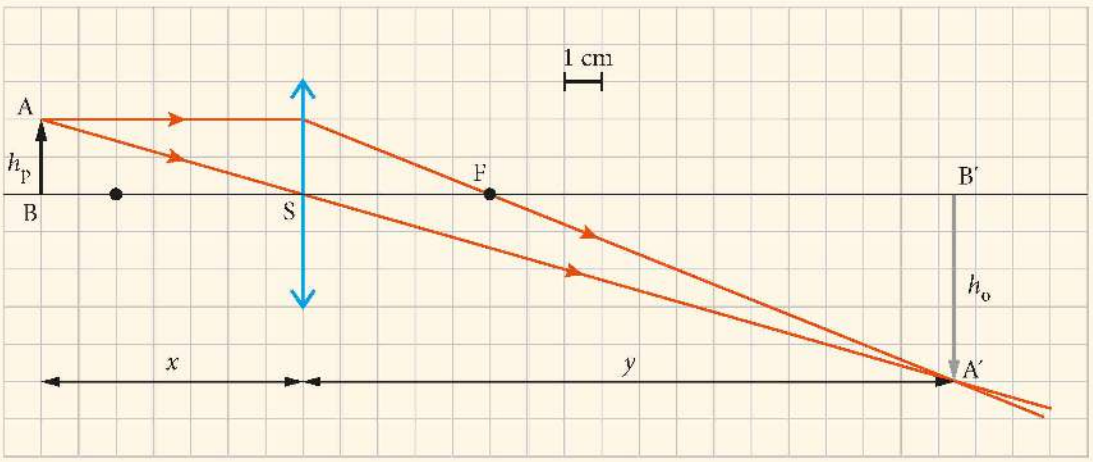
Sporządzamy schematyczny rysunek sytuacji opisanej w zadaniu. Aby nie był zbyt duży, wykonajmy go w skali 1 : 2,5. Na rysunku zaznaczamy ogniska soczewki. W tym celu obliczamy jej ogniskową:

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

$$f = \frac{1}{20\ \text{D}} = 0{,}05\ \text{m} = 5\ \text{cm}$$



Konstruujemy obraz zgodnie z zasadami przedstawionymi na rysunku 16.67 na s. 72.



Po zmierzeniu linijką i wykonaniu obliczeń uwzględniających skalę okazuje się, że uzyskujemy obraz w odległości $y_{konstr} = 17{,}4$ cm od soczewki oraz że ma on wysokość $h_{konstr} = 5$ cm.

Obliczmy teraz te same wielkości. Odległość y wyznaczamy z równania soczewki:

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{y}=\frac{1}{f} \quad \rightarrow \quad y=\frac{xf}{x-f}$$

$$y = 17{,}5 \text{ cm}$$

Wysokość obrazu dostaniemy z podobieństwa trójkątów ABS i A'B'S, czyli:

$$\frac{AB}{BS}=\frac{A'B'}{B'S}$$

Podstawiamy oznaczenia zgodnie z rysunkiem i wyznaczamy szukaną wysokość obrazu:

$$\frac{h_p}{x}=\frac{h_o}{y} \quad \rightarrow \quad h_o=h_p\frac{y}{x}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$h_o = 5 \text{ cm}$$

Odpowiedź: Obraz na rysunku powstał w odległości 17,4 cm od soczewki. Uzyskany wynik jest bardzo zbliżony do obliczonej wartości 17,5 cm. Zarówno z rysunku, jak i z obliczeń otrzymujemy wysokość obrazu 5 cm.

1. Skonstruuj w zeszycie w odpowiednio dobranej skali obraz przedmiotu o wysokości 4 cm znajdującego się w odległości x od soczewki o ogniskowej 20 cm, a następnie oblicz odległość obrazu od soczewki i jego wysokość. Porównaj wyniki obliczeń z wielkościami zmierzonymi na rysunku.

a) $x = 30$ cm

b) $x = 40$ cm

c) $x = 50$ cm

2. Obiektyw prostego cyfrowego aparatu fotograficznego składa się z jednej soczewki o ogniskowej 1 cm. Ostrość nastawiamy przez regulację odległości obiektywu od matrycy. W jakich granicach musi się zmieniać ta odległość, aby można było fotografować obiekty znajdujące się w odległości od 30 cm do nieskończoności?

3. Obiektyw najprostszego aparatu fotograficznego, np. w telefonie komórkowym, składa się z jednej soczewki o dużej zdolności skupiającej. Załóżmy, że wynosi ona 400 D.

a) W jakiej odległości od soczewki powstanie obraz przedmiotów bardzo odległych, a w jakiej – oddalonych o 10 cm?

b) Wyjaśnij, dlaczego taki aparat nie musi być wyposażony w regulację ostrości.

c) Dom o wysokości 6 m fotografujemy z odległości 30 m. Jaką wysokość będzie miał obraz tego domu na matrycy?

4. Jak zmieni się obraz przedmiotu na ekranie, gdy zasłonimy dolną połowę soczewki? Spróbuj to przewidzieć, a następnie sprawdź doświadczalnie.

***5.** Jeśli na soczewkę skupiającą o ogniskowej f pada równoległa wiązka światła, która tworzy z osią optyczną soczewki kąt α, to soczewka skupia tę wiązkę w jednym punkcie P. Punktem tym nie jest jednak ognisko soczewki. Określ położenie punktu P.

16.11. Obrazy pozorne tworzone przez soczewki

Przypomnij sobie

- Jeśli promienie padają na soczewkę rozpraszającą równolegle do jej osi optycznej, to po przejściu przez soczewkę promienie tworzą wiązkę rozbieżną. Przedłużenia tych promieni przecinają się w jednym punkcie.
- Szkło powiększające (lupa) pozwala oglądać przedmioty w powiększeniu.

Obraz pozorny tworzony przez soczewkę skupiającą

Do tej pory badaliśmy obrazy tworzone przez soczewkę skupiającą w przypadku, gdy przedmiot znajduje się za ogniskiem soczewki. A co się dzieje, gdy przedmiot znajduje przed ogniskiem? Zbadajmy to doświadczalnie.

Doświadczenie 9

1. Przygotuj soczewkę skupiającą o znanej ogniskowej.
2. Ustaw przedmiot w odległości mniejszej od ogniskowej tej soczewki.
3. Popatrz na przedmiot przez soczewkę (zdjęcie a). Co obserwujesz?
4. Spróbuj ustawić ekran w taki sposób, aby można było na nim zobaczyć obraz przedmiotu (zdjęcie b). Co obserwujesz?

a)



b)

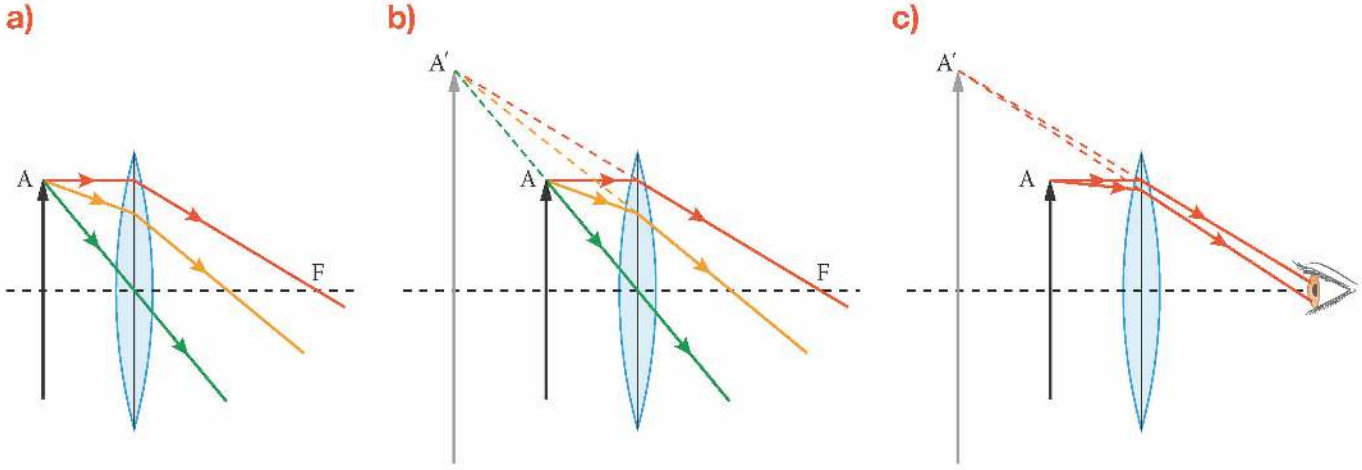


Wyjaśnimy, dlaczego obraz przedmiotu widzimy gołym okiem, ale nie możemy go zobaczyć na ekranie. W tym celu przeanalizujmy bieg promieni światła wychodzących z przedmiotu po przejściu przez soczewkę (rys. 16.73 na następnej stronie).

Promienie po przejściu przez soczewkę skupiającą nie przecinają się, ale rozbiegają w różne strony (rys. 16.73a). W jednym punkcie przecinają się natomiast ich przedłużenia (rys. 16.73b).

W tym punkcie, oznaczonym jako A′, obserwator widzi obraz przedmiotu umieszczonego między soczewką a jej ogniskiem.

Dlaczego w naszej analizie uwzględniliśmy punkt przecięcia przedłużeń promieni, skoro w rzeczywistości nic im nie odpowiada, a za przedmiotem obserwowanym przez soczewkę może się znajdować na przykład ściana?



Rys. **16.73.** Tworzenie obrazu pozornego przez soczewkę skupiającą, przedmiot znajduje się w odległości mniejszej niż ogniskowa soczewki

Przyczyna leży nie tyle w fizyce, co w sposobie działania ludzkiego narządu wzroku. Nasz mózg jest przystosowany do analizy obrazu w sytuacji, gdy promienie świetlne rozchodzą się po liniach prostych (tak zresztą na ogół się dzieje).
Jeśli więc do oka wpada wiązka promieni, które biegną tak, jakby wychodziły z punktu A′ (rys. 16.73c), to wydaje się nam, że naprawdę stamtąd wychodzą. W efekcie widzimy obraz punktu A w punkcie A′.
W ten sam sposób tworzy się obraz pozostałych punktów przedmiotu. Wszystkie te obrazy punktów tworzą łącznie obraz całego przedmiotu. Nazywamy go **obrazem pozornym**, ponieważ znajduje się tam, gdzie w rzeczywistości istnieje coś innego (ściana, powietrze itp.).

Rozważmy promienie światła, które wychodzą z danego punktu przedmiotu, a następnie załamują się w soczewce. Jeśli wszystkie ich przedłużenia przecinają się w jednym punkcie, powstaje tam **obraz pozorny** danego punktu. Taki obraz możemy zobaczyć tylko gołym okiem, ale nie na ekranie.

Jak widzimy na zdjęciu a) z doświadczenia 9. obraz pozorny tworzony przez soczewkę skupiającą jest **prosty** (tzn. nie jest odwrócony do góry nogami) i powiększony. Zależność tę wykorzystuje się do oglądania małych przedmiotów w powiększeniu.

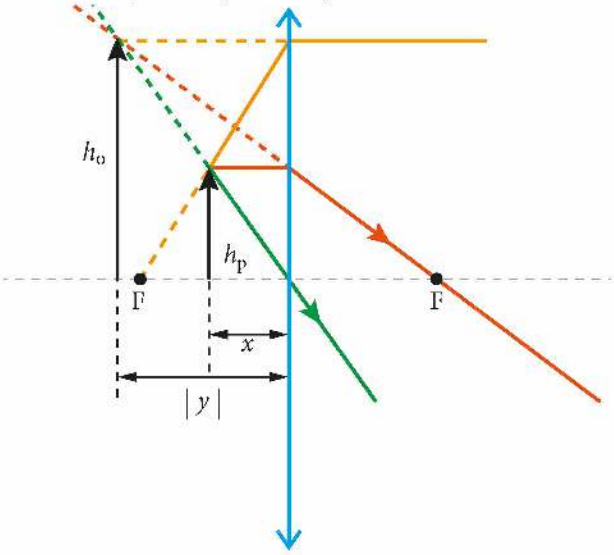
Jeżeli przedmiot znajduje się przed ogniskiem soczewki skupiającej, to za nią tworzy się pozorny, prosty, powiększony obraz tego przedmiotu.

Tworzenie prostego, powiększonego obrazu przez soczewkę skupiającą stanowi zasadę działania lupy (patrz zdjęcie a) do doświadczenia 9. s. 78).

Konstruowanie obrazu pozornego tworzonego przez soczewkę skupiającą

Konstrukcja obrazu pozornego jest podobna do konstrukcji obrazu rzeczywistego. Aby znaleźć obraz punktu, musimy prześledzić bieg dwóch promieni i znaleźć punkt przecięcia ich przedłużeń (rys. 16.74). Podobnie jak poprzednio wybieramy takie promienie, których narysowanie jest najłatwiejsze.

Z podobieństwa trójkątów:
$\frac{h_o}{h_p} = \frac{|y|}{x}$
h_o – wysokość obrazu,
h_p – wysokość przedmiotu.



1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę przechodzi przez ognisko.
2. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku.
3. Promień, którego przedłużenie wychodzi z ogniska, po przejściu przez soczewkę biegnie równolegle do osi optycznej.

Rys. **16.74.** Konstrukcja obrazu utworzonego przez soczewkę skupiającą, gdy przedmiot znajduje się bliżej soczewki, niż wynosi jej ogniskowa

Soczewka rozpraszająca

Zbadajmy doświadczalnie, jakie obrazy może tworzyć soczewka rozpraszająca. Wykonajmy w tym celu prosty eksperyment.

Doświadczenie 10

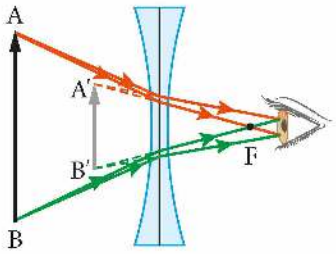
1. Przygotuj soczewkę rozpraszającą (wystarczą okulary krótkowidza), świeczkę i ekran (np. białą kartkę).
2. Zbadaj, czy za pomocą soczewki rozpraszającej można wytworzyć rzeczywisty obraz przedmiotu.
3. Popatrz przez soczewkę na dowolne przedmioty z różnej odległości. Co widzisz?





W doświadczeniu zauważyliśmy, że:

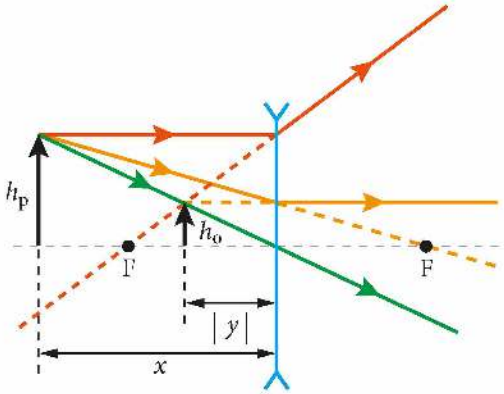
Soczewka rozpraszająca niezależnie od tego, gdzie względem niej znajduje się przedmiot, tworzy obraz **pozorny, prosty, pomniejszony.**



Rys. **16.75.** Schemat ilustrujący, w jaki sposób widzimy obraz tworzony przez soczewkę rozpraszającą

Powstaje on podobnie jak w przypadku soczewki skupiającej i bliskiego przedmiotu, z tą różnicą, że soczewka rozpraszająca tworzy obraz pomniejszony, a nie powiększony (rys. 16.75).

Aby skonstruować obraz, musimy sobie przypomnieć, że gdy na soczewkę rozpraszającą pada promień równoległy do osi optycznej, załamuje się on w kierunku od osi, a jego przedłużenie przechodzi przez ognisko pozorne (rys. 16.76). Natomiast promień przechodzący przez środek soczewki – podobnie jak w soczewce skupiającej – nie ulega załamaniu.



1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę biegnie tak, że jego przedłużenie przechodzi przez ognisko pozorne.
2. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku (a więc pokrywa się ze swoim przedłużeniem).
3. Promień biegnący w stronę ogniska znajdującego się po przeciwnej stronie soczewki po przejściu przez soczewkę jest równoległy do osi optycznej.

Rys. **16.76.** Konstrukcja obrazu tworzonego przez soczewkę rozpraszającą

Równanie soczewki przy obrazach pozornych

Równanie soczewki uzasadniliśmy dla obrazów rzeczywistych. Dla obrazów pozornych ma ono tę samą postać:

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{y}=\frac{1}{f}$$

Należy tylko przyjąć, że $y < 0$, aby zaznaczyć, że obraz znajduje się po przeciwnej stronie soczewki niż w przypadku obrazu rzeczywistego (czyli po tej samej stronie soczewki co przedmiot). Natomiast wartość bezwzględna $|y|$ jest równa odległości obrazu od soczewki.

Przypomnijmy, że dla soczewki rozpraszającej $f < 0$.

Po tej lekcji powinieneś

- określać cechy obrazu tworzonego przez soczewkę skupiającą w zależności od odległości przedmiotu od soczewki;
- konstruować obraz pozorny tworzony przez soczewkę skupiającą i przez soczewkę rozpraszającą.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

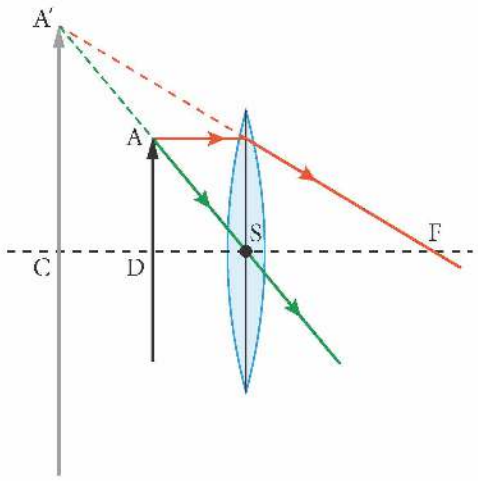
1. Skonstruuj w zeszycie w odpowiednio dobranej skali obraz przedmiotu o wysokości 4 cm znajdującego się w podanej odległości x od soczewki o ogniskowej 20 cm, a następnie oblicz odległość obrazu od soczewki i jego wysokość. Porównaj wyniki obliczeń z wielkościami zmierzonymi na rysunku.

a) $x = 5$ cm

b) $x = 10$ cm

c) $x = 15$ cm

Wskazówka. Aby obliczyć wysokość obrazu, skorzystaj z podobieństwa trójkątów A′CS i ADS (patrz rys. poniżej).



2. Narysuj w zeszycie w odpowiednio dobranej skali obraz przedmiotu o wysokości 4 cm znajdującego się w podanej odległości x od soczewki o ogniskowej −20 cm, a następnie oblicz położenie i wysokość obrazu. Porównaj wyniki obliczeń z wielkościami zmierzonymi na rysunku.

a) $x = 10$ cm

b) $x = 20$ cm

c) $x = 30$ cm

3. Jaki obraz powstaje, gdy przedmiot znajduje się dokładnie w ognisku soczewki skupiającej? Wykonaj w zeszycie odpowiednią konstrukcję, aby uzasadnić odpowiedź.

***4.** Udowodnij równanie soczewki dla soczewki skupiającej tworzącej obraz pozorny i dla soczewki rozpraszającej.

5. Przeczytaj opis doświadczenia i spróbuj przewidzieć jego wynik. Uzasadnij swoje przypuszczenia. Następnie wykonaj opisany eksperyment i sprawdź, czy twoja hipoteza się sprawdziła. Wyjaśnij, z czego wynikają ewentualne różnice.

a) Przygotuj soczewkę skupiającą (np. szkło powiększające) i duże zwierciadło płaskie (np. lustro na ścianie).

b) Trzymaj soczewkę w wyciągniętej ręce i zbliż ją do zwierciadła tak, aby widzieć przez nią odbicie odległego przedmiotu (np. obrazka na przeciwległej ścianie).

c) Zaobserwuj, czy obraz w zwierciadle widziany przez soczewkę jest prosty czy odwrócony.

Temat dodatkowy

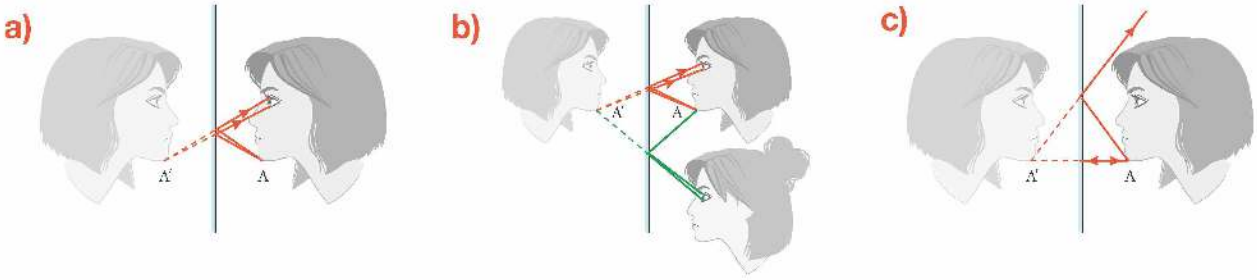
16.12. Obrazy tworzone przez zwierciadła

Przypomnij sobie

- Przy odbiciu światła kąt odbicia jest równy kątowi padania.
- Zwierciadło płaskie tworzy pozorny obraz przedmiotów.

Zwierciadło płaskie

Zwierciadło płaskie, czyli zwykłe lustro, także tworzy obraz. Widzimy go za każdym razem, spoglądając w lustro. Obraz powstaje tam, gdzie go widzimy, czyli za lustrem (rys. 16.77a). Rzecz jasna, jest to obraz pozorny. Gdybyśmy za lustrem umieścili ekran, nic byśmy na nim nie zobaczyli.



Rys. 16.77. Obraz pozorny w zwierciadle: a) mechanizm powstawania, b) niezależność położenia obrazu od położenia obserwatora, c) najprostsza konstrukcja

Zwierciadło płaskie tworzy obraz pozorny, prosty, naturalnej wielkości.

Zwróćmy uwagę, że położenie obrazu nie zależy od tego, skąd na niego patrzymy (rys. 16.77b). Aby skonstruować obraz tworzony przez zwierciadło płaskie, najprościej jest wykorzystać dwa promienie: padający na zwierciadło pod kątem prostym oraz dowolny inny. Gdy rysujemy promień odbity, pamiętamy, że kąt odbicia jest równy kątowi padania. W punkcie przecięcia przedłużeń promieni odbitych od zwierciadła znajdujemy obraz pozorny A′ punktu A (rys. 16.77c).

Badanie zwierciadła wklęsłego

Przejdźmy do badania innych zwierciadeł. Ograniczymy się przy tym do **zwierciadeł sferycznych**, czyli takich zwierciadeł, które stanowią część powierzchni sfery.

Rozważania zaczniemy od **wklęsłego zwierciadła sferycznego**, które ma kształt fragmentu **wewnętrznej** powierzchni sfery. Zwierciadłem wklęsłym jest na przykład lusterko powiększające do makijażu. Jednak zwierciadło wklęsłe nie zawsze tworzy obraz powiększony. Sprawdźmy to doświadczalnie.

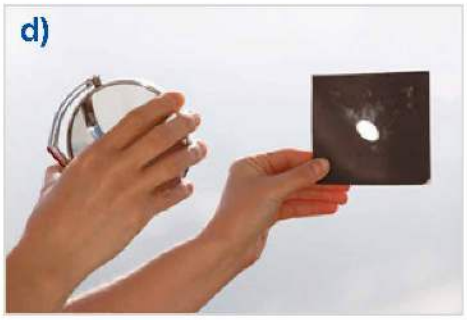




Doświadczenie 11

1. Przygotuj zwierciadło wklęsłe (np. lusterko do makijażu, lusterko dentystyczne), półprzezroczystą kolorową folię, latarkę, taśmę klejącą i miskę z wodą oraz dwie czarne kartki.
2. Przejrzyj się w lusterku lub ustaw je blisko jakiegoś przedmiotu (zdjęcie a), a następnie stopniowo odsuwaj lusterko (zdjęcie b). Jak zmienia się obraz w lustrze?
3. Na szybkę latarki naklej strzałkę wyciętą z przezroczystej folii.
4. Ustaw lusterko naprzeciwko latarki, a następnie nieco z boku lusterka, aby nie zasłonić przedmiotu, umieść ekran (zdjęcie c). Znajdź taką odległość, aby na ekranie powstał obraz przedmiotu.
5. Sprawdź, czy obraz na ekranie można otrzymać także wówczas, gdy przedmiot jest umieszczony blisko lusterka.
6. Ustaw lusterko naprzeciwko słońca, a czarny papier naprzeciwko lusterka tak, aby promienie słoneczne skupiały się na kartce (zdjęcie d). Być może uda ci się zapalić papier – wówczas skorzystaj z miski z wodą.

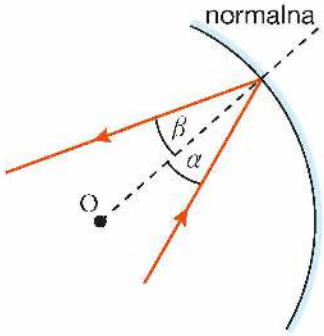




Nasze doświadczenie pokazuje, że zwierciadło wklęsłe wykazuje się właściwościami bardzo podobnymi do właściwości soczewki skupiającej. Jeden i drugi przyrząd:

- pozwala skupić światło,
- tworzy obraz rzeczywisty, odwrócony dalekich przedmiotów oraz tworzy obraz pozorny, prosty, powiększony bliskich przedmiotów.

Omówmy poszczególne właściwości zwierciadła wklęsłego.



O – środek sfery
α – kąt padania
β – kąt odbicia

Rys. 16.78. Odbicie promienia światła od zwierciadła wklęsłego

Skupianie światła przez zwierciadło wklęsłe

Gdy promień światła odbija się od zakrzywionej powierzchni, spełnione jest prawo odbicia. Trzeba przy tym pamiętać, że kąt padania i odbicia mierzymy względem normalnej, która w tym przypadku jest linią prostopadłą do powierzchni stycznej (rys. 16.78).

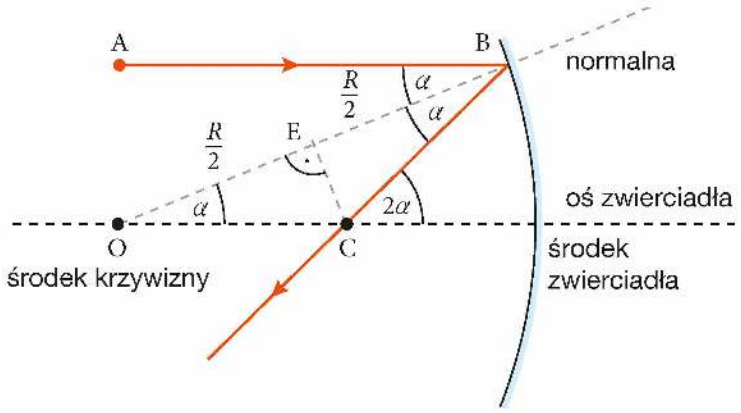
W przypadku zwierciadła sferycznego normalna biegnie wzdłuż promienia sfery poprowadzonego do punktu odbicia.

Do opisu zwierciadła służą następujące pojęcia:

- **środek krzywizny zwierciadła** – środek sfery, której częścią jest zwierciadło,

- **promień krzywizny zwierciadła** – promień tej sfery,
- **oś optyczna zwierciadła** (nazywana też osią zwierciadła) – prosta łącząca środek krzywizny zwierciadła z jego środkiem (rys. 16.79).

Przeanalizujmy, jak odbija się promień biegnący równolegle do osi zwierciadła. Na rysunku 16.79 widzisz taki promień biegnący z punktu A, odbijający się od zwierciadła w punkcie B i przecinający oś zwierciadła w punkcie C.



Rys. **16.79.** Schemat odbicia promienia równoległego do osi optycznej w zwierciadle wklęsłym

Kąt padania ABO i kąt odbicia OBC są równe. Kąty BOC i ABO są naprzemianległe, więc także są sobie równe. Wobec tego kąty BOC i CBO są równe. Trójkąt BOC jest równoramienny, co oznacza, że jego wysokość CE dzieli podstawę BO (równą promieniowi krzywizny R) na połowy. Gdy kąt α jest mały, $OC \approx OE = \frac{R}{2}$. Z przedstawionego rozumowania można wyciągnąć następujący wniosek:

Dokładność przybliżenia $OC = OE$
dla $\alpha = 1°$ – błąd 0,015%
dla $\alpha = 5°$ – błąd 0,04%
dla $\alpha = 10°$ – błąd 1,5%
dla $\alpha = 20°$ – błąd 6%
dla $\alpha = 30°$ – błąd 15%

> Promienie biegnące blisko osi optycznej zwierciadła wklęsłego równolegle do tej osi są skupiane w przybliżeniu w jednym punkcie, leżącym w połowie drogi między środkiem krzywizny a zwierciadłem.

Podobnie jak w przypadku soczewki, punkt ten nazywamy **ogniskiem** i oznaczamy F.

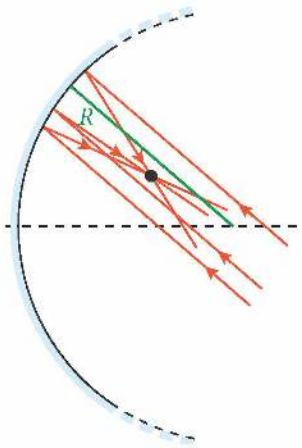
Zwierciadło sferyczne czy paraboliczne?

Czy można stworzyć zwierciadło, które skupia wszystkie promienie równoległe do jego osi w jednym punkcie, nawet jeśli leżą one dość daleko od tej osi? Okazuje się, że tak. Kształt takiego zwierciadła nie jest zbyt skomplikowany: odpowiada paraboli obróconej wokół własnej osi. Dlatego też zwierciadło o takim kształcie nazywamy parabolicznym.

Kształt opisany powyżej mają anteny satelitarne (rys. 16.80), które także pełnią funkcję zwierciadeł, tyle że skupiających mikrofale, używane



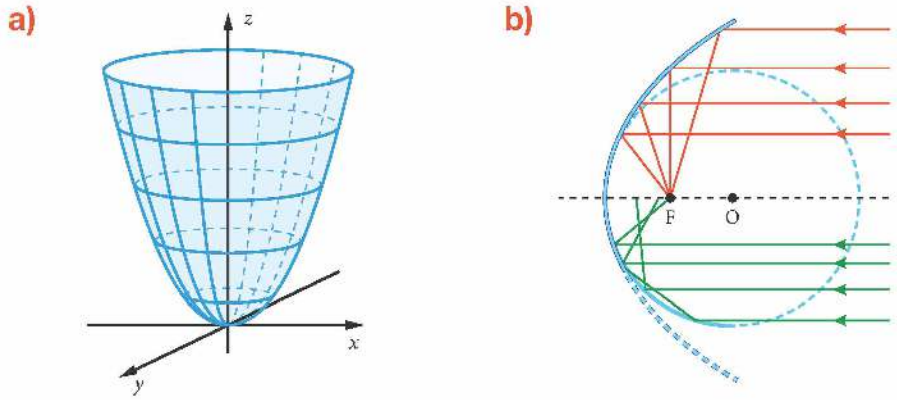
Rys. **16.80.** Zastosowanie zwierciadła parabolicznego



Rys. 16.81. Zwierciadło sferyczne skupia wąską wiązkę biegnącą wzdłuż promienia niezależnie od kierunku jej padania

do transmisji danych. W ognisku zwierciadła (anteny) jest umieszczany odbiornik mikrofal.

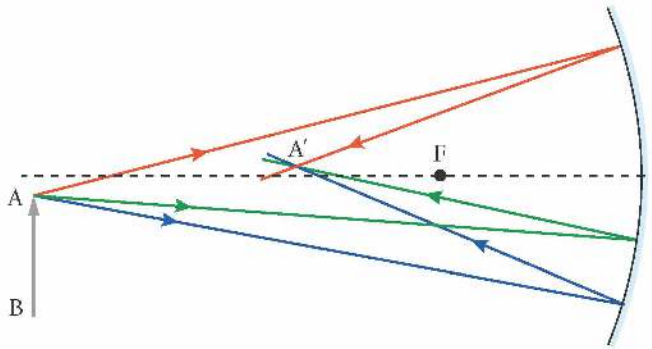
Wadą zwierciadła parabolicznego jest to, że promienie muszą na nie padać wzdłuż jednej określonej osi. Tymczasem zwierciadło sferyczne skupia cienką równoległą wiązkę padającą wzdłuż dowolnego promienia sfery, której częścią jest zwierciadło (rys. 16.81), tyle że w zależności od kierunku wiązki zmienia się punkt, w którym zostaje skupiona.



Rys. 16.82. Zwierciadło paraboliczne: a) powstawanie paraboloidy, b) porównanie biegu promieni w zwierciadle sferycznym (kolor zielony) i parabolicznym (kolor czerwony)

Obraz rzeczywisty tworzony przez zwierciadło wklęsłe

Wyjaśnijmy, jak powstaje obraz w zwierciadle wklęsłym. Na początek zajmijmy się przypadkiem, gdy przedmiot znajduje się dalej od zwierciadła niż jego ognisko. Wówczas wszystkie promienie wychodzące z danego punktu przedmiotu A po odbiciu od zwierciadła trafiają do jednego punktu A′, w którym tworzy się obraz punktu A (rys. 16.83).



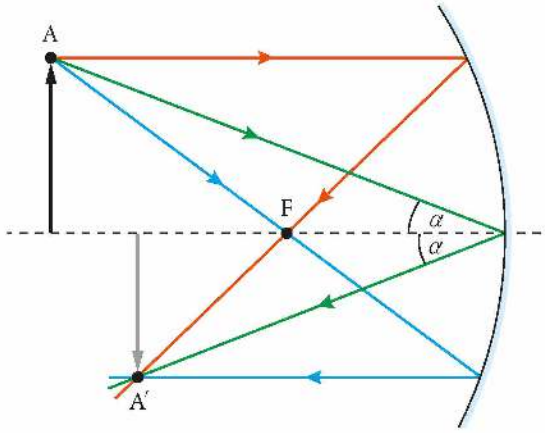
Rys. 16.83. Mechanizm tworzenia obrazu rzeczywistego przez zwierciadło wklęsłe

Gdy znajdziemy obraz dla wielu punktów przedmiotu, otrzymamy obraz całego przedmiotu. Będzie on odwrócony.

> Jeżeli przedmiot znajduje się dalej niż ognisko zwierciadła wklęsłego, to tworzy ono jego rzeczywisty, odwrócony obraz.

Aby skonstruować obraz punktu, wystarczy prześledzić bieg dwóch promieni (rys. 16.84), podobnie jak w przypadku soczewki.
Zwróćmy uwagę: konstrukcja ta opiera się na założeniu, że promienie padają na ognisko blisko osi optycznej.

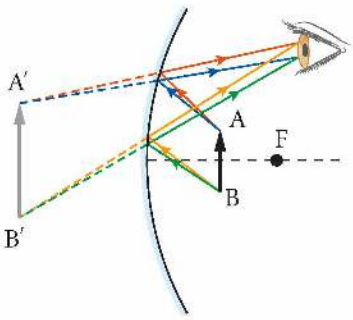
1. Promień padający równolegle do osi optycznej po odbiciu przechodzi przez ognisko.
2. Promień przechodzący przez ognisko po odbiciu jest równoległy do osi optycznej.
3. Promień padający na środek zwierciadła po odbiciu biegnie symetrycznie względem osi optycznej.



Rys. 16.84. Konstruowanie obrazu tworzonego przez zwierciadło wklęsłe, gdy przedmiot znajduje się dalej od zwierciadła niż ognisko

Obraz pozorny tworzony przez zwierciadło wklęsłe

Gdy przedmiot znajduje się bliżej zwierciadła niż jego ognisko, promienie wychodzące z jednego punktu tego przedmiotu po odbiciu od zwierciadła nie spotykają się w jednym punkcie.
Za to w jednym punkcie spotykają się ich przedłużenia. Dlatego, gdy patrzymy w zwierciadło, widzimy **obraz pozorny** (rys. 16.85). Jest on prosty i powiększony, co pozwala korzystać ze zwierciadeł wklęsłych wszędzie tam, gdzie chcemy obejrzeć w nich powiększenia rzeczywistych przedmiotów. Temu służą na przykład lusterka dentystyczne (rys. 16.86 na następnej stronie) czy wspomniane już lusterka do makijażu.



Rys. 16.85. Tworzenie obrazu pozornego przez zwierciadło wklęsłe

Jeżeli przedmiot znajduje się bliżej zwierciadła wklęsłego niż jego ognisko, to zwierciadło to tworzy **pozorny, prosty, powiększony** obraz tego przedmiotu.

A to ciekawe

Zwierciadło wklęsłe można zbudować nawet przypadkiem. Tak się stało, gdy wznoszono londyński biurowiec Walkie Talkie (patrz zdjęcie). Jego wklęsła oszklona ściana skupiała promienie słoneczne na pobliskiej ulicy. Deweloper zapłacił już odszkodowania właścicielom sklepów, w których spalił się towar, a także posiadaczowi zniszczonego przez biurowiec samochodu (pechowo – wyjątkowo drogiego). Mieszkańcy za to wykorzystywali uzyskiwaną przy tej okazji darmową energię do smażenia jajek. Aby zniwelować straty spowodowane realizacją nieoczekiwanej w skutkach wizji architektonicznej, budynek osłonięto ekranami.



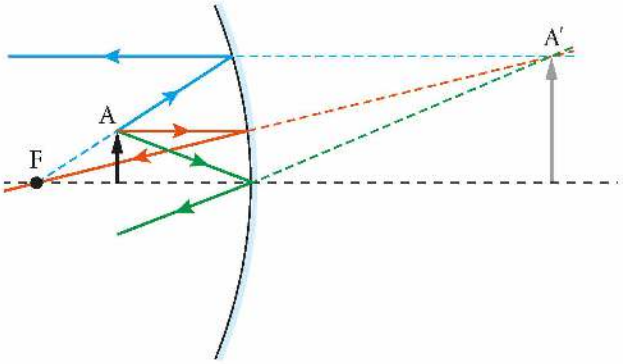


Rys. 16.86. Zwierciadło wklęsłe pozwala dentyście dokładniej obejrzeć zęby pacjenta

Zwróćmy uwagę, że zarówno wszystkie cechy tego obrazu, jak i warunki, w jakich powstaje (przedmiot przed ogniskiem), są takie same jak w przypadku lupy.

Konstrukcja obrazu także w tym przypadku polega na prześledzeniu dwóch wybranych promieni. Rysunek 16.87 przedstawia trzy promienie do wyboru.

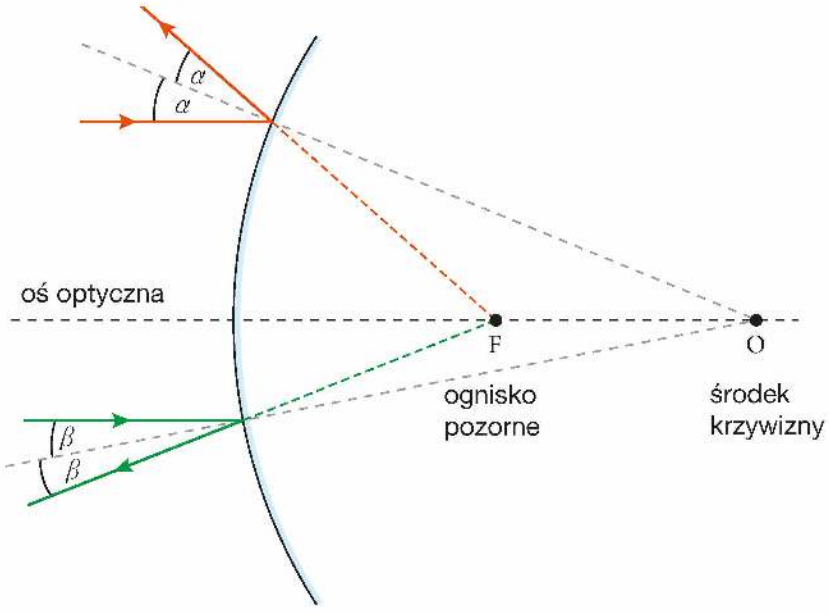
1. Promień padający równolegle do osi optycznej po odbiciu przechodzi przez ognisko.
2. Promień, którego przedłużenie wychodzi z ogniska, po odbiciu jest równoległy do osi optycznej.
3. Promień padający na środek zwierciadła po odbiciu biegnie symetrycznie względem osi optycznej.



Rys. 16.87. Konstruowanie obrazu tworzonego przez zwierciadło wklęsłe, gdy przedmiot znajduje się bliżej zwierciadła niż ognisko

Zwierciadło wypukłe

To zwierciadło także ma kształt sfery, ale widzianej od zewnątrz. Wiązka promieni równoległych do osi optycznej jest rozpraszana. Jeśli promienie padają na zwierciadło blisko jego osi, to po odbiciu biegną tak, jakby wychodziły z jednego punktu – ogniska pozornego (rys. 16.88), znajdującego się w połowie drogi od środka zwierciadła do środka krzywizny.



Rys. 16.88. Zwierciadło wypukłe rozprasza wiązkę światła (zaznaczono dwa skrajne promienie)

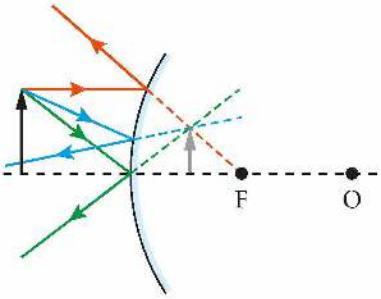
Zbadajmy, jakie obrazy tworzy zwierciadło wypukłe. W tym celu wykonajmy proste doświadczenie.

Doświadczenie 12

1. Przygotuj zwierciadło wypukłe. Jeśli nie masz takiego zwierciadła, możesz wykorzystać zewnętrzną powierzchnię dużej błyszczącej łyżki.
2. Przejrzyj się w zwierciadle z różnej odległości.
3. Spróbuj uzyskać za pomocą zwierciadła obraz dowolnego przedmiotu na ekranie (np. białej kartce).



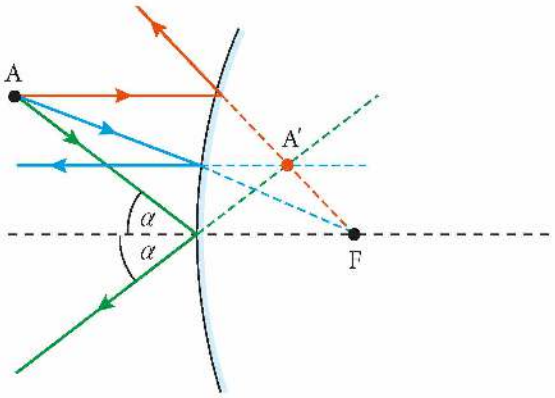
Ponieważ zwierciadło wypukłe rozprasza światło, tworzy obrazy podobnie jak soczewka rozpraszająca i podobnie jak w przypadku takiej soczewki uzyskanie obrazu na ekranie jest niemożliwe (rys. 16.89).



Rys. 16.89. Powstawanie obrazu w zwierciadle wypukłym

Zwierciadło wypukłe tworzy **pozorny, prosty, pomniejszony** obraz przedmiotu.

Zasady konstrukcji obrazu tworzonego przez zwierciadło wklęsłe przedstawiono na rysunku 16.90.



1. Promień padający równolegle do osi optycznej odbija się tak, że jego przedłużenie przechodzi przez ognisko.
2. Promień, którego przedłużenie przechodzi przez ognisko, po odbiciu biegnie równolegle do osi optycznej.
3. Promień padający na środek zwierciadła po odbiciu biegnie symetrycznie względem osi optycznej.

Rys. 16.90. Aby znaleźć obraz punktu w zwierciadle wypukłym, wystarczy prześledzić dwa charakterystyczne promienie

Jakie zastosowania może mieć zwierciadło, które pomniejsza obraz? Pamiętajmy, że pomniejszony obraz oznacza większe pole widzenia, a taka cecha nabiera istotnego znaczenia w wielu różnych sytuacjach. Najbardziej znane zastosowania zwierciadeł wklęsłych wiążą się ze zwiększaniem bezpieczeństwa. Takimi zwierciadłami są lusterka boczne w samochodzie, a także lustra umieszczane w sklepach w celu ochrony towaru.





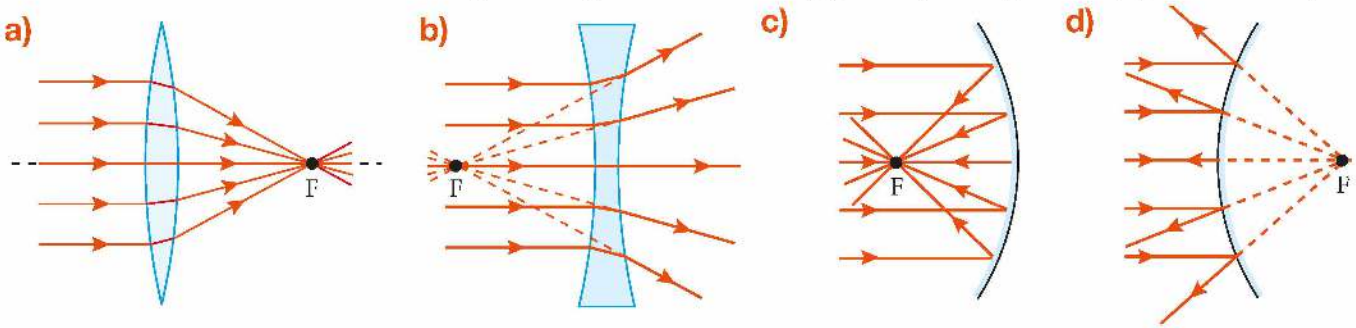
Rys. 16.91. Zwierciadło wypukłe pozwala widzieć większy obszar

Soczewki a zwierciadła

W tej lekcji niejednokrotnie zwracaliśmy uwagę na podobieństwa między zwierciadłem wklęsłym (skupiającym światło) a soczewką skupiającą oraz między zwierciadłem wypukłym (rozpraszającym światło) a soczewką rozpraszającą.

Pamiętajmy jednak, że soczewki i zwierciadła działają na zupełnie innych zasadach. Soczewka działa dzięki załamaniu światła, a zwierciadło – dzięki jego odbiciu.

Zwróć też uwagę na jeszcze inną istotną różnicę. **Wypukła** szklana **soczewka** w powietrzu **skupia światło**, a **wklęsła** je **rozprasza** (rys. 16.92a–b). Natomiast ze zwierciadłami jest odwrotnie: **zwierciadło wklęsłe skupia** światło, a **wypukłe** je **rozprasza** (rys. 16.92c–d).



Rys. 16.92. Schematy biegu promieni przechodzących przez różne soczewki i padających na różne zwierciadła

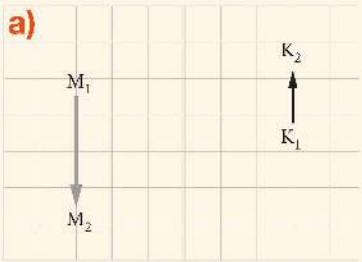
Po tej lekcji powinieneś

- opisywać, badać doświadczalnie i konstruować obrazy tworzone przez zwierciadła płaskie, wklęsłe i wypukłe,
- wymieniać zastosowania zwierciadeł różnego typu,
- opisywać podobieństwa i różnice między soczewkami i zwierciadłami.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Na rysunku zaznaczono przedmiot K_1K_2 oraz położenie jego obrazu M_1M_2 otrzymanego za pomocą zwierciadła sferycznego wklęsłego. Wyznacz graficznie środek krzywizny zwierciadła, środek zwierciadła oraz jego ognisko. Przyjmij, że oś optyczna zwierciadła jest prostopadła do przedmiotu.



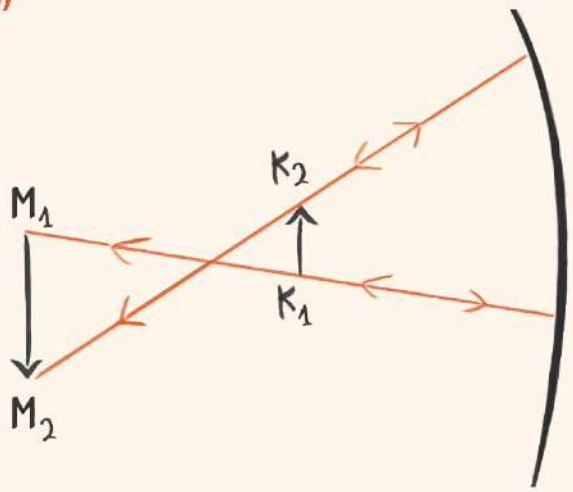
Rozwiązanie

Jak widzimy na rysunku a), obraz przedmiotu jest odwrócony. Wynika stąd, że jest to obraz rzeczywisty.

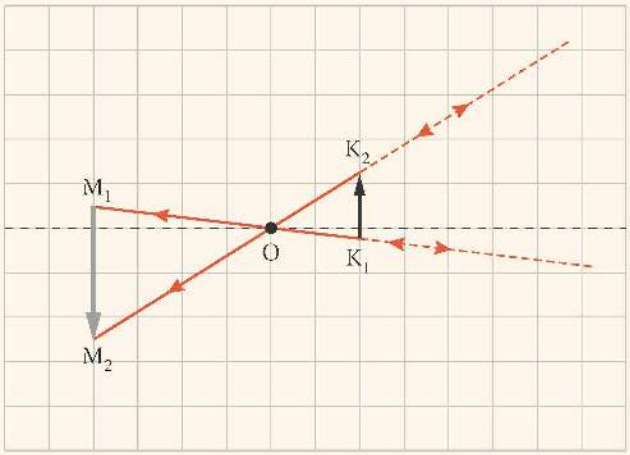
W tym zadaniu najtrudniejsze jest wyobrażenie sobie odbicia promieni od zwierciadła, które nie zostało narysowane. Dlatego dla ułatwienia najpierw sporządzimy schematyczny rysunek, na którym znajdzie się zwierciadło.

Kolorem czerwonym zaznaczyliśmy promienie, które biegną wzdłuż promienia krzywizny i padają na zwierciadło. Każdy z nich odbija się w ten sposób, że wraca po tej samej drodze (rys. b).

b)



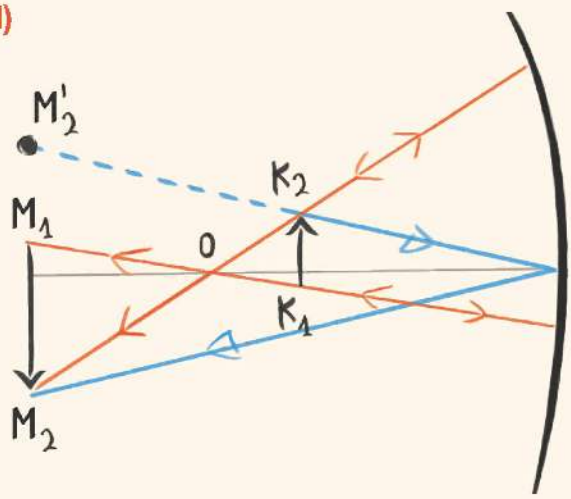
c)



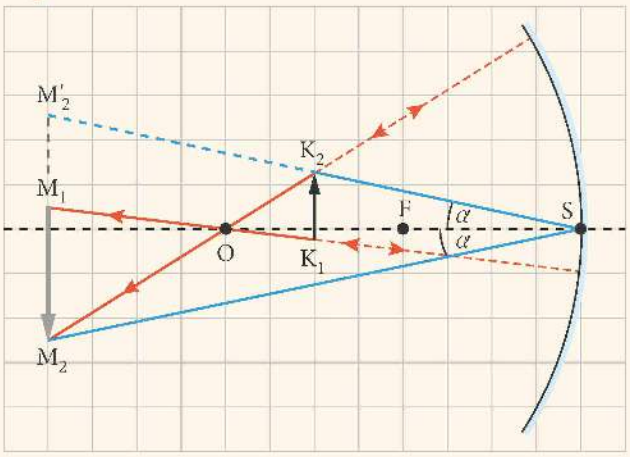
Zauważmy, że te promienie można teraz skonstruować na docelowym rysunku, bez znajomości położenia zwierciadła. Wystarczy połączyć punkt K_1 z punktem M_1, a punkt K_2 z punktem M_2 (rys. c).

Nie znamy jeszcze punktu odbicia, dlatego na rysunku umieściliśmy linie przerywane. Punktem przecięcia narysowanych promieni jest środek krzywizny O. Przez tak wyznaczony punkt rysujemy oś optyczną prostopadle do przedmiotu.

d)



e)



Dodajmy do naszego schematycznego rysunku promień biegnący z punktu K_2 i odbijający się od zwierciadła na osi optycznej. Jak wszystkie promienie wychodzące z K_2, po odbiciu biegnie on do punktu M_2 (rys. d). Jak widzimy na rysunku, jego przedłużenie przechodzi przez punkt M_2', symetryczny do punkt M_2 względem osi optycznej.

Wiemy więc już, jak znaleźć środek zwierciadła S: najpierw znajdujemy punkt M_2', a następnie prowadzimy prostą $M_2'K_2$. Punkt przecięcia tej prostej z osią optyczną zwierciadła to szukany środek S zwierciadła. W połowie odcinka OS znajdujemy jego ognisko F (rys. e).

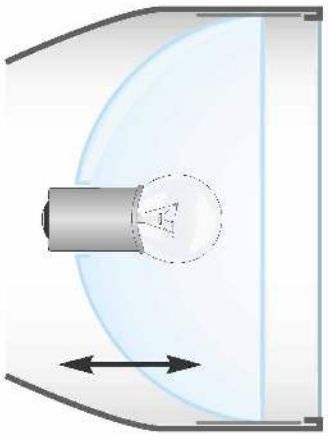
Zadania s. 92

Pytania i zadania

1. Na podstawie prawa odbicia określ minimalny rozmiar (w kierunku pionowym) lustra zawieszonego na pionowej ścianie, w którym w całości może się przejrzeć osoba o wzroście 1,80 m.

2. Niektóre latarki kieszonkowe mają funkcję regulowania stopnia skupienia wiązki światła. Wystarczy przekręcić zwierciadło latarki, aby przesunąć je w przód lub w tył. Pozycja diody lub żarówki w stosunku do korpusu latarki pozostaje bez zmian.

Dlaczego przesuwanie zwierciadła latarki umożliwia regulację stopnia skupienia wiązki? W którą stronę należy przesunąć zwierciadło, aby oświetlić niewielki obiekt w niedużej odległości? A w którą – aby zmniejszyć krąg światła w dużej odległości?

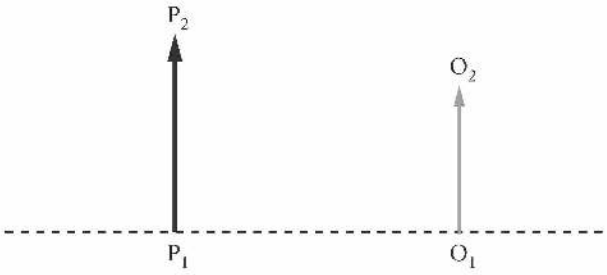


3. Przed zwierciadłem sferycznym wklęsłym o ogniskowej 6 cm umieszczono na osi optycznej w odległości 8 cm świecący przedmiot (żaróweczkę) umieszczony w osłonie w postaci świecącej strzałki o wysokości 3 cm. Promienie świetlne były skierowane na zwierciadło, a po odbiciu trafiały na ekran, gdzie tworzyły ostry obraz.

Wyznacz konstrukcyjnie w zeszycie położenie obrazu strzałki i określ jego cechy oraz wysokość obrazu.



4. Przedmiot P_1P_2 umieszczony przed zwierciadłem sferycznym wypukłym daje obraz O_1O_2. Przerysuj rysunek do zeszytu i znajdź konstrukcyjnie środek krzywizny zwierciadła, środek zwierciadła oraz ognisko pozorne zwierciadła.



***5.** Udowodnij, że obracająca się powierzchnia cieczy przyjmuje kształt paraboloidy (powierzchni, której przekrojem poprzecznym jest parabola). Wyjaśnij, jak można wykorzystać ten fakt w budowie teleskopów.

Wskazówka. Naszkicuj w zeszycie powierzchnię obracającej się cieczy w przekroju. Jest ona wykresem pewnej szukanej funkcji *f*. Narysuj siły działające na ciecz w pewnym punkcie przy jej powierzchni. W stanie równowagi wypadkowa tych sił jest skierowana prostopadle do powierzchni cieczy. Stąd można wyciągnąć wniosek na temat nachylenia stycznej do powierzchni cieczy. Na tej podstawie możesz stwierdzić, jaką postać ma pochodna funkcji *f*, co pozwala wyznaczyć samą funkcję *f*.

Temat dodatkowy

16.13. Przyrządy optyczne

Przypomnij sobie

- Soczewka skupiająca tworzy odwrócony obraz rzeczywisty obiektu znajdującego się dalej niż ognisko.
- Soczewka skupiająca tworzy prosty, powiększony, pozorny obraz obiektu znajdującego się bliżej niż ognisko.

Do tej pory badaliśmy pojedyncze soczewki. Ich zastosowanie ogranicza się do najprostszych przyrządów, takich jak mały aparat fotograficzny czy lupa. Jeśli jednak połączymy dwie lub więcej soczewek, będziemy mogli zbudować bardziej skomplikowane przyrządy optyczne, które pozwalają prowadzić obserwacje obiektów znajdujących się daleko od obserwatora lub uzyskiwać dużo większe powiększenia niż za pomocą lupy.

Luneta astronomiczna

Doświadczenie 13

1. Przygotuj dwie soczewki skupiające o różnych ogniskowych oraz czarny papier, nożyczki i taśmę klejącą. Jako soczewek możesz użyć na przykład szkła powiększającego i soczewki wymontowanej ze zużytego jednorazowego aparatu fotograficznego (poproś o niego u fotografa).
2. Wyznacz doświadczalnie ogniskowe obu soczewek (patrz s. 75).
3. Przytrzymaj soczewkę o dłuższej ogniskowej w wyciągniętej ręce i popatrz przez nią na odległe przedmioty. W drugą dłoń weź soczewkę o krótszej ogniskowej i popatrz przez nią jak przez lupę na obraz tworzony przez pierwszą soczewkę (zdjęcie a). Co obserwujesz?
4. Z czarnego papieru wykonaj rurę o średnicy równej średnicy soczewki o większej ogniskowej i długości równej tej ogniskowej. Umocuj na jednym z jej końców soczewkę o większej ogniskowej. Następnie z czarnego papieru wykonaj drugą, nieco krótszą rurę, którą będzie można nałożyć na pierwszą, aby do niej szczelnie przylegała.
5. Do końca drugiej rury przymocuj soczewkę o krótszej ogniskowej. Załóż jedną rurę na drugą tak, aby soczewki znalazły się na dwóch końcach (zdjęcie b).
6. Wyceluj soczewkę o dłuższej ogniskowej na odległy jasny przedmiot (ale nie słońce!) i przyłóż oko do drugiej soczewki. Ustaw taką długość rury, aby uzyskać ostry i jak największy obraz. Porównaj uzyskany obraz z obrazem otrzymanym za pomocą samych soczewek (w punkcie 3.).
7. Zbudowany przyrząd zachowaj do kolejnych doświadczeń.

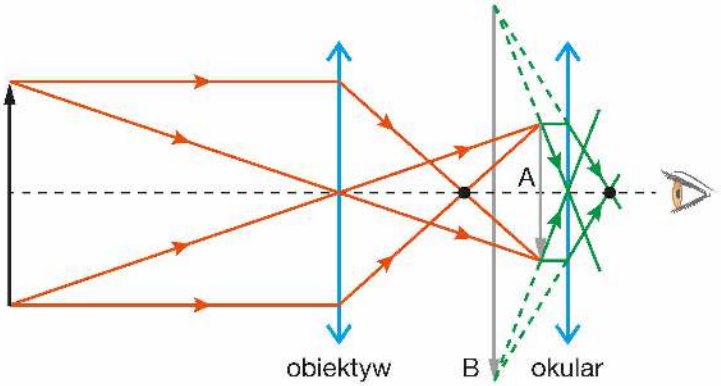
a)



b)



Przyrząd optyczny wykonany w sposób opisany w doświadczeniu to **luneta astronomiczna**. Soczewka bliższa oku to **okular**, a dalsza – **obiektyw**. Choć w obu przypadkach wykorzystujemy soczewki skupiające, każda z nich działa inaczej. Obiektyw tworzy obraz rzeczywisty odległych przedmiotów, który następnie oglądamy przez okular jak przez lupę (rys. 16.93).



Rys. **16.93.** Pierwsza soczewka (obiektyw) tworzy obraz A, który oglądamy przez drugą soczewkę (okular), użytą jako lupa. Widzimy powiększony obraz B małego obrazu A

Rola obudowy lunety

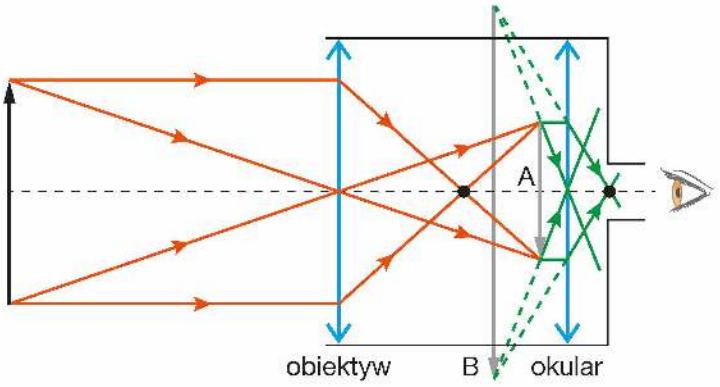
Skoro obraz tworzą soczewki, czy koniecznie trzeba je wkładać do obudowy? Czy nie prościej byłoby je trzymać w dłoniach? Podczas doświadczenia 13. mogliśmy się przekonać, że brak lub obecność obudowy nie wpływa na uzyskiwane powiększenie. Czemu więc służy obudowa? Otóż do okularu powinny docierać tylko promienie światła, które wcześniej przeszły przez obiektyw. Obudowa pozwala uzyskać dokładnie taki efekt, gdyż zasłania drogę wszystkim promieniom, które padałyby na obiektyw z boku, a po przejściu zakłócały powstający obraz.

Zwróć uwagę, że choć część obrazu pozornego tworzonego przez okular powstaje na zewnątrz przyrządu, obudowa nie ogranicza pola widzenia (rys. 16.95). Obraz ten jest bowiem pozorny, więc na to, jak go widzimy, nie ma wpływu miejsce, gdzie powstaje. Ważne jest tylko, aby nie zagrodzić drogi rzeczywistym promieniom światła dochodzącym do oka.

A dlaczego wewnętrzna strona obudowy lunety jest czarna? To proste. Gdyby miała inny kolor, przypadkowo odbijane od niej promienie światła powodowałyby pogorszenie jakości obrazu. Kiedy natomiast padają na czarną powierzchnię, są pochłaniane.



Rys. **16.94.** Obudowa przyrządu optycznego powinna być czarna od wewnątrz. Od zewnątrz może być pomalowana choćby na różowo



Rys. **16.95.** Część obrazu pozornego powstaje na zewnątrz lunety

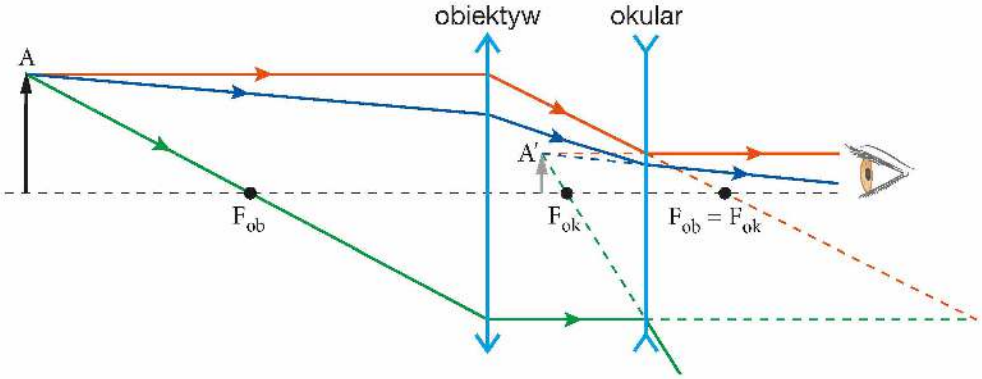
Luneta Galileusza

Poznamy teraz inny typ lunety, nazywany często lunetą ziemską, mimo że może służyć także do obserwacji obiektów w kosmosie.

Doświadczenie 14

1. Przygotuj lunetę zbudowaną w doświadczeniu 13. i soczewkę rozpraszającą (np. wizjer z jednorazowego aparatu fotograficznego rozmontowanego podczas budowy lunety astronomicznej).
2. Skróć o połowę obie rury lunety.
3. Wymień soczewkę w okularze na rozpraszającą.
4. Sprawdź, jaki obraz obserwujesz przez lunetę. Porównaj go z obrazem tworzonym przez lunetę astronomiczną zbudowaną w poprzednim doświadczeniu. Pamiętaj, że przez lunetę nie wolno patrzeć na słońce!





Rys. **16.96.** Schemat zasady działania lunety Galileusza

Obiektyw lunety Galileusza jest soczewką skupiającą (rys. 16.96). Ponieważ obserwowany przedmiot znajduje się dalej niż ognisko, mógłby on utworzyć obraz rzeczywisty. Tak się jednak nie dzieje, ponieważ zanim promienie światła wychodzące z punktu A przedmiotu dotrą do miejsca, w którym powinien powstać obraz, napotykają na okular – soczewkę rozpraszającą. Okular rozprasza promienie światła w taki sposób, że ich przedłużenia przechodzą przez jeden punkt, oznaczmy go A'. W tym właśnie punkcie widzimy obraz pozorny punktu A.

Zauważ, że luneta Galileusza tworzy obraz prosty, a nie odwrócony.

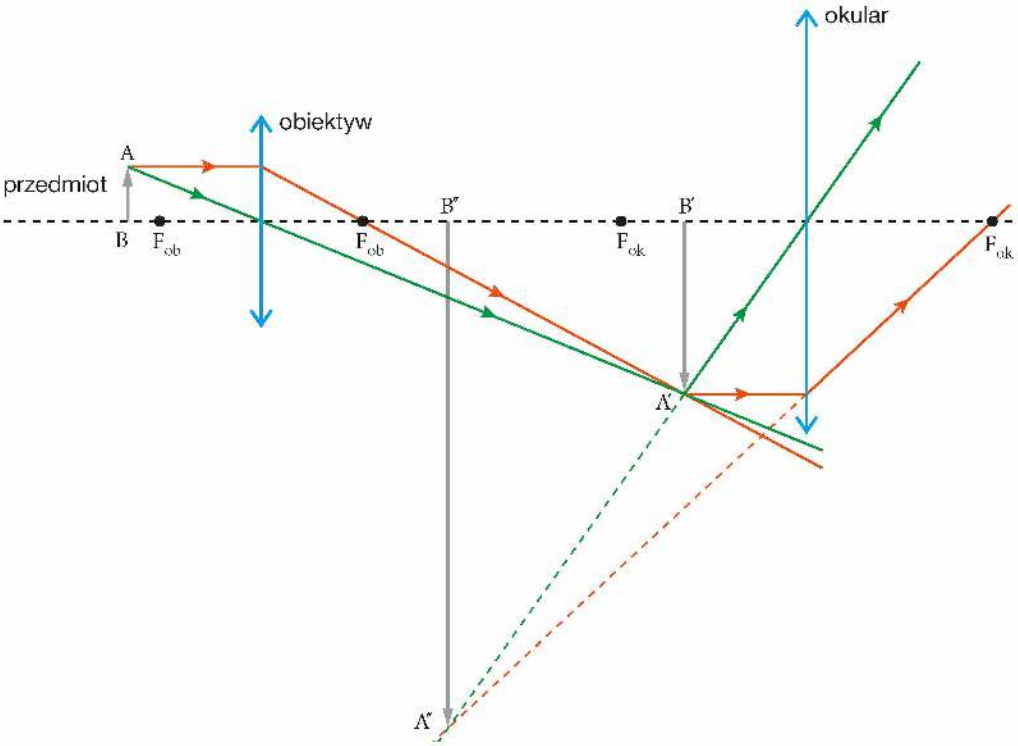
Mikroskop optyczny

Zasada działania mikroskopu optycznego jest podobna do zasady działania lunety astronomicznej. Obiektyw tworzy rzeczywisty, odwrócony obraz przedmiotu, który oglądamy przez okular jak przez lupę. Na rysunku 16.97 przedmiot oznaczono jako AB, a jego obraz tworzony przez obiektyw – jako A'B'. Okular tworzy obraz pozorny A''B'' obrazu A'B'.

A o ciekawe

Dzięki lunecie ziemskiej Galileusz odkrył księżyce Jowisza, co było argumentem za teorią Kopernika. Teorii tej zarzucano niekonsekwencję: skoro wszystkie planety krążą wokół Słońca, to dlaczego Księżyc (uważany przed Kopernikiem za planetę) jest wyjątkiem? Odkrycie księżyców Jowisza pokazało, że z podobną sytuacją mamy do czynienia także w przypadku innych planet. Na zdjęciu: dom Galileusza we Florencji.





Rys. 16.97. Schemat powstawania obrazu w mikroskopie optycznym

Różnica polega na tym, że w przypadku mikroskopu przedmiot znajduje się tuż za ogniskiem obiektywu, a jego obraz tworzony przez obiektyw jest już powiększony. Okular powiększa go dodatkowo, co łącznie pozwala na osiągnięcie powiększenia nawet 1000 razy.

Teleskop zwierciadlany

Największe utrudnienie w obserwacji odległych gwiazd i galaktyk stanowi nie zbyt małe powiększenie lunety, ale zbyt słabe światło dochodzące do nas z takiej odległości. Buduje się więc teleskopy o jak największej średnicy obiektywu. Jednak wykonanie teleskopu z dużą soczewką jest bardzo skomplikowane. Dlatego zamiast nich używa się zwierciadeł wklęsłych. Tak zbudowany przyrząd nazywamy teleskopem zwierciadlanym. Wykonamy jego prosty model.

Na większy obiektyw pada więcej światła.

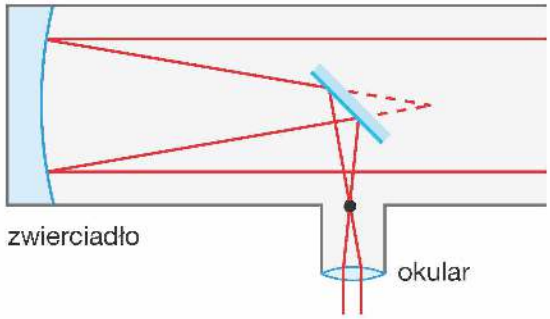
Doświadczenie 15

1. Przygotuj zwierciadło wklęsłe (np. lusterko do makijażu) i soczewkę wypukłą (np. szkło powiększające).
2. Ustaw zwierciadło naprzeciwko odległego przedmiotu (nie słońca!) i obejrzyj obraz tworzony przez zwierciadło.
3. Popatrz na obraz uzyskany w zwierciadle przez soczewkę wypukłą. Co zaobserwowałeś?





Teleskop zwierciadlany działa podobnie do lunety astronomicznej, z tą różnicą, że funkcję obiektywu spełnia w nim nie soczewka, ale zwierciadło wklęsłe. Jak już wiesz, takie zwierciadło działa podobnie do soczewki skupiającej i także tworzy obraz rzeczywisty odległych przedmiotów. Przez okular oglądamy ten obraz jak przez lupę.



Rys. **16.98.** Schemat działania teleskopu zwierciadlanego

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać działanie i zastosowania poznanych przyrządów optycznych;
- konstruować obrazy tworzone przez przyrządy optyczne;
- rozwiązywać zadania na temat tych przyrządów.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Zwierciadło amatorskiego teleskopu ma średnicę 20 cm. Ile razy więcej światła odbiera taki teleskop w stosunku do oka? Średnicę źrenicy oka oszacuj samodzielnie. Zwróć przy tym uwagę, że w nocy, gdy dokonujemy obserwacji, źrenice są rozszerzone.

2. Co widać przez lunetę astronomiczną, jeśli trzymamy ją odwrotnie (obiektyw przy oku)? Dlaczego?

3. Zbuduj prosty mikroskop.

a) Jako obiektywu użyj soczewki wymontowanej ze wskaźnika laserowego, a jako okularu – aparatu fotograficznego w telefonie.

b) Za pomocą masy plastycznej ostrożnie przymocuj soczewkę do obiektywu aparatu.

c) Mikroskop jest gotowy – gdy włączysz aparat, zobaczysz na wyświetlaczu powiększony obraz. Sfotografuj powiększone obrazy różnych niewielkich przedmiotów.

Uwaga. Nie jest to mikroskop taki jak omówiony wcześniej. W tym przypadku okular tworzy obraz rzeczywisty na matrycy aparatu, a nie obraz pozorny, widoczny tylko gołym okiem, tak jak to się dzieje w zwykłym mikroskopie.



16.14. Polaryzacja światła

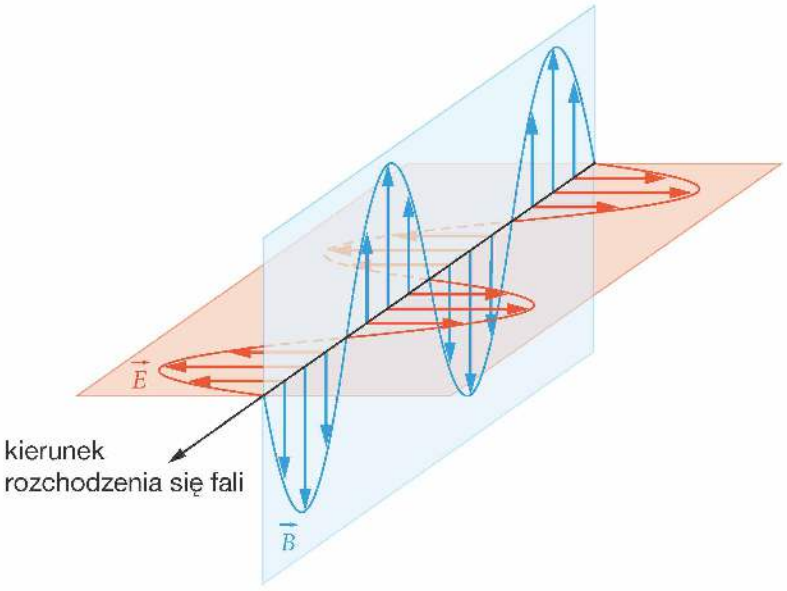
Przypomnij sobie

- Fala elektromagnetyczna to rozchodzące się zmiany pola elektrycznego i magnetycznego.
- Jeśli kierunek drgań cząsteczek jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali, to falę nazywamy poprzeczną.
- Pole elektryczne w danym punkcie przestrzeni w danej chwili jest opisane przez wektor natężenia pola $\vec{E}$, a pole magnetyczne – przez wektor indukcji magnetycznej $\vec{B}$.

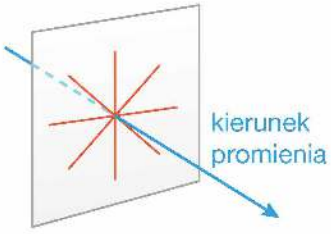
Wektory natężenia pola i indukcji magnetycznej w fali elektromagnetycznej

Przypomnijmy, że wśród fal mechanicznych wyróżnialiśmy poprzeczne i podłużne. W tych pierwszych drgania cząsteczek są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali, a w drugich – są do niego równoległe. Czy te pojęcia można jakkolwiek odnieść do fal elektromagnetycznych, w których nie mamy do czynienia z drganiami cząsteczek?

Jak już wiesz z tematu 16.6, wektory natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ i indukcji magnetycznej $\vec{B}$ są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Dlatego mówimy, że fale elektromagnetyczne, w tym światło, są falami poprzecznymi. Dodatkowo wektory $\vec{E}$ i $\vec{B}$ są do siebie prostopadłe (rys. 16.99).



Rys. 16.99. Wektory natężenia pola $\vec{E}$ i indukcji magnetycznej $\vec{B}$ w fali elektromagnetycznej w danej chwili

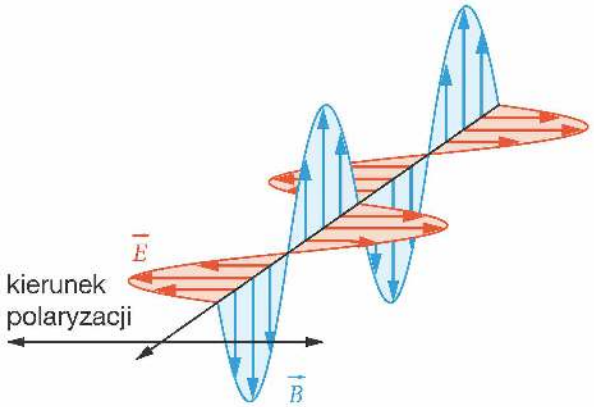


Rys. 16.100. Kierunków prostopadłych do promienia światła jest nieskończenie wiele

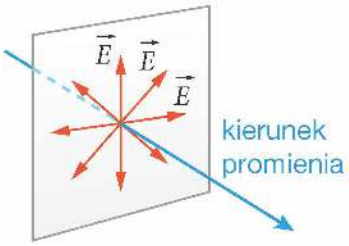
Skoro światło jest falą elektromagnetyczną, jest również falą poprzeczną. Jednak kierunków prostopadłych do promienia światła jest nieskończenie wiele (rys. 16.100).

Jeśli w fali elektromagnetycznej pole elektryczne (a zatem i magnetyczne) drga tylko w jednym określonym kierunku, to mówimy, że fala jest spolaryzowana.

Przyjmuje się, że kierunek polaryzacji fali elektromagnetycznej jest określany przez kierunek drgań wektora natężenia pola elektrycznego.



Rys. **16.101.** Kierunek polaryzacji światła to kierunek drgań wektora natężenia pola elektrycznego



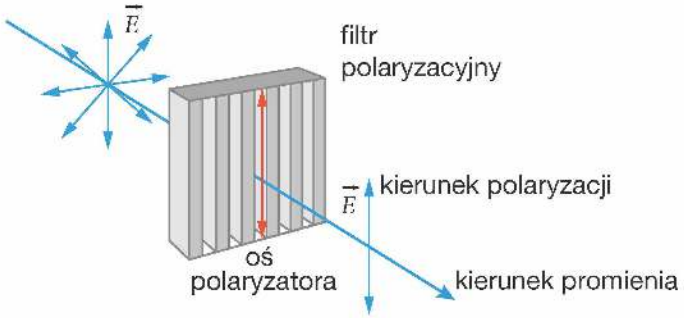
Rys. **16.102.** Schematyczne przedstawienie światła niespolaryzowanego, składającego się z fal o różnej polaryzacji

Światło na ogół nie jest spolaryzowane (rys. 16.102). Oznacza to, że jest ono mieszaniną wielu fal o różnych, przypadkowych kierunkach wektora natężenia pola elektrycznego.

Filtry polaryzacyjne

Niektóre substancje mają tę właściwość, że przepuszczają tylko światło o wektorach pola elektrycznego drgających w jednym kierunku. Z takich materiałów można wytwarzać **filtry polaryzacyjne**. Po przejściu przez nie światło staje się spolaryzowane (rys. 16.103).

Uwaga. Opisywane tutaj filtry nazywamy liniowymi. Istnieją również filtry o polaryzacji kołowej, których nie będziemy omawiać.



Rys. **16.103.** Schemat działania filtra polaryzacyjnego

Zbadajmy właściwości światła spolaryzowanego za pomocą filtrów polaryzacyjnych liniowych.



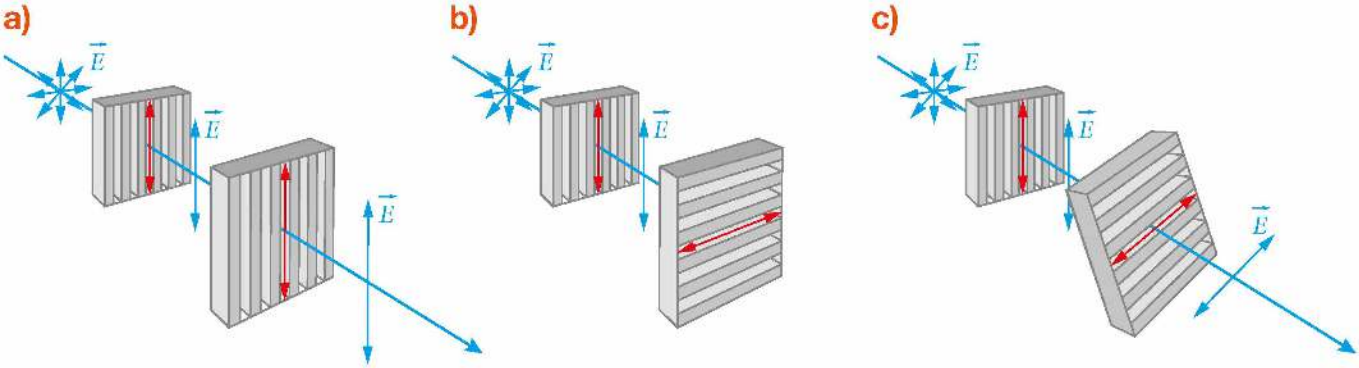
Doświadczenie 16 – obowiązkowe

Obserwacja zmiany natężenia światła po przejściu przez polaryzatory

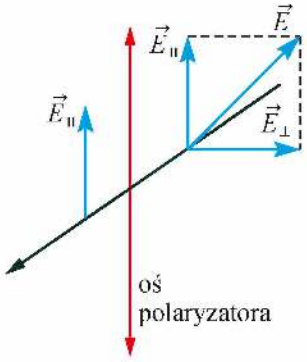
1. Przygotuj trzy filtry polaryzacyjne. Możesz kupić folię polaryzacyjną w sklepie internetowym albo delikatnie zdjąć ją z wyświetlacza zepsutego kalkulatora lub zegarka cyfrowego.
2. Weź dwa filtry, nałóż jeden na drugi i popatrz przez nie w stronę jasnego nieba albo lampy. Obracaj jeden z filtrów. Co widzisz?
3. Ustaw dwa filtry tak, aby nic nie było przez nie widać. Wsuń pomiędzy nie trzeci filtr obrócony pod kątem ok. 45° względem pozostałych filtrów. Ponownie spójrz przez filtry na niebo albo lampę. Czy coś się zmieniło?

W doświadczeniu mogliśmy zaobserwować, że gdy ustawiliśmy dwa filtry jeden za drugim, od ich wzajemnego położenia zależało, czy światło przeszło przez oba filtry. Dlaczego?

Po przejściu przez pierwszy filtr światło jest już spolaryzowane, więc jeśli drugi filtr jest ustawiony tak samo jak pierwszy, światło przejdzie przez niego bez przeszkód (rys. 16.104a). Jeśli jednak drugi filtr jest obrócony o 90° w stosunku do pierwszego (rys. 16.104b), nie przepuści światła. W pozostałych ustawieniach, czyli gdy drugi polaryzator jest obrócony o kąt inny niż 90° (rys. 16.104c), jest przepuszczana część światła.



Rys. **16.104.** Przejście światła przez dwa kolejne filtry polaryzacyjne



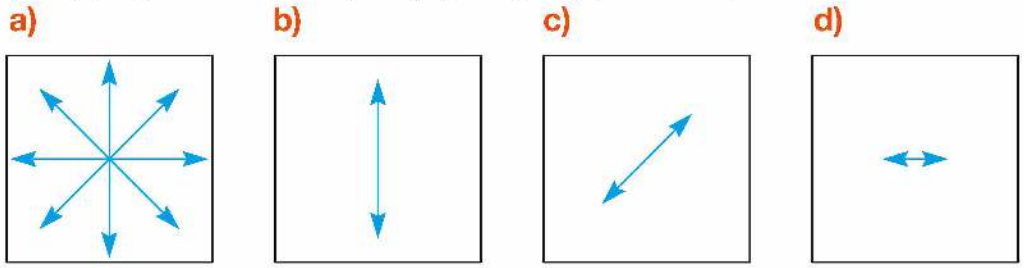
Rys. **16.105.** Polaryzator przepuszcza tylko jedną ze składowych wektora natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$

Aby opisać powyższe zjawisko za pomocą wektorów natężenia pola elektrycznego, możemy powiedzieć, że polaryzator rozkłada wektor $\vec{E}$ fali świetlnej na składowe: równoległą do osi polaryzatora $\vec{E}_{\parallel}$ oraz prostopadłą do tej osi $\vec{E}_{\perp}$. Składowa równoległa zostaje przepuszczona, a prostopadła – pochłonięta (rys. 16.105).

Rozkład wektora natężenia pola elektrycznego na składowe pozwala zrozumieć wynik ostatniego, najciekawszego chyba elementu doświadczenia obowiązkowego, czyli rozjaśnienie obrazu po dodaniu nowego polaryzatora.

Światło po przejściu przez pierwszy polaryzator było spolaryzowane równolegle do jego osi. Takie światło zostałoby całkowicie pochłonięte przez polaryzator ustawiony prostopadle, gdyby nie fakt, że wsunięty między nie dodatkowy polaryzator spowodował zmianę płaszczyzny

polaryzacji światła. Dlatego trzeci polaryzator nie zablokował całego padającego światła, ale tylko jego część (rys. 16.106).



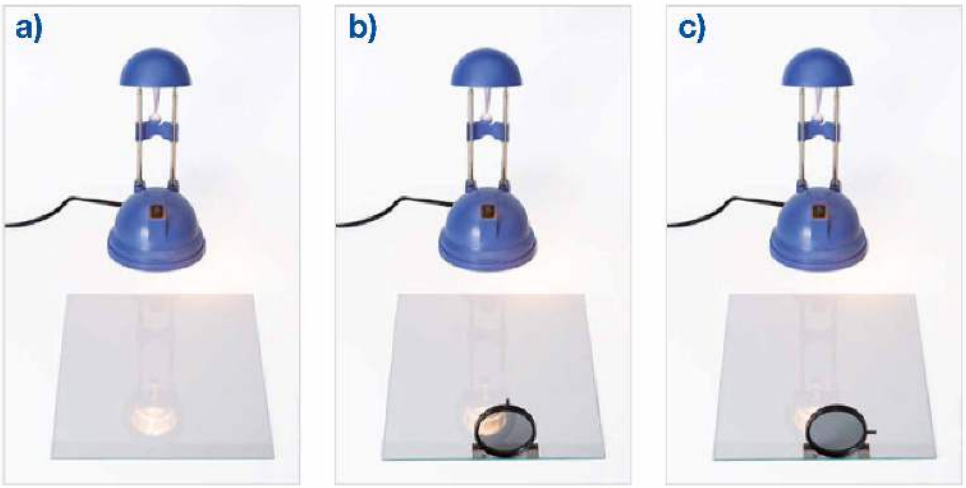
Rys. **16.106.** Polaryzacja światła przechodzącego przez trzy polaryzatory (doświadczenie 16. punkt 3): światło niespolaryzowane (a) oraz światło po przejściu przez pierwszy (b), drugi (c) i trzeci (d) polaryzator

Polaryzacja przy odbiciu

Istnieje także inna metoda otrzymywania światła spolaryzowanego: polaryzacja przy odbiciu. Zbadamy ją doświadczalnie. Polaryzator posłuży nam jedynie do badania tego zjawiska.

Doświadczenie 17

1. Przygotuj lampkę biurkową, polaryzator oraz gładką powierzchnię (mogą to być: szyba, blat biurka, panele podłogowe lub okładka tego podręcznika).
2. Skieruj światło lampki na gładką powierzchnię (jak na zdjęciu a).
3. Patrz na światło odbite, obracając polaryzator (zdjęcia b i c). Co obserwujesz?

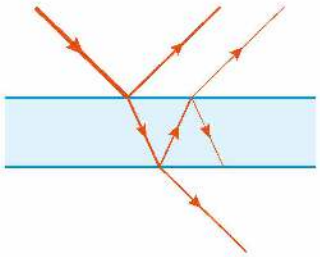


Jak wyjaśnić to, że światło odbite od płaskiej powierzchni jest spolaryzowane? W tym celu musimy najpierw prześledzić mikroskopowy mechanizm odbicia światła. W odróżnieniu od odbicia bili od bandy stołu bilardowego, kiedy po zdarzeniu mamy do czynienia z tym samym obiektem, odbicie światła polega na tym, że fala świetlna najpierw jest przez ośrodek pochłaniana, a zaraz potem z powrotem emitowana, na ogół w innym kierunku.

a)



b)



Rys. 16.107. Promień światła padający na płytkę równoległościenną: a) zdjęcie zjawiska, b) schemat

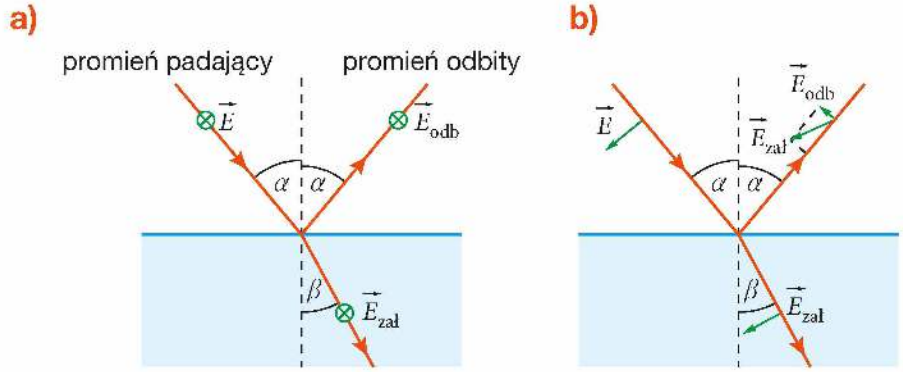
Przypomnijmy symbole oznaczające wektory prostopadłe do płaszczyzny rysunku:
⊗ – wektor skierowany w głąb kartki,
⊙ – wektor skierowany w stronę patrzącego.
Są to schematyczne rysunki strzały z łuku widzianej z przodu lub z tyłu.

Odbiciu fali świetlnej towarzyszy zawsze jej załamanie – część fali padającej ulega odbiciu, a część załamaniu (rys. 16.107). Zjawisko załamania zachodzi nawet wtedy, gdy światło pada na substancje nieprzezroczyste, na przykład śnieg czy papier, z tą różnicą, że promień załamany przebywa w drugim ośrodku bardzo krótką drogę i jest przez niego pochłaniany.

Wyjaśnienie polaryzacji przy odbiciu

Rozważmy najpierw sytuację, gdy na powierzchnię pada promień spolaryzowany prostopadle do płaszczyzny padania (tzn. prostopadle do płaszczyzny rysunku, rys. 16.108a). Pobudza on elektrony z powierzchni do drgań w kierunku prostopadłym do płaszczyzny padania, więc emitowane przez nie światło – zarówno w przypadku światła odbitego, jak i załamanego – ma tę samą polaryzację.

A co się dzieje, gdy mamy do czynienia z promieniem o polaryzacji zgodnej z płaszczyzną padania (rys. 16.108b)? Zarówno wektor natężenia pola elektrycznego dla promienia załamanego $\vec{E}_{zał}$, jak i wektor pola elektrycznego dla promienia odbitego $\vec{E}_{odb}$ leżą w płaszczyźnie padania, ale nie są równe, gdyż każdy z nich musi być prostopadły do „swojego" promienia – fala elektromagnetyczna jest przecież falą poprzeczną. Wektor $\vec{E}_{odb}$ jest równy tylko składowej wektora $\vec{E}_{zał}$ prostopadłej do promienia. Dlatego światło odbite jest w tym przypadku słabsze.



Rys. 16.108. Polaryzacja przez odbicie: a) promień padający spolaryzowany prostopadle do płaszczyzny padania (czyli do płaszczyzny rysunku), b) promień padający spolaryzowany równolegle do tej płaszczyzny

Jeśli światło spolaryzowane nie jest ani równolegle, ani prostopadle do płaszczyzny padania, to jego polaryzację można traktować jako złożenie polaryzacji równoległej i prostopadłej. Odpowiada temu rozkład wektora $\vec{E}$ na składowe:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\parallel} + \vec{E}_{\perp}$$

Składowa prostopadła jest odbijana bez przeszkód, natomiast składowa równoległa zostaje osłabiona. Wobec tego światło zostaje częściowo spolaryzowane.

Jeśli na powierzchnię pada światło niespolaryzowane, np. na leżący na ziemi śnieg pada światło Słońca, to takie światło możemy traktować jako mieszaninę fal o różnych polaryzacjach. Fale o polaryzacji prostopadłej do płaszczyzny padania (czyli równoległej do płaszczyzny odbijającej) są odbijane silniej.

> Światło odbite jest spolaryzowane w kierunku równoległym do płaszczyzny odbijającej światło.

W przypadku odbicia światła od tafli wody, śniegu i innych poziomych płaszczyzn polaryzacja jest więc pozioma.

Zmiana natężenia światła przy przejściu przez polaryzator

W doświadczeniu 16. widzieliśmy, jak zmienia się natężenie światła podczas obracania jednego z polaryzatorów, przez które przechodziło światło. Jak opisać te zmiany ilościowo? Okazuje się, że jest to możliwe, gdy skorzystamy z własności fal omawianej do tej pory tylko dla fal mechanicznych:

> Natężenie fali mechanicznej jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy drgań.

Zależność natężenia fali od amplitudy, cz. II s. 227

Dla fal elektromagnetycznych zamiast drgających ciał mamy do czynienia ze zmieniającymi się okresowo polami elektrycznym i magnetycznym, ale zasada pozostaje ta sama:

> Natężenie fali elektromagnetycznej jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy zmian natężenia pola elektrycznego.

Zamiast pola elektrycznego można korzystać także z pola magnetycznego, my jednak skupimy się na polu elektrycznym.

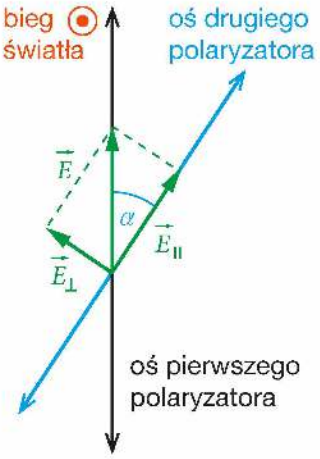
Rozważmy teraz dwa polaryzatory, których osie są ustawione względem siebie pod kątem α (rys. 16.109). Po przejściu przez pierwszy z nich światło jest spolaryzowane. Wektor pola elektrycznego w takim świetle jest skierowany zgodnie z osią pierwszego polaryzatora, czyli pod kątem α względem osi drugiego polaryzatora.
Jak wiesz, wektor $\vec{E}$ możemy rozłożyć na składowe równoległą i prostopadłą do osi drugiego polaryzatora. Składowa równoległa ma wartość:

$$E_{\parallel} = E \cos \alpha$$

Ponieważ natężenie światła jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy pola elektrycznego, więc natężenie światła I po przejściu przez drugi polaryzator zmniejszy się do:

$$I' = I \cos^2 \alpha$$

Zauważ, że dla $\alpha = 0°$ oznacza to brak osłabienia światła ($\cos 0° = 1$), a dla $\alpha = 90°$ światło jest całkowicie blokowane ($\cos 90° = 0$), tak jak to obserwowaliśmy w doświadczeniu.



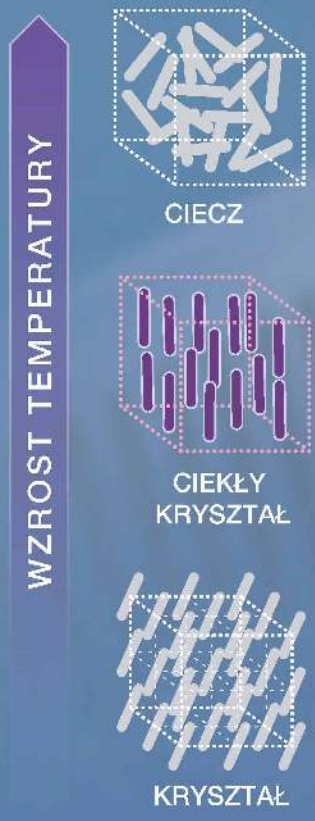
Rys. 16.109. Polaryzacja światła dla polaryzatorów ustawionych pod kątem

EKRAN LCD

Działanie ekranu ciekłokrystalicznego, czyli LCD (ang. *Liquid Crystal Display*), jest możliwe dzięki wykorzystaniu niezwykłych właściwości ciekłych kryształów. Poznaj je i dowiedz się, w jaki sposób na ekranach LCD powstaje obraz.

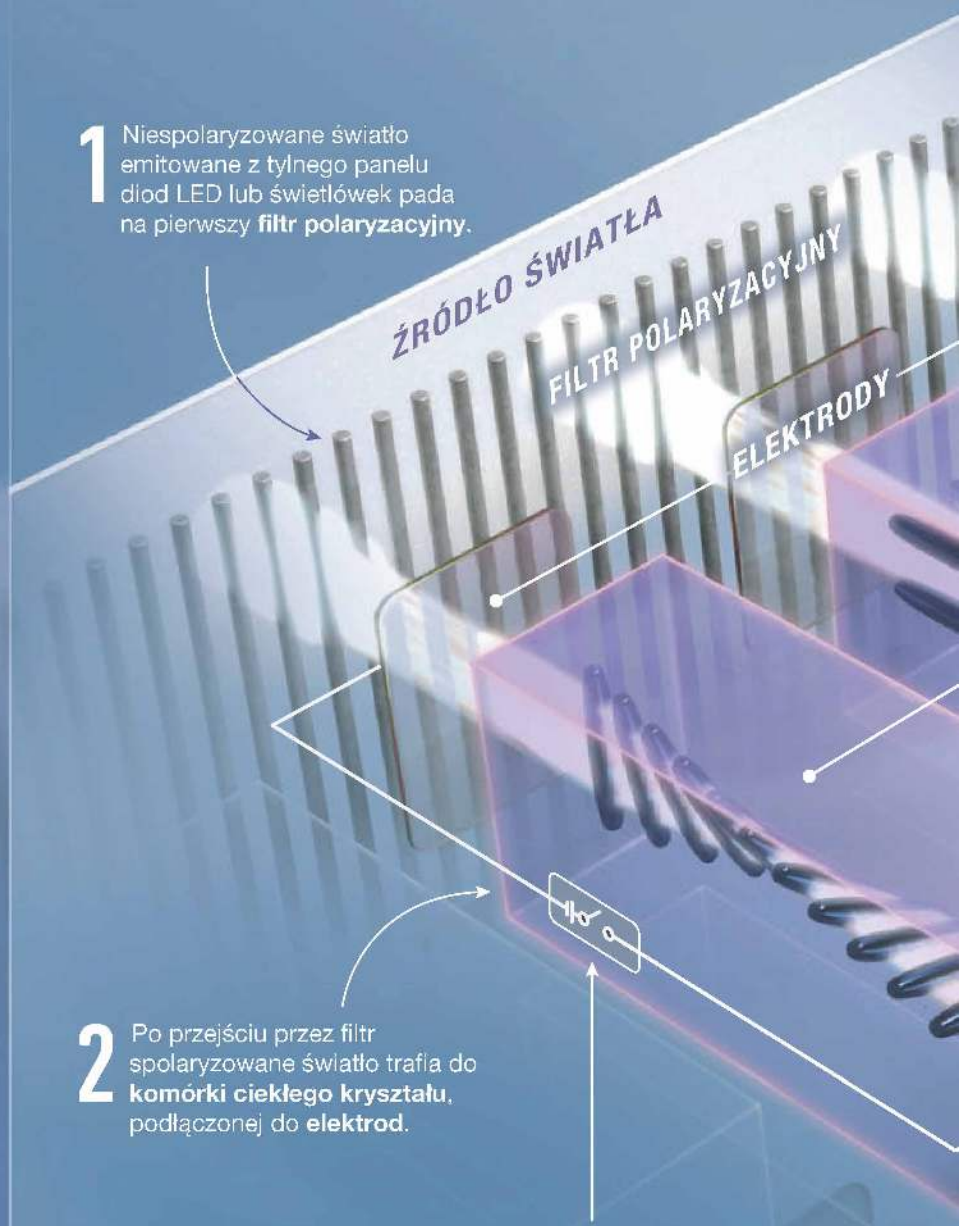
CIEKŁE KRYSZTAŁY

Ciekłe kryształy to substancje zbudowane z cząsteczek o kształcie pałeczek lub dysków, będące w fazie pośredniej między ciekłym a stałym – krystalicznym stanem skupienia. Ciekłe kryształy łączą charakterystyczną dla cieczy zdolność do przemieszczania się cząsteczek z uporządkowaną strukturą przestrzenną, typową dla kryształów.



Ciekłe kryształy mają jeszcze jedną ciekawą właściwość: pod wpływem przyłożonego napięcia ich cząsteczki zmieniają swoją orientację w przestrzeni. Tę właśnie cechę wykorzystano w ekranach LCD.

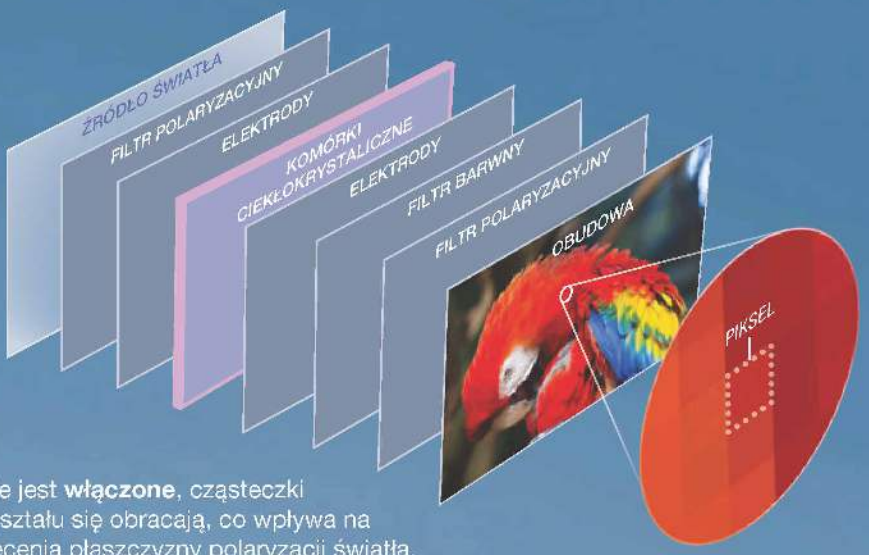
DZIAŁANIE KOMÓREK CIEKŁOKRYSTALICZNYCH W POJEDYNCZYM PIKSELU



1 Niespolaryzowane światło emitowane z tylnego panelu diod LED lub świetlówek pada na pierwszy **filtr polaryzacyjny**.

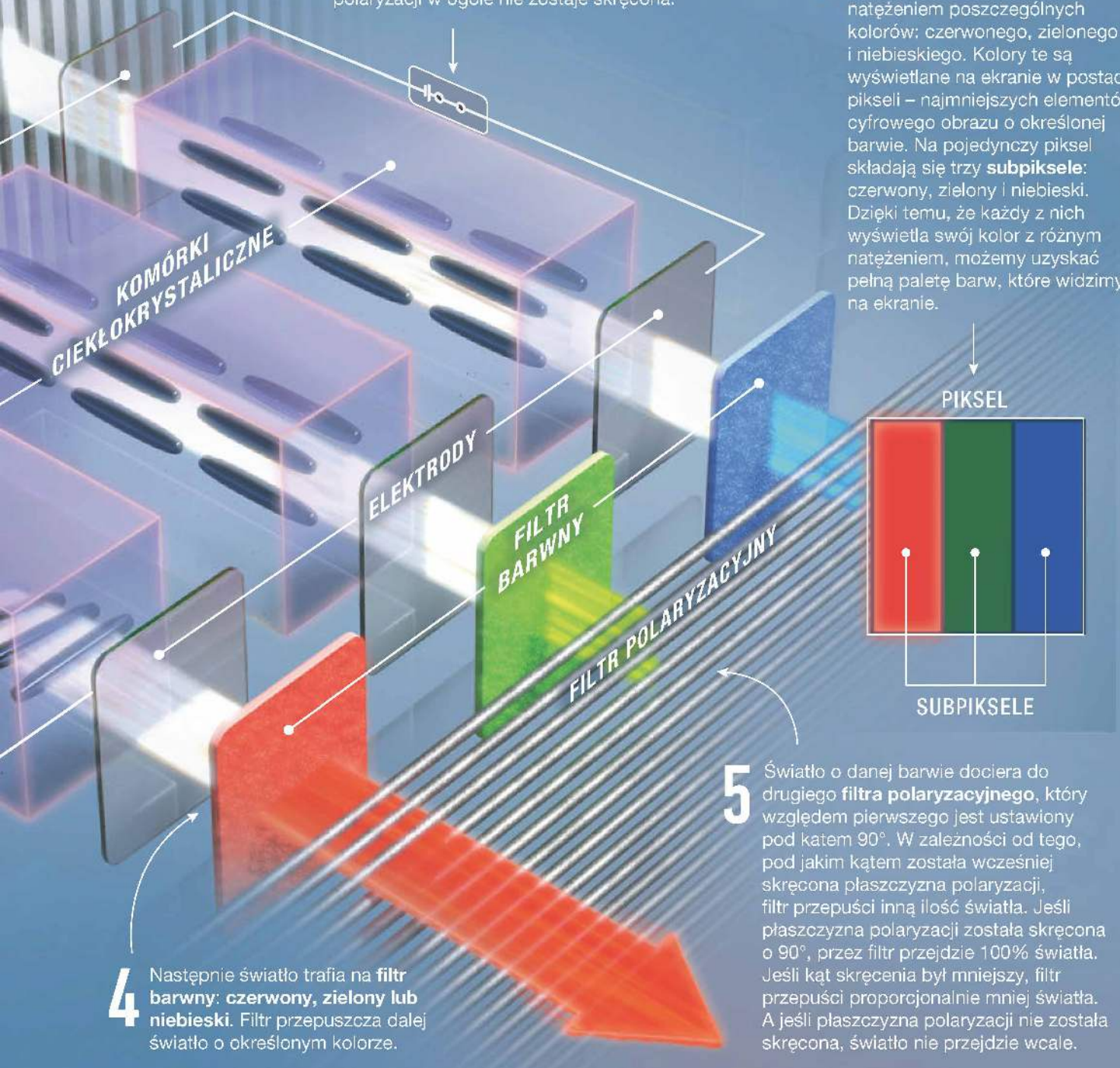
2 Po przejściu przez filtr spolaryzowane światło trafia do **komórki ciekłego kryształu**, podłączonej do **elektrod**.

3a Kiedy napięcie jest **wyłączone**, naturalny układ cząsteczek w komórce ciekłego kryształu sprawia, że płaszczyzna polaryzacji światła zostaje skręcona o 90°.



3b Gdy napięcie jest **włączone**, cząsteczki ciekłego kryształu się obracają, co wpływa na stopień skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła. Im wyższe napięcie, tym mniejszy kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji. Jeżeli napięcie ma maksymalną możliwą wartość, to płaszczyzna polaryzacji w ogóle nie zostaje skręcona.

6 Za pomocą regulacji intensywności światła we wcześniejszych warstwach ekranu sterujemy natężeniem poszczególnych kolorów: czerwonego, zielonego i niebieskiego. Kolory te są wyświetlane na ekranie w postaci pikseli – najmniejszych elementów cyfrowego obrazu o określonej barwie. Na pojedynczy piksel składają się trzy **subpiksele**: czerwony, zielony i niebieski. Dzięki temu, że każdy z nich wyświetla swój kolor z różnym natężeniem, możemy uzyskać pełną paletę barw, które widzimy na ekranie.



4 Następnie światło trafia na **filtr barwny**: **czerwony, zielony lub niebieski**. Filtr przepuszcza dalej światło o określonym kolorze.

5 Światło o danej barwie dociera do drugiego **filtra polaryzacyjnego**, który względem pierwszego jest ustawiony pod katem 90°. W zależności od tego, pod jakim kątem została wcześniej skręcona płaszczyzna polaryzacji, filtr przepuści inną ilość światła. Jeśli płaszczyzna polaryzacji została skręcona o 90°, przez filtr przejdzie 100% światła. Jeśli kąt skręcenia był mniejszy, filtr przepuści proporcjonalnie mniej światła. A jeśli płaszczyzna polaryzacji nie została skręcona, światło nie przejdzie wcale.



A to ciekawe

Niektóre ptaki, owady i inne zwierzęta widzą kierunek polaryzacji. Dzięki temu nawet w mocno zachmurzony dzień mogą ocenić, gdzie znajduje się słońce, co pomaga im orientować się w terenie. Zauważono, że pszczoły, które znalazły miejsce obfitujące w nektar, za pomocą specjalnego tańca przekazują swoim towarzyszkom informację o tym, pod jakim kątem względem kierunku do słońca należy lecieć, aby znaleźć pożywienie. Kąt pomiędzy kierunkiem tańca a pionem jest równy kątowi pomiędzy kierunkiem lotu do pokarmu a kierunkiem do słońca. Biologowie wykazali doświadczalnie, że lotem pszczół można sterować, jeśli na drodze oświetlającego je światła ustawi się filtry polaryzacyjne.

A w jakim stopniu polaryzator osłabia padające na niego światło niespolaryzowane? Odpowiedź na to pytanie znajdziesz, gdy rozwiążesz zadanie 3. ze s. 108.

Zastosowania filtrów polaryzacyjnych

Światło odbite od tafli jeziora, śniegu czy kałuży jest częściowo spolaryzowane w kierunku równoległym do powierzchni odbijającej, czyli na ogół poziomo. Dlatego właśnie tak przydatne – zwłaszcza nad morzem czy podczas jazdy na nartach – są okulary z filtrem polaryzacyjnym. Ograniczają one natężenie światła odbitego od wody lub śniegu, dzięki czemu światło nas nie oślepia, a jednocześnie widzimy wyraźnie obiekty znajdujące się w cieniu, słabo widoczne po założeniu zwykłych okularów przeciwsłonecznych.
Okulary polaryzacyjne są popularne także wśród wędkarzy. Zapewniają im komfort podczas obserwowania powierzchni wody w słoneczny dzień, kiedy odbija się od niej silne światło słoneczne.

Również światło błękitnego nieba, czyli światło słoneczne rozproszone w atmosferze, jest spolaryzowane. Dlatego filtry polaryzacyjne wykorzystuje się w fotografii (rys. 16.110), np. w celu wzmocnienia kontrastu chmur na tle nieba. Mogą one też służyć do wygaszania niepotrzebnych refleksów światła.

a) b)



Rys. **16.110.** Zdjęcie tego samego kadru wykonane: a) z filtrem polaryzacyjnym, b) bez filtra polaryzacyjnego

Wyświetlacze LCD

Najczęściej spotykanym na co dzień zastosowaniem polaryzacji światła w technice są wyświetlacze ciekłokrystaliczne (LCD – *Liquid Crystal Display*). Substancja, z której są wykonane, ma ciekawą właściwość: skręca płaszczyznę polaryzacji światła. Gdy jednak ciekły kryształ znajdzie się w polu elektrycznym, jego cząsteczki ustawiają się w inny sposób i skręcenie polaryzacji znika.

Wyświetlacz LCD składa się z dwóch prostopadłych polaryzatorów, między którymi znajdują się warstwy ciekłych kryształów – po trzy na każdy piksel na ekranie (dla barw podstawowych RGB). Przez regulację napięcia podłączonego do danego kryształu sterujemy polem elektrycznym i polaryzacją światła przechodzącego przez kryształ. Polaryzatory powodują, że w zależności od polaryzacji inna ilość światła będzie pokazywana na ekranie w danym punkcie. Więcej na ten temat znajduje się na infografice s. 104–105.

Barwy podstawowe RGB:
czerwony (*red* – R),
zielony (*green* – G),
niebieski (*blue* – B).

Po tej lekcji powinieneś

- wiedzieć, czym różni się światło spolaryzowane od niespolaryzowanego;
- opisywać i wyjaśniać zjawisko polaryzacji światła przy przejściu przez polaryzator i przy odbiciu;
- opisywać zastosowania polaryzatorów.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Pomiędzy dwa polaryzatory o prostopadłych osiach wstawiono trzeci, ustawiony pod kątem α do pierwszego z nich. Uzasadnij, że natężenie światła po przejściu przez wszystkie trzy polaryzatory będzie największe dla kąta $\alpha = 45°$.

Rozwiązanie

Oznaczmy jako I_1 natężenie światła po przejściu przez pierwszy polaryzator. Po przejściu przez drugi polaryzator natężenie światła zmniejszy się do:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha$$

Trzeci polaryzator jest ustawiony względem drugiego pod kątem $90° - \alpha$, więc po przejściu przez niego natężenie światła zmniejszy się do:

$$I_3 = I_2 \cos^2(90° - \alpha) = I_1 \cos^2 \alpha \cos^2(90° - \alpha)$$

Skorzystajmy z tożsamości trygonometrycznych. Najpierw podstawiamy $\cos(90° - \alpha) = \sin \alpha$ i otrzymujemy:

$$I_3 = I_1 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha$$

a następnie $2\cos \alpha \sin \alpha = \sin 2\alpha$:

$$I_3 = I_1 (\cos \alpha \sin \alpha)^2 = I_1 \left(\tfrac{1}{2} \sin 2\alpha\right)^2 = \tfrac{1}{4} I_1 \sin^2 2\alpha$$

Ponieważ I_1 jest stałe, więc I_3 przyjmuje największą wartość wtedy, gdy argument funkcji sinus jest równy 90°, czyli dla $2\alpha = 90°$, stąd $\alpha = 45°$, co było do wykazania.

Zadania s. 108

Pytania i zadania

1. Okulary polaryzacyjne mają wiele zalet, ale też jedną wadę: nie zawsze można w nich czytać z wyświetlaczy LCD, co może być potrzebne na przykład w czasie jazdy samochodem. Gdy jeden z autorów tej książki chce w okularach polaryzacyjnych odczytać podczas jazdy samochodem godzinę z zegara cyfrowego na tablicy rozdzielczej, musi przekrzywić głowę o 45° w prawo, kiedy natomiast chce odczytać wskazanie licznika kilometrów – w lewo. Określ płaszczyznę polaryzacji światła emitowanego przez wyświetlacze zegara i tablicy rozdzielczej w samochodzie, którym jeździ autor.

Wskazówka. Najpierw określ sposób ustawienia folii polaryzacyjnej w okularach.

2. Spolaryzowane światło o natężeniu 10 $\frac{W}{m^2}$ pada na polaryzator, którego oś jest ustawiona pod kątem 20° do kierunku polaryzacji padającego światła. Oblicz natężenie światła po przejściu przez polaryzator.

3. Na polaryzator pada niespolaryzowane światło o natężeniu I. Oblicz natężenie światła po przejściu przez polaryzator. W tym celu załóż, że światło niespolaryzowane to suma fal o jednakowym natężeniu i polaryzacji pod kątem 0°, 1°, 2°, 3°, ..., 90° względem osi polaryzatora. Dla każdej z tych spolaryzowanych fal oblicz natężenie po przejściu przez polaryzator. Obliczenia wykonaj w arkuszu kalkulacyjnym.

4. Za pomocą filtra polaryzacyjnego zbadaj doświadczalnie, które z wymienionych niżej świateł jest spolaryzowane:

a) światło ekranu laptopa,

b) światło żarówki,

c) światło odbite od białej kartki.

5. Wykonaj dwa doświadczenia, a następnie porównaj i wyjaśnij ich wyniki.

a) Sprawdź za pomocą polaryzatora, czy światło błękitnego nieba jest spolaryzowane, gdy na niebo patrzymy:

- niemal bezpośrednio w kierunku słońca (ale nie bezpośrednio na słońce!),
- mając słońce za plecami,
- stojąc bokiem do słońca.

b) Do szklanki z wodą wlej kilka kropel mleka i wymieszaj. Między latarką a szklanką umieść kartonik z otworem. Poświeć przez otwór latarką na szklankę i zbadaj, czy przechodzące przez roztwór światło jest spolaryzowane, gdy patrzymy na nie:

- na wprost, tzn. gdy świecimy latarką w swoją stronę,



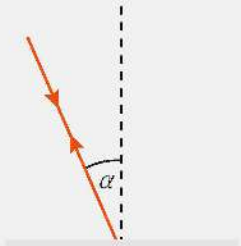
- pod kątem 90°.



O tym, do czego służą „odblaski”

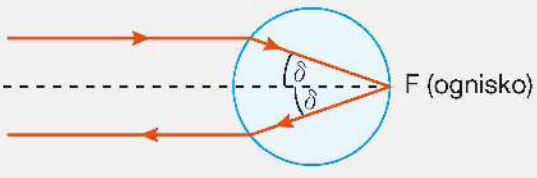
U podstaw działania materiałów odblaskowych leży zjawisko odbicia światła. W zależności od rodzaju powierzchni padające promieniowanie zostaje w różnym stopniu pochłonięte, przepuszczone i odbite od danego materiału. […]

Niektóre materiały charakteryzują się taką strukturą, że światło ulega odbiciu w kierunku bliskim do tego, z jakiego pada (nie tylko, gdy pada prostopadle) (rys. 1). To właśnie ten rodzaj odbicia, noszący nazwę odbicia współdrożnego, powrotnego albo odblaskowego (ang. *retroreflection*) stanowi podstawę działania materiałów odblaskowych. Przykładem odbicia tego typu występującym naturalnie jest świecenie oczu niektórych gatunków zwierząt prowadzących nocny tryb życia (np. kotów, sów). […]



Rys. 1. Odbicie światła od powierzchni odblaskowej

Efekt silnego odbicia współdrożnego można uzyskać na przykład za pomocą szklanej kulki o odpowiednio dużym współczynniku załamania światła. Rozważmy promień światła padający na powierzchnię kulki w pobliżu jej osi symetrii. Jeśli współczynnik załamania światła materiału, z którego wykonana jest kulka $n \approx 2$ (rys. 2), to wówczas wszystkie promienie zostaną zogniskowane w miejscu, gdzie oś symetrii przecina tylną ściankę kulki […].



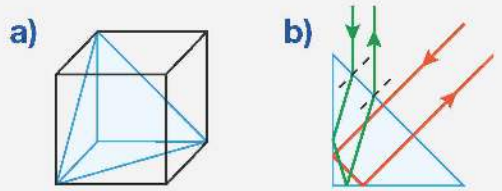
Rys. 2. Odbicie współdrożne w kulce szklanej o współczynniku załamania światła $n \approx 2$

Światło ulega następnie wewnętrznemu odbiciu od tylnej ścianki i po załamaniu na przedniej powierzchni kulki rozchodzi się w powietrzu równolegle do kierunku padającego promieniowania. Choć współczynnik załamania większości szkieł jest równy około 1,5, to poprzez domieszkowanie tlenkami metali (ołowiu, lantanu, bizmutu) można uzyskać szkła charakteryzujące się dużo wyższymi wartościami tego współczynnika ($n \geqslant 2$).

W praktyce wydajność odbicia współdrożnego na szklanych kulkach ma jednak pewne ograniczenia. Zaledwie około jednej trzeciej powierzchni kulki jest efektywnie wykorzystywane, a podczas odbicia od tylnej ścianki tylko część światła ulega wewnętrznemu odbiciu, a reszta zostaje załamana. Dlatego, żeby zwiększyć luminancję wiązki współdrożnej, tylne ścianki kulek pokrywa się metaliczną warstwą odbijającą. Jeśli umieścimy wiele takich małych odbijających kuleczek na dużej powierzchni, to uzyskamy prototyp warstwy odblaskowej wykorzystywanej m.in. do pokrywania znaków drogowych, fragmentów ubrań ochronnych i „srebrnych ekranów” w kinach. […]

Innym sposobem uzyskania efektu odbicia współdrożnego jest zastosowanie tzw. reflektora rogowego. Reflektor ten składa się z trzech wzajemnie prostopadłych powierzchni odbijających. Wyobraźmy sobie, że ucinamy róg szklanego sześcianu wzdłuż przekątnych trzech schodzących się w tym rogu ścian (rys. 3a) – otrzymamy w ten sposób pryzmat, którego trzy ściany będą trójkątami prostokątnymi, a podstawa – trójkątem

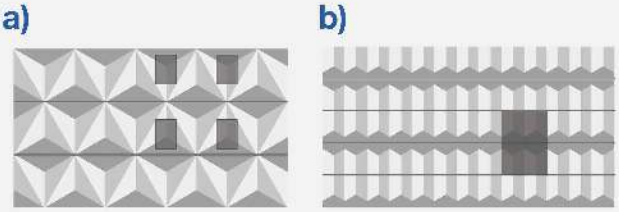
równobocznym. Jeśli oświetlimy pryzmat np. prostopadle do podstawy, to światło ulegnie całkowitemu wewnętrznemu odbiciu kolejno od każdej ze ścianek i wróci w kierunku równoległym do kierunku padania (rys. 3b).



Rys. 3. Reflektor rogowy (a), odbicie współdrożne w reflektorze rogowym (b)

Pryzmaty tego rodzaju używane są w miernictwie geodezyjnym, a metalowe rożki odbijające, działające na tej samej zasadzie, wykorzystywane są w radiolokacji.
Reflektor rogowy odbija skierowaną na niego wiązkę fal elektromagnetycznych (światła laserowego w przypadku mierników geodezyjnych lub fal radiowych w przypadku pomiarów radarowych), co dzięki znajomości prędkości tych fal pozwala na dokładne obliczenie odległości od reflektora. Zestawy reflektorów rogowych zostały również umieszczone na powierzchni Księżyca [...]. Umożliwiły one bardzo dokładne pomiary orbity Księżyca. [...]

Efektywność odbicia współdrożnego reflektora rogowego zależy od kąta padania wiązki światła i jest stosunkowo wysoka, dopóki kąt padania nie przekracza około 10°. Straty zachodzą też w przypadku, gdy wiązka światła pada w pobliżu narożników pryzmatu. Szacuje się, że w ten sposób tracone jest około 35% padającego promieniowania. Sposobem obejścia tego problemu jest... wyeliminowanie tych obszarów. Najnowocześniejsze pryzmatyczne folie odblaskowe zbudowane są więc nie z pryzmatów, ale wyłącznie z ich najwydajniej odbijających fragmentów, co pozwala zminimalizować straty przy odbiciu (rys. 4b).



Rys. 4. Schemat budowy pryzmatycznych folii odblaskowych: (a) standardowa folia mikropryzmatyczna z zaznaczonymi czterema obszarami o maksymalnym odbiciu współdrożnym, (b) 3M Diamond Grade Cubed (DG3)

Folie odblaskowe wyposaża się czasem dodatkowo w warstwę materiału fluorescencyjnego, która poprawia widoczność w trudnych warunkach atmosferycznych. [...]

Powyższe przykłady sugerują, że współczesne zastosowania materiałów odblaskowych w technice i nauce są więc bardzo szerokie: od produkcji powłok znaków drogowych i ekranów kinowych, poprzez badania orbity Księżyca, precyzyjne pomiary interferometryczne, aż po nowoczesne metody komunikacji. Z pewnością ich kariera na tym się nie skończy.

Katarzyna Cieślar „Foton" 2009, nr 107, s. 23–31, cały artykuł dostępny na stronie „Fotonu" (kod QR i adres na s. 309)

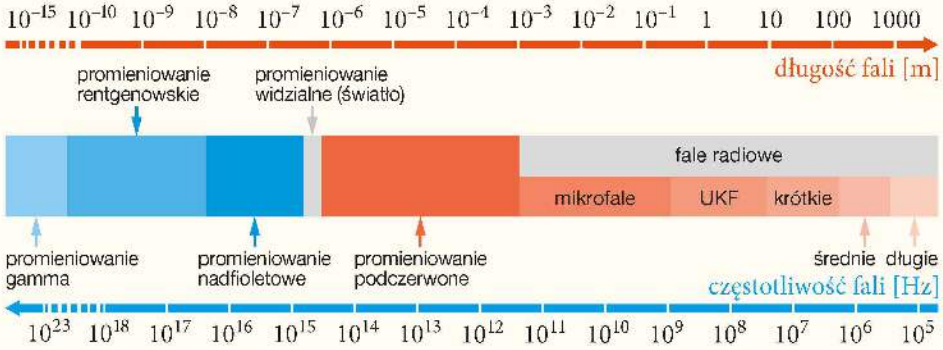
Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Czym jest odbicie współdrożne?
2. W jaki sposób można zwiększyć współczynnik załamania szkła?
3. Od czego zależy i w jaki sposób można zwiększyć wydajność odbicia współdrożnego reflektora rogowego?

Podsumowanie Fale elektromagnetyczne i optyka

- **Widmo** fal elektromagnetycznych



- **Wytwarzanie** fal elektromagnetycznych

Fale radiowe	Promieniowanie podczerwone	Światło widzialne	Promieniowanie nadfioletowe	Promieniowanie rentgenowskie	Promieniowanie gamma
układ elektroniczny, magnetron (mikrofale)	Słońce, żarówka, diody LED	Słońce, żarówka, diody LED	diody LED, lampa kwarcowa, Słońce	lampa rentgenowska	przemiany jąder atomowych, zderzenia cząstek elementarnych
promieniowanie cieplne (termiczne)					

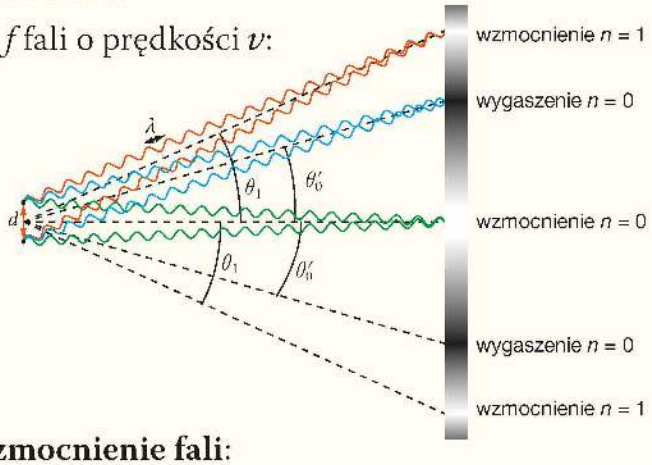
- **Fala elektromagnetyczna** (promieniowanie elektromagnetyczne) to rozchodzące się w przestrzeni okresowe zmiany zależnych od siebie pól: elektrycznego i magnetycznego.
  - W próżni wszystkie fale elektromagnetyczne rozchodzą się z prędkością $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, będącą największą możliwą prędkością w przyrodzie. W innych ośrodkach poruszają się wolniej, a ich prędkość jest wówczas zależna od częstotliwości.
  - Związek między długością λ i częstotliwością f fali o prędkości v:

$$v = \lambda f$$

- **Natężenie fali** I:

$$I = \frac{E}{St}$$

gdzie: E – energia padającej fali, S – pole powierzchni, na jaką pada fala w czasie t.



- **Interferencja** fal to superpozycja fal spójnych pochodzących z różnych źródeł.
  - Miejsca, w których następuje maksymalne **wzmocnienie fali**:

$$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{d}$$

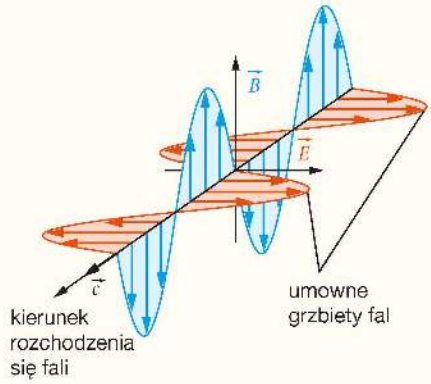
gdzie: $n = 0, 1, 2, \ldots$ – numer prążka, λ – długość fali, d – odległość między szczelinami (stała siatki dyfrakcyjnej), θ_n – kąt, pod jakim ugina się promień fali.

  - Miejsca, w których następuje całkowite **wygaszenie fali**:

$$\sin \theta_n' = \left(n + \tfrac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d}$$

- **Dyfrakcja** to ugięcie fali, czyli zmiana jej kierunku w wyniku napotkania przeszkody (np. szczeliny, ostrej krawędzi).
  - Układ bardzo wielu równoległych szczelin i przesłon na przemian przepuszczających i pochłaniających światło nazywamy **siatką dyfrakcyjną**. W siatce dyfrakcyjnej odległość między środkami sąsiednich szczelin jest taka sama i nazywa się **stałą siatki**. Obraz interferencyjny składa się z takich samym maksimów i minimów jak w przypadku dwóch szczelin i można go opisać tym samym wzorem.

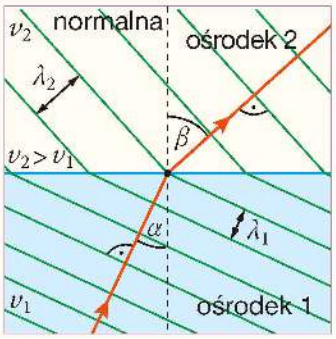
- Fala elektromagnetyczna jest **falą poprzeczną**. Przyjmuje się, że grzbiet fali to miejsce, gdzie wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ osiąga maksymalną wartość.



- **Prawo Snelliusa** (prawo załamania):

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = \text{const}$$

gdzie: α – kąt padania, β – kąt załamania (mierzony względem linii normalnej, czyli prostopadłej do granicy ośrodków), v_1, v_2 – prędkość fali odpowiednio w pierwszym i drugim ośrodku, n_1, n_2 – współczynnik załamania światła odpowiednio w pierwszym i drugim ośrodku. Kąt padania, kąt załamania i normalna leżą w jednej płaszczyźnie.

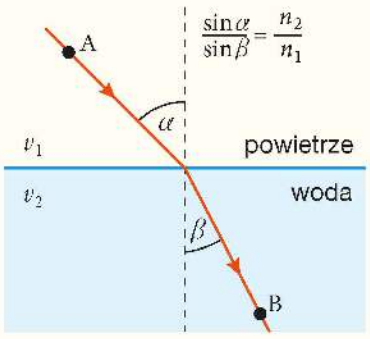


- **Współczynnik załamania** n światła w ośrodku, w którym rozchodzi się ono z prędkością v, określa, ile razy wolniej rozchodzi się światło w tym ośrodku niż w próżni:

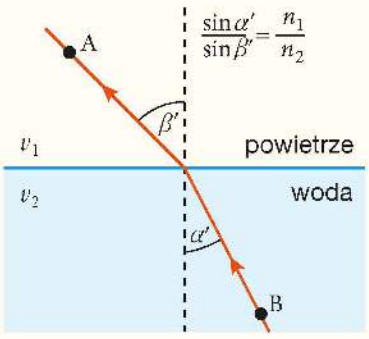
$$n = \frac{c}{v}$$

  - Jeśli światło biegnie po określonej drodze z punktu A do B, to światło wysłane z punktu B może biec po tej samej drodze do punktu A.

a)



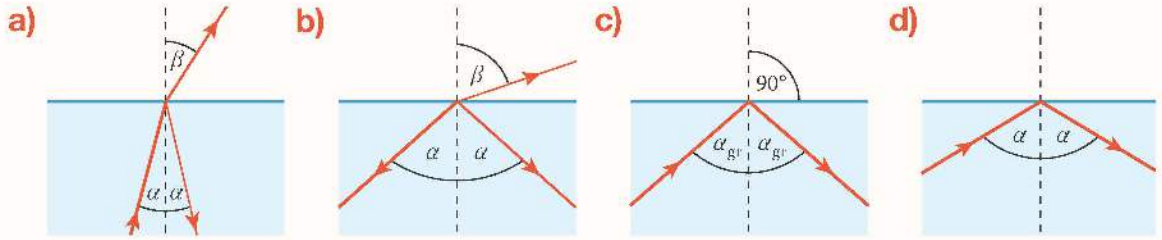
b)



- Na granicy dwóch ośrodków dochodzi zarówno do załamania, jak i do odbicia światła (rys. a i b na górze następnej strony). Jeśli światło pada od strony ośrodka, w którym rozchodzi się wolniej, to przy pewnym kącie padania, zwanym **kątem granicznym** α_{gr}, cała padająca fala odbija się od powierzchni (rys. c), tak samo jak dla kąta większego od kąta granicznego (rys. d). Dla $\alpha \geqslant \alpha_{gr}$ zachodzi **całkowite wewnętrzne odbicie**.

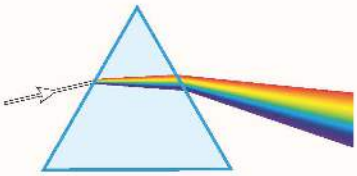
  Kąt graniczny dla światła padającego z ośrodka 1 na granicę z ośrodkiem 2:

$$\sin\alpha_{gr} = \frac{n_2}{n_1}$$



Bieg światła przez pryzmat

Rozszczepienie światła w pryzmacie wynika z faktu, że prędkość światła w szkle zależy od długości fali.

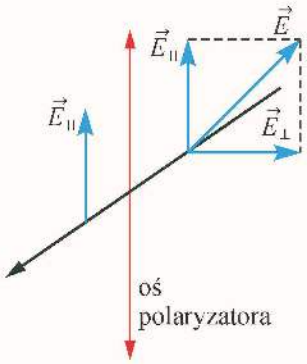


Polaryzacja światła

- Jeśli w fali elektromagnetycznej pole elektryczne (a zatem także magnetyczne) drga tylko w jednym określonym kierunku, to fala jest **spolaryzowana**.

a) światło niespolaryzowane **b)** światło spolaryzowane w kierunku pionowym



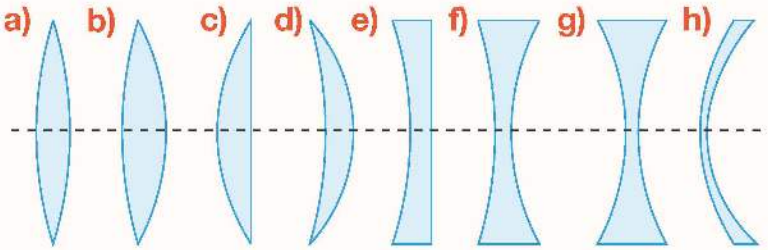


- **Polaryzator** przepuszcza tylko jedną składową wektora $\vec{E}$.
- Światło odbite jest spolaryzowane (zwykle tylko częściowo) w kierunku równoległym do płaszczyzny odbijającej światło.

Soczewka

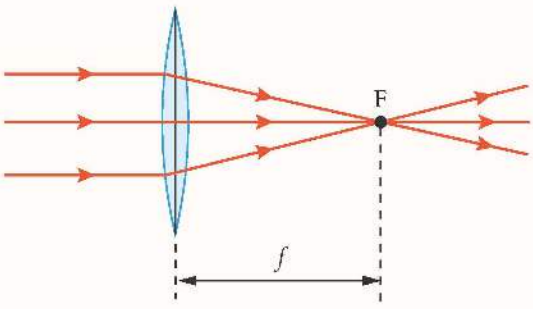
Soczewka działa dzięki dwukrotnemu załamaniu światła: promień załamuje się zarówno przy przechodzeniu z otoczenia do soczewki, jak i przy przechodzeniu z soczewki do otoczenia.

Soczewki skupiające: rys. a–d,
soczewki rozpraszające: rys. e–h.

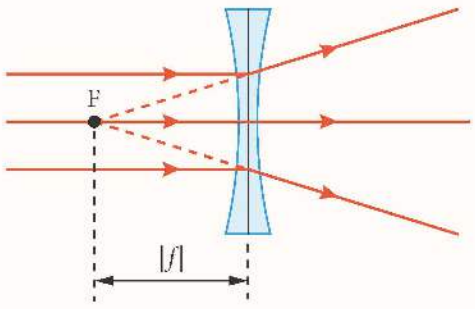


- Przejście równoległej wiązki światła przez soczewkę.

soczewka skupiająca



soczewka rozpraszająca



F – ognisko, f – ogniskowa

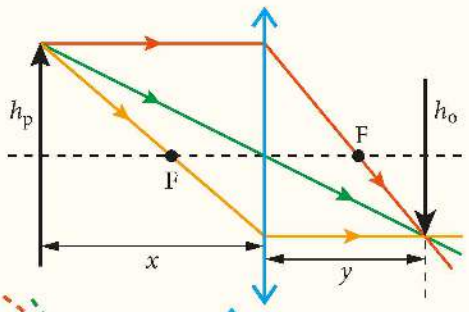
■ **Równanie soczewki:**

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{x}+\frac{1}{y}$$

gdzie: f – ogniskowa, x – odległość przedmiotu od soczewki, y – odległość obrazu od soczewki.

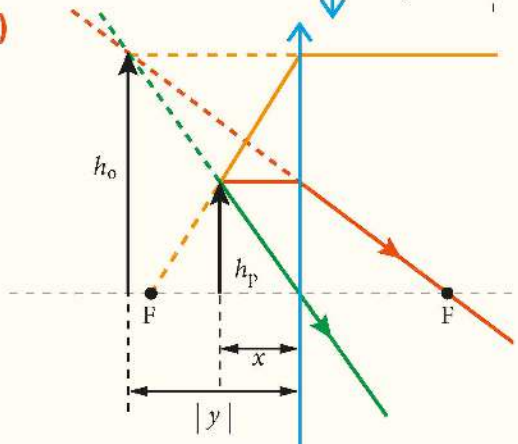
■ **Konstrukcja obrazu** dla: soczewki skupiającej (rys. a i b), soczewki rozpraszającej (rys. c).

a)



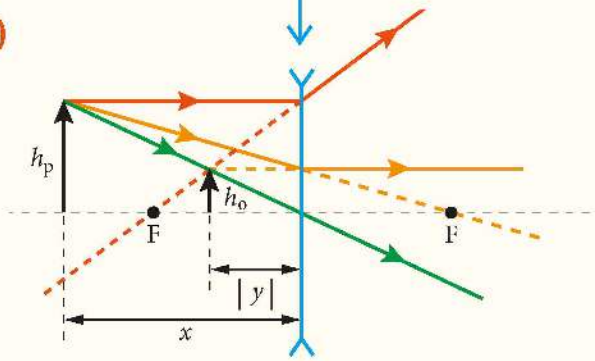
1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę przechodzi przez ognisko.
2. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku.
3. Promień przechodzący przez ognisko po przejściu przez soczewkę jest równoległy do osi optycznej.

b)



1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę przechodzi przez ognisko.
2. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku.
3. Promień, którego przedłużenie wychodzi z ogniska, po przejściu przez soczewkę biegnie równolegle do osi optycznej.

c)



1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę biegnie tak, że jego przedłużenie przechodzi przez ognisko pozorne.
2. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku (a więc pokrywa się ze swoim przedłużeniem).
3. Promień biegnący w stronę ogniska (po przeciwnej stronie soczewki) po przejściu przez soczewkę jest równoległy do osi optycznej.

■ **Obrazy w soczewkach** w zależności od położenia przedmiotu

▸ **Soczewka skupiająca**

$0 < x < f$	pozorny, prosty, powiększony
$x = f$	obraz nie powstaje
$f < x < 2f$	rzeczywisty, odwrócony, powiększony
$x = 2f$	rzeczywisty, odwrócony, rzeczywistych rozmiarów
$x > 2f$	rzeczywisty, odwrócony, pomniejszony

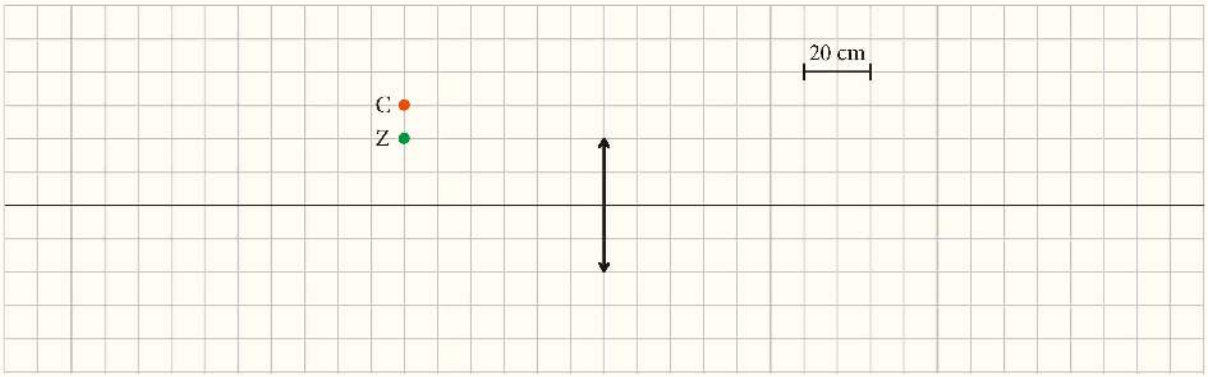
▸ **Soczewka rozpraszająca:**

dla dowolnego x obraz jest pozorny, prosty, pomniejszony.

Sposób na zadanie

Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. Dwa punktowe źródła światła, czerwone C i zielone Z, znajdują się w odległości 60 cm od płasko-wypukłej soczewki skupiającej o zdolności skupiającej 5 D, tak jak przedstawiono na rysunku.



Zadanie 1.1 (0–1)

Wybierz właściwe dokończenie zdania A lub B oraz jego uzasadnienie spośród 1–3.

Soczewka tworzy obraz punktu C, który jest obrazem:

A.	pozornym,	ponieważ punkt C znajduje się	1.	dalej od płaszczyzny soczewki niż jej ognisko.
B.	rzeczywistym,		2.	bliżej płaszczyzny soczewki niż jej ognisko.
			3.	po płaskiej stronie soczewki.

Zadanie 1.2 (0–2)

Skonstruuj obrazy obu źródeł światła tworzone przez soczewkę.

Rozwiązanie:

Ad 1.1

Poprawne uzupełnienie zdania to **B** i **1**.

Obraz tworzony przez soczewkę wypukłą może być zarówno rzeczywisty (gdy przedmiot znajduje się dalej niż ognisko), jak i pozorny (gdy przedmiot jest bliżej niż ognisko). Aby stwierdzić, który z tych przypadków zachodzi, najpierw musimy obliczyć ogniskową. Podana jest zdolność skupiająca $Z = 5$ D, a ogniskowa równa jest jej odwrotności:

$$f = \frac{1}{Z} = \frac{1}{5}\,\text{m} = 20\,\text{cm}$$

Ogniska soczewki są położone w odległości 20 cm od soczewki, więc każdy z przedmiotów (źródeł światła) znajduje się dalej niż ognisko, czyli tworzy obraz rzeczywisty.

Ad 1.2

Ogniskową obliczyliśmy już w zadaniu 1.1. Każde z ognisk znajduje się więc w odległości 20 cm od środka soczewki. Zaznaczamy je na rysunku.

Wskazówka 1. Informacja, że soczewka jest płasko-wypukła, nie ma żadnego znaczenia, kiedy konstruujemy obraz. Ważne jest tylko to, że soczewka jest skupiająca.

Rysujemy promienie światła:

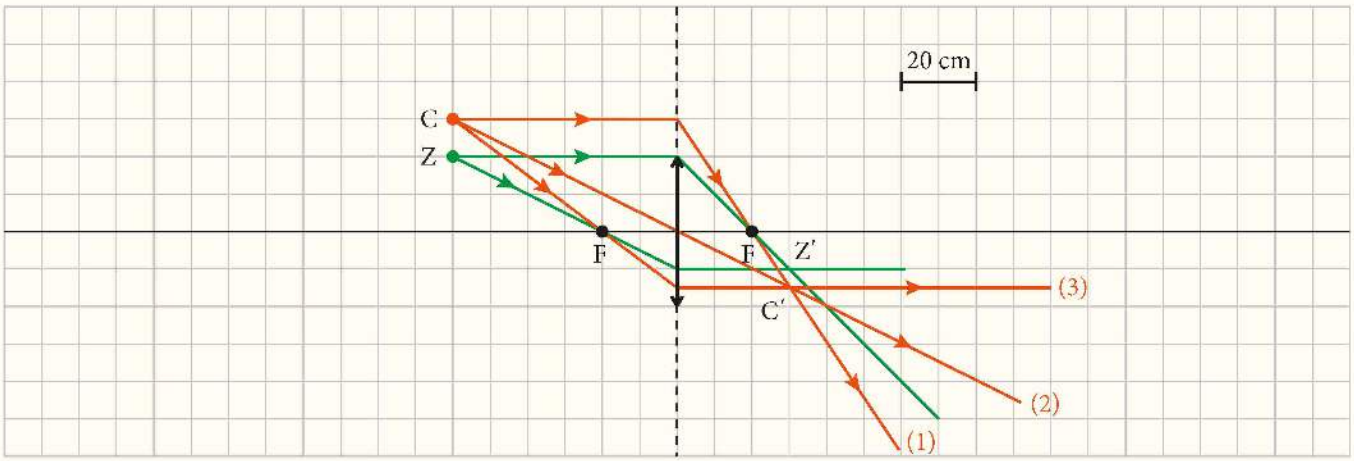
- promień (1) – biegnie z punktu C do płaszczyzny soczewki równolegle do osi optycznej, a stamtąd przez ognisko F,
- promień (2) – biegnie z punkt C przez środek soczewki – ten promień nie ulega załamaniu,
- promień (3) – biegnie z punktu C przez ognisko F, dalej do soczewki, a po załamaniu równolegle do osi optycznej.

Wskazówka 2. Aby skonstruować punkt C′, wystarczą dwa z wymienionych promieni. Warto jednak prześledzić bieg trzeciego, aby się upewnić, że konstrukcja jest poprawna.

Punkt przecięcia tych promieni to obraz punktu C, oznaczony C′.

Analogicznie postępujemy z punktem Z.

Wskazówka 3. W rzeczywistości promień (1) biegnący poza soczewką nie załamuje się i nie ma wpływu na powstawanie obrazu. Można go jednak uwzględnić w konstrukcji – mała i duża soczewka o tej samej ogniskowej tworzą taki sam obraz.

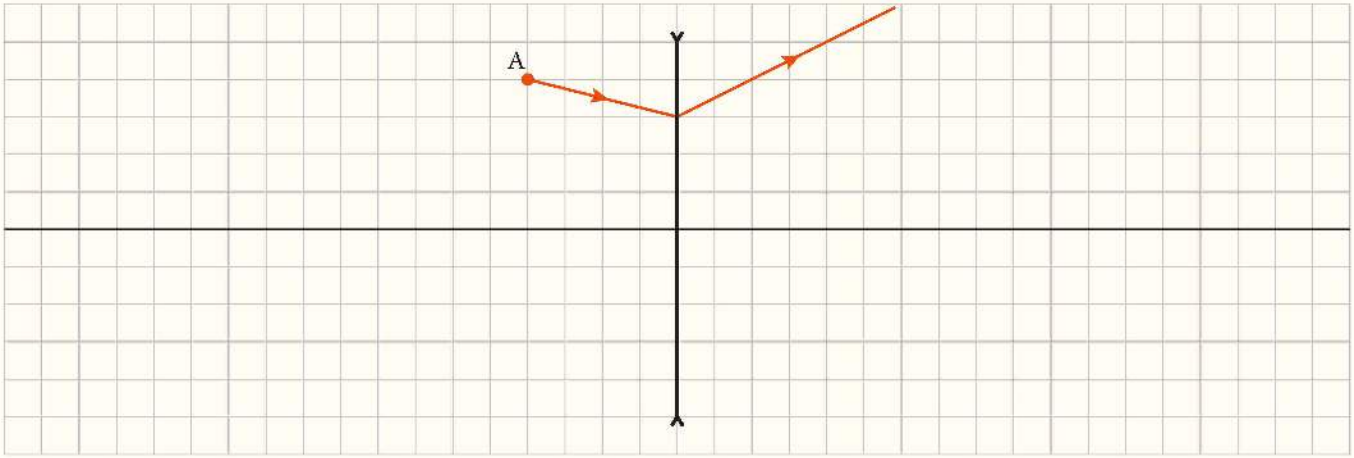


Warto zapamiętać!

- Oba ogniska soczewki są położone w tej samej odległości od jej środka. Jest tak nawet wtedy, gdy soczewka nie ma symetrycznego kształtu, np. jest płasko-wypukła.
- Obraz tworzony przez soczewkę zależy od odległości przedmiotu od soczewki.
- Podczas konstrukcji obrazu tworzonego przez soczewkę skupiającą najwygodniej posłużyć się dwoma spośród trzech promieni światła:
  - przechodzącym przez ognisko, a po załamaniu w soczewce biegnącym równolegle do osi optycznej,
  - biegnącym równolegle do osi optycznej, a po załamaniu w soczewce przechodzącym przez ognisko,
  - przechodzącym przez środek soczewki, niezmieniającym kierunku.

Zadanie 2. (0–2)

Rysunek przedstawia soczewkę rozpraszającą oraz jeden z promieni światła, biegnący z punktu A i załamujący się w soczewce. Wyznacz zdolność skupiającą soczewki.
Skala na rysunku: 1 kratka – 5 cm.

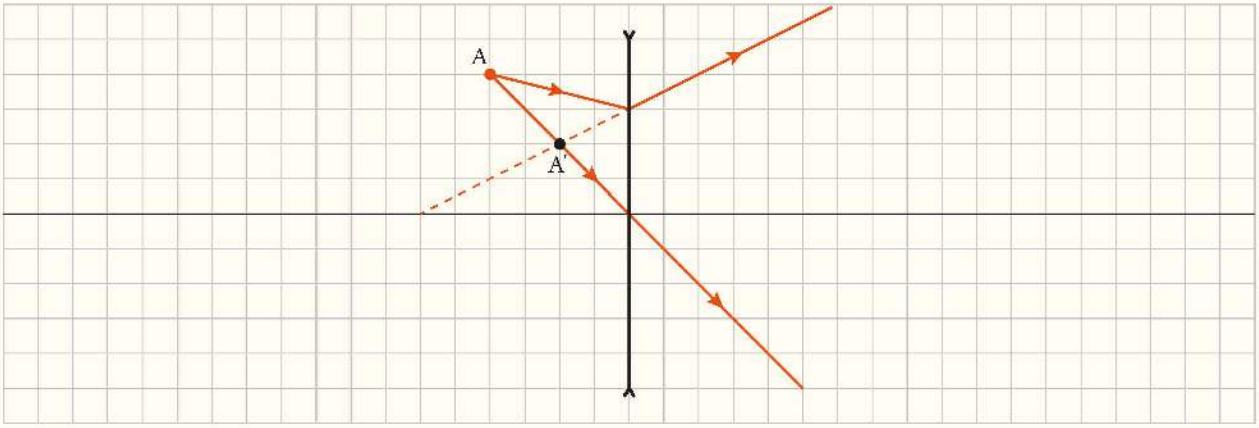


Rozwiązanie:

Soczewka rozpraszająca zawsze tworzy obraz pozorny. Obraz ten tworzy się na przecięciu przedłużeń wszystkich promieni załamanych w soczewce (czyli tam, skąd pozornie zdaje się biec światło).

> **Wskazówka 4.** Przy konstrukcjach używamy trzech charakterystycznych promieni światła, ale pamiętamy, że wszystkich promieni biegnących od danego punktu przedmiotu do soczewki jest nieskończenie wiele. W zadaniu mogą występować inne promienie niż te trzy znane z konstrukcji.

Dorysujmy przedłużenie promienia załamanego w soczewce (przerywana linia). Oprócz tego potrzebny będzie nam jeszcze jeden promień. Nie znamy ogniska soczewki, ale możemy narysować promień biegnący przez środek soczewki (nie zmienia on kierunku, więc jego część od strony przedmiotu jest jednocześnie przedłużeniem części po załamaniu).



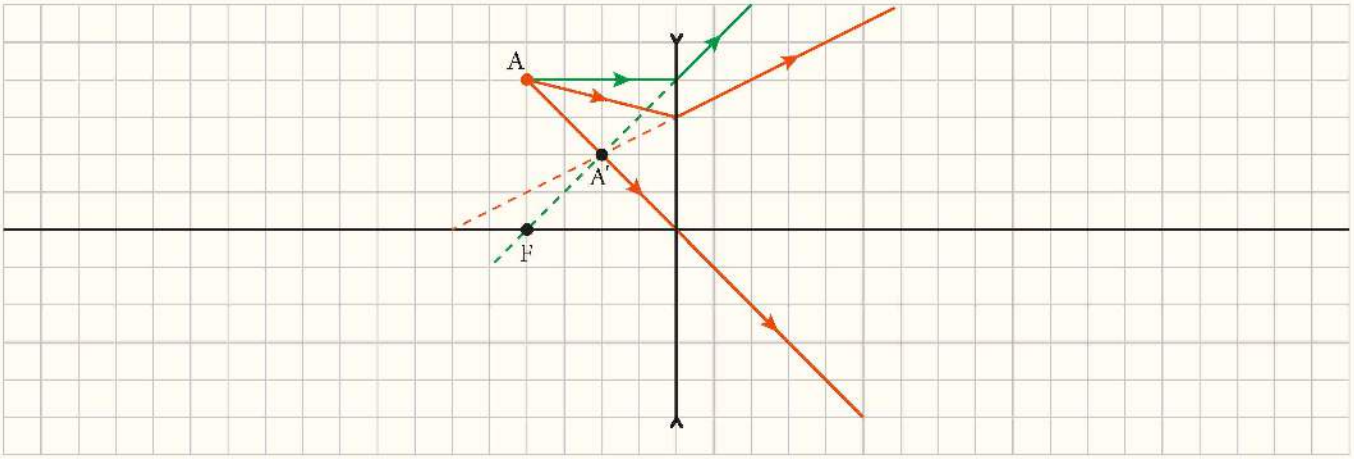
Znamy więc już obraz A′ punktu A.
Skoro wiemy, gdzie leży obraz A′ punktu A, to umiemy narysować przedłużenie dowolnego promienia wychodzącego z punkt A i załamanego w soczewce. Tym samym umiemy narysować taki promień.

Narysujmy więc promień biegnący z punktu A równolegle do osi optycznej (zielona linia). Po załamaniu promień musi biec tak, aby jego przedłużenie przechodziło przez punkt A′.
Jednak przedłużenie tego promienia przechodzi także przez ognisko pozorne soczewki – jest nim punkt F. Z rysunku możemy odczytać (znamy skalę), że ogniskowa:

$$f = -20\,\text{cm} = -\frac{1}{5}\,\text{m}$$

(ogniskowa soczewki rozpraszającej jest ujemna), a więc zdolność skupiająca wynosi:

$$Z = \frac{1}{f} = -5\,\text{D}$$



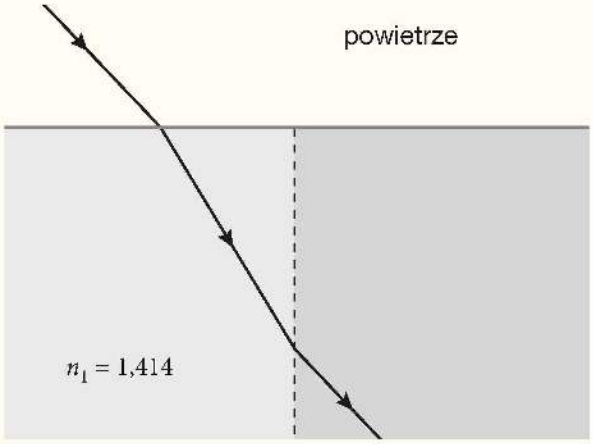
Uwaga. Gdy znajdziemy na rysunku punkt A′, możemy także obliczyć ogniskową z równania soczewki.

Odpowiedź: Zdolność skupiająca soczewki wynosi –5 D.

Warto zapamiętać!

- Aby skonstruować obraz, korzystamy z charakterystycznych promieni.
- Jeżeli obraz jest rzeczywisty, to każdy promień wychodzący z danego punktu przedmiotu i dochodzący do soczewki po załamaniu przechodzi przez obraz punktu.
- Jeżeli obraz jest pozorny, to przedłużenie załamanego promienia przechodzi przez obraz punktu.

Zadanie 3. Światło biegnie w powietrzu i pada pod kątem 45° na powierzchnię bloku szkła o współczynniku załamania wynoszącym 1,414 (patrz rys.).



Zadanie 3.1 (0–3)

Ustal, jaki współczynnik załamania powinien mieć drugi blok szkła (z prawej strony rysunku), aby światło biegło w nim w takim samym kierunku, w jakim biegnie w powietrzu.

Zadanie 3.2 (0–3)

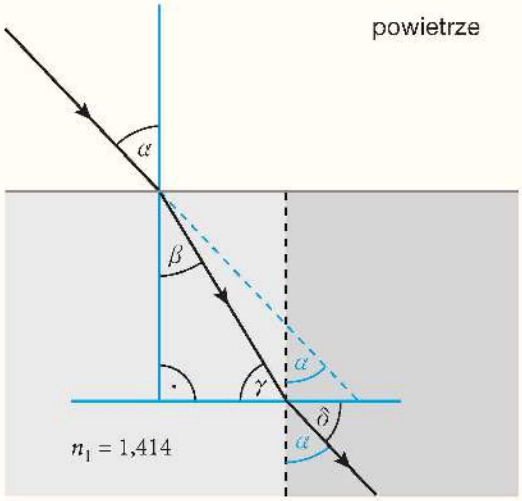
Załóżmy, że dwa szklane bloki mają współczynniki załamania $n_1 = 1{,}414$ i $n_2 = 1{,}601$. Oblicz kąt graniczny dla światła biegnącego w drugim bloku i padającego na powierzchnię graniczną między blokami. Wynik podaj z dokładnością do 1°.

Rozwiązanie:

Ad 3.1

Uzupełnijmy rysunek tak, aby pojawiły się na nim kąty padania i załamania.

Wskazówka 5. Zawsze umieszczaj jak najwięcej danych na rysunku. Uważaj tylko, aby go nie zamazać.



Kąt padania $\alpha = 45°$ jest dany. Obliczmy więc kąt załamania β. Korzystamy z prawa załamania:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_1 \rightarrow \sin\beta = \frac{\sin\alpha}{n_1}$$

czyli:

$$\sin\beta = \frac{\sin 45°}{1{,}414} \approx \frac{0{,}707}{1{,}414} = 0{,}5$$

Stąd:

$$\beta = 30°$$

Wskazówka 6. Wartości funkcji trygonometrycznych znajdujemy za pomocą kalkulatora naukowego albo w tablicach. Niektóre z nich być może pamiętasz (np. $\sin 45° = \frac{\sqrt{2}}{2}$).

Skorzystajmy jeszcze raz z prawa załamania, tym razem dla przejścia pomiędzy dwoma blokami szkła:

$$\frac{\sin\gamma}{\sin\delta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Z rysunku widzimy, że $\gamma = 90° - \beta$, ponieważ są to dwa kąty ostre w trójkącie prostokątnym. Ponadto, aby promień załamany w drugim bloku szkła biegł równolegle do promienia w powietrzu, $\delta = 90° - \alpha$ (zwróć uwagę na przerywaną linię równoległą do promienia w drugim bloku – przedłużenie promienia padającego). Stąd:

$$\frac{\sin(90° - \beta)}{\sin(90° - \alpha)} = \frac{n_2}{n_1}$$

czyli:

$$n_2 = \frac{\sin(90° - \beta)}{\sin(90° - \alpha)} n_1 = \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} n_1 = \frac{\cos 30°}{\cos 45°} n_1 \approx 1{,}732$$

Odpowiedź: Drugi blok szkła musi mieć współczynnik załamania wynoszący ok. 1,732.

Ad 3.2

Kąt graniczny to taki kąt padania światła na granicę ośrodków, dla którego kąt załamania byłby kątem prostym. Prawo załamania ma więc postać:

$$\frac{\sin\alpha_{gr}}{\sin 90°} = \frac{n_1}{n_2}$$

a ponieważ $\sin 90° = 1$, otrzymujemy równość:

$$\sin\alpha_{gr} = \frac{n_1}{n_2}$$

Po podstawieniu danych liczbowych mamy:

$$\sin\alpha_{gr} \approx 0{,}883$$

stąd $\alpha_{gr} \approx 62°$.

Odpowiedź: Kąt graniczny dla światła padającego na granicę bloków wynosi ok. 62°.

Warto zapamiętać!

- Prawo załamania światła ma postać:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

gdzie kąt α jest kątem padania, kąt β kątem załamania, a n_1 i n_2 to współczynniki załamania w obu ośrodkach.

- Dla próżni i w bardzo dobrym przybliżeniu dla powietrza współczynnik załamania $n = 1$.

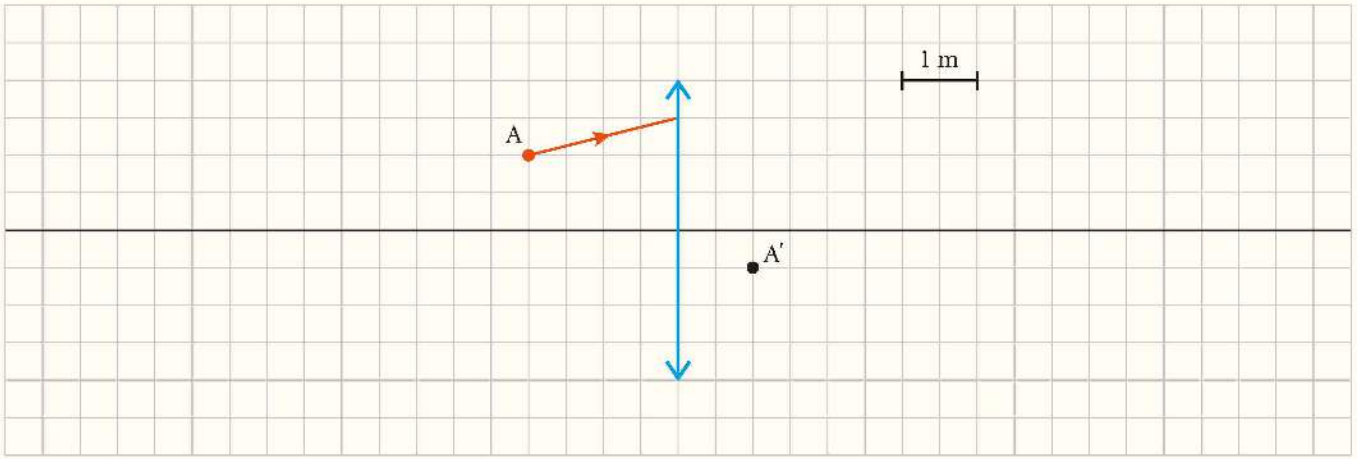
Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

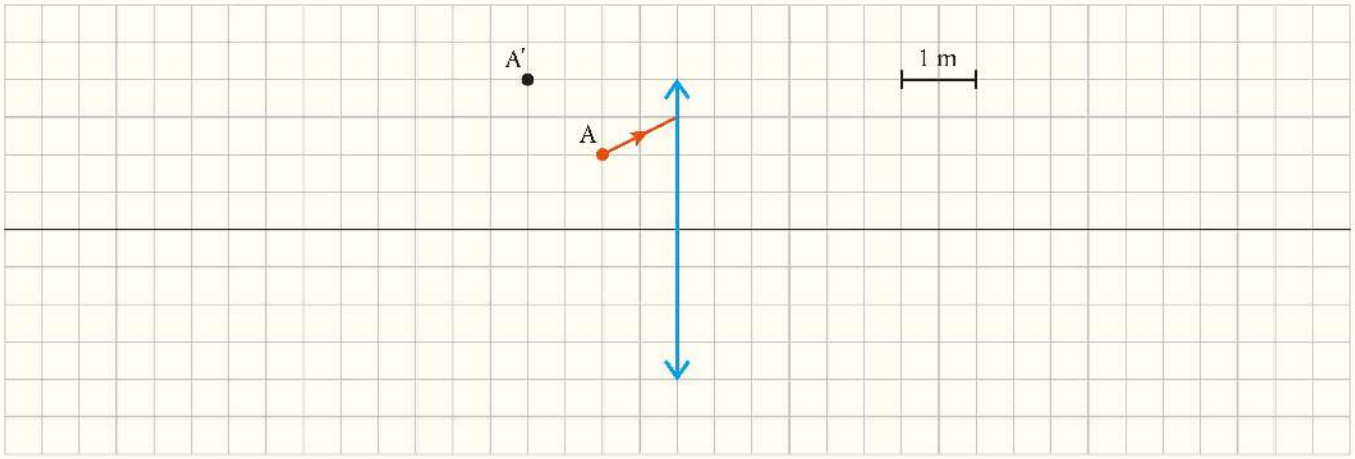
Zadanie 1. Obrazy w soczewce skupiającej

Na rysunkach I i II przedstawiono soczewkę skupiającą i tworzony przez nią obraz A′ punktu A.

I.



II.



Osobno dla każdego przypadku I i II wykonaj polecenia:

1.1. Wyznacz ogniskową soczewki dwoma sposobami: graficznie i rachunkowo. Porównaj wyniki.

1.2. Narysuj bieg zaznaczonego promienia światła po załamaniu w soczewce.

1.3. Określ, czy obraz utworzony przez soczewkę jest pozorny czy rzeczywisty.

Zadanie 2. Wyznaczanie odległości od soczewki

Soczewka o ogniskowej $f = 20$ cm tworzy obraz rzeczywisty pewnego przedmiotu w odległości o 45 cm większej niż odległość przedmiotu od soczewki. Oblicz odległość obrazu od soczewki.

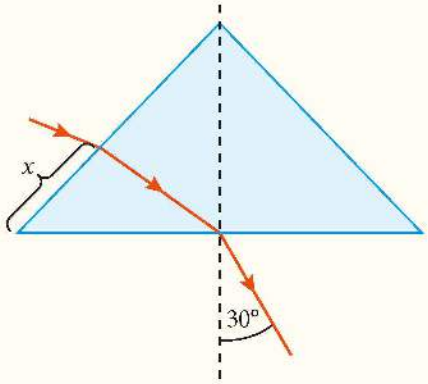
Zadanie 3. Siatka dyfrakcyjna

Siatka dyfrakcyjna ma 100 rys na 1 mm. Skierowano na nią z lasera wiązkę światła o długości fali $\lambda = 700$ nm. W odległości 50 cm za siatką znajduje się ekran w kształcie koła o promieniu 15 cm. Środkowy (zerowy) prążek interferencyjny jest widoczny na środku ekranu. Ile prążków zmieści się na ekranie (zakładamy, że są wystarczająco jasne)?

Zadanie 4. Pryzmat

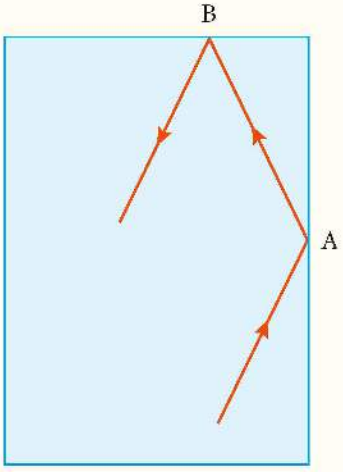
Pryzmat ma kształt graniastosłupa, którego podstawa jest trójkątem prostokątnym równoramiennym o przyprostokątnej $a = 10$ cm. Został wykonany ze szkła o współczynniku załamania $n_s = 1{,}5$. Promień światła pada w płaszczyźnie równoległej do podstawy na jedną z krótszych ścian. Po załamaniu pada od wewnętrznej strony na dłuższą ścianę w połowie jej długości i załamuje się pod kątem $\beta = 30°$ (patrz rysunek).

Oblicz odległość x punktu, w którym promień padał na pryzmat, od wskazanego wierzchołka pryzmatu (patrz rysunek).



Zadanie 5*. Całkowite wewnętrzne odbicie

W prostopadłościennym akwarium wykonanym ze szkła o współczynniku załamania n_s znajduje się ciecz o współczynniku załamania n_c. Rysunek przedstawia promień światła (biegnący w płaszczyźnie rysunku), który ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu zarówno w punkcie A, jak i w punkcie B.



Udowodnij, że jeśli taka sytuacja zachodzi, to współczynniki załamania spełniają zależność:

$$n_s < \frac{\sqrt{2}}{2} n_c$$

Zadanie 6. Natężenie światła

Dwa polaryzatory ustawiono równolegle. O ile stopni należy obrócić jeden z nich, aby natężenie światła przechodzącego przez oba polaryzatory zmniejszyło się pięciokrotnie?



17 Fizyka atomowa i kwanty promieniowania elektromagnetycznego

1. Promieniowanie termiczne
2. Efekt cieplarniany
3. Zjawisko fotoelektryczne
4. Foton jako cząstka
5. Falowa natura materii
6. Widma emisyjne i absorpcyjne gazu
7. Model atomu Bohra – temat dodatkowy
8. Otrzymywanie promieni Röntgena

17.1. Promieniowanie termiczne

Przypomnij sobie

- Jednym ze sposobów przekazywania energii w postaci ciepła jest promieniowanie cieplne (termiczne).
- Energia w postaci ciepła jest przekazywana samorzutnie z ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze.

Fizyka klasyczna i fizyka XX w.



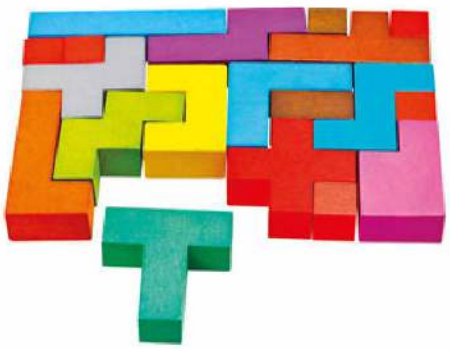
Rys. 17.1. James Clerk Maxwell (czyt. dżejms klerk maksfel) – szkocki fizyk i matematyk, doprowadził m.in. do unifikacji oddziaływań elektrycznych i magnetycznych

Na przełomie XIX i XX w. panowało ogólne przekonanie, że prawa fizyki i procesy zachodzące w przyrodzie są dobrze poznane i nie ma już zbyt wiele do odkrycia. Znajomość praw mechaniki pozwalała zarówno na konstrukcję maszyn, jak i na przewidywanie zjawisk astronomicznych.

Dzięki równaniom Maxwella (rys. 17.1) opisano zjawiska elektryczne, magnetyczne i optyczne w ramach jednej teorii, a do tego odkryto fale radiowe.

Co prawda prowadzono jeszcze badania nad kilkoma niewyjaśnionymi zjawiskami, ale uważano je za zagadnienia szczegółowe, które zostaną wkrótce wyjaśnione na gruncie znanych już praw podstawowych.

Okazało się jednak, że właśnie te szczegóły doprowadziły do całkowitej zmiany naszego myślenia o naturze świata. Można to porównać do łamigłówki, w której udało się już ułożyć prawie wszystkie elementy, ale ten ostatni, niepasujący, powoduje, że całą zabawę musimy zacząć od początku (rys. 17.2).



Rys. 17.2. Skoro ostatni element nie pasuje, to znaczy, że trzeba przestawić także pozostałe

Do fizyki klasycznej zalicza się m.in. zasady dynamiki sformułowane przez Izaaka Newtona.

Dziś fizykę znaną do końca XIX w. nazywamy **fizyką klasyczną**. Poznałeś jej najważniejsze prawa, choć najczęściej w wersji uproszczonej od strony matematycznej.

W dalszej części podręcznika zajmiemy się zjawiskami, które pozwoliły odkryć ograniczenia fizyki klasycznej. Omówimy też w skrócie podstawy nowych teorii fizycznych, które ją uzupełniły: **mechaniki kwantowej i teorii względności**.

Trzeba jednak od razu podkreślić, że fizyka klasyczna wystarcza do opisu znacznej części otaczających nas zjawisk. Jak zobaczysz, w tych przypadkach przewidywania nowych teorii są praktycznie takie same jak w fizyce klasycznej, więc ich stosowanie jest niepotrzebną komplikacją.
Są jednak takie zjawiska, których bez nowych teorii wyjaśnić się nie da. Gdyby nie fizyka XX w., nie mielibyśmy dziś wielu wynalazków, bez których trudno nam sobie wyobrazić współczesny świat, zwłaszcza urządzeń elektronicznych (rys. 17.3).



Rys. 17.3. Trudno dziś sobie wyobrazić świat bez laptopa czy telefonu

Promieniowanie termiczne

Jednym ze zjawisk, których precyzyjne wyjaśnienie okazało się niemożliwe na gruncie fizyki klasycznej, było promieniowanie termiczne (cieplne). Przypomnimy teraz i poszerzymy wiadomości na jego temat.
Wiesz już, że każde ciało emituje promieniowanie termiczne (cieplne) zależne od swojej temperatury. Nazwa *promieniowanie termiczne* nie oznacza jakiegoś szczególnego rodzaju promieniowania, ale określa sposób, w jaki ono powstaje.

Formy przepływu ciepła, cz. II s. 44

> Promieniowanie termiczne to fale elektromagnetyczne emitowane przez ciało na skutek ruchów termicznych jego cząsteczek.

To promieniowanie jest jedynym sposobem przekazywania ciepła przez próżnię, na przykład ze Słońca na Ziemię. Jest istotne także w innych sytuacjach.
Na przykład, gdy zbliżamy rękę do rozgrzanego żelazka (rys. 17.4), mamy wrażenie ciepła właśnie dlatego, że energia dociera do dłoni w postaci promieniowania. Pozostałe dwa sposoby przekazywania ciepła mają w tym zjawisku niewielkie znaczenie: przewodnictwo cieplne powietrza jest małe, a konwekcja powoduje ruch rozgrzanego powietrza w górę.



Rys. 17.4. Z żelazka do dłoni energia dociera przede wszystkim przez promieniowanie

Promieniowanie termiczne a druga zasada termodynamiki

Trzeba podkreślić, że promieniowanie termiczne jest wysyłane przez każde ciało, także takie o niskiej temperaturze. Blok lodu o temperaturze –10°C także wysyła promieniowanie cieplne w stronę zbliżonej do niego dłoni (rys. 17.5a na następnej stronie).

Druga zasada termodynamiki, cz. II s. 129

Czy nie jest to niezgodne z drugą zasadą termodynamiki? Przecież właśnie stwierdziliśmy, że ciepło jest przekazywane w postaci promieniowania od lodu o temperaturze –10°C do dłoni o temperaturze +36°C. Jak się okazuje, nie ma w tym sprzeczności, ponieważ nie uwzględniliśmy wszystkich zjawisk. Musimy wziąć pod uwagę zarówno promieniowanie wysyłane przez lód w stronę dłoni, jak i przez dłoń w stronę lodu (rys. 17.5b).



Rys. **17.5.** Wymiana ciepła przez promieniowanie między lodem a dłonią: a) schemat niepełny, b) schemat uwzględniający promieniowanie obu ciał

Dłoń emituje w tym samym czasie więcej energii w stronę lodu niż lód w stronę dłoni, czyli wypadkowy przekaz energii następuje z ciała gorętszego do chłodniejszego. Dotyczy to nie tylko dłoni i lodu, lecz także każdych dwóch ciał o różnych temperaturach.

> Im większa temperatura, tym większa moc promieniowania termicznego.

Okazuje się jednak, że moc nie jest jedyną ważną wielkością opisującą promieniowanie termiczne.

Ciało doskonale czarne

Z pewnością wiesz, że ciała ciemniejsze to te, które w większym stopniu pochłaniają światło. Często te same ciała silnie pochłaniają także promieniowanie o innych częstotliwościach, na przykład podczerwień. Nie jest to jednak zasadą: przykładowo, szkło przepuszcza niemal całe światło widzialne, a pochłania podczerwień i nadfiolet.
Aby oderwać się od własności poszczególnych substancji, w fizyce wprowadzono uproszczony model: ciało doskonale czarne.

Modele w fizyce, cz. I s. 12–14

> Ciało doskonale czarne to ciało pochłaniające całe padające na nie promieniowanie.

Jest to oczywiście pewna idealizacja, przypadek graniczny.

Okazuje się, że ciało ciemniejsze nie tylko lepiej pochłania promieniowanie, lecz także lepiej je emituje. Tę ostatnią zależność najłatwiej zrozumieć, gdy pomyślimy o ciele idealnie białym, które całe padające promieniowanie odbija. Takie ciało nie mogłoby samo promieniować, ponieważ wtedy traciłoby energię i samoczynnie chłodziło się poniżej temperatury otoczenia, co byłoby sprzeczne z drugą zasadą termodynamiki.
Właśnie dlatego, że ciało doskonale czarne zarówno najłatwiej pochłania promieniowanie, jak i najłatwiej je emituje, jest ono modelem służącym do badań promieniowania termicznego.

Pojęcie ciała doskonale czarnego wprowadził w 1862 r. Gustaw Kirchhoff – ten sam, którego dwa prawa dla obwodów elektrycznych poznałeś wcześniej.

Do opisu promieniowania termicznego najczęściej stosujemy model ciała doskonale czarnego.

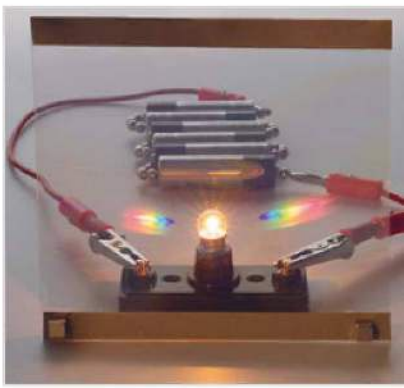
Promieniowanie ciała doskonale czarnego może budzić zdziwienie: jak może świecić coś, co jest czarne? Otóż w powyższej definicji mowa o promieniowaniu dochodzącym do ciała **z zewnątrz**, którego ciało doskonale czarne nie odbija, ale w całości pochłania. Natomiast emituje ono **własne promieniowanie**, na dodatek z większą mocą niż inne, podobne ciało o tej samej temperaturze.
Okazuje się, że większość ciał wysyła promieniowanie zbliżone do promieniowania ciała doskonale czarnego, dlatego ten model jest tak użyteczny. Nawet skóra człowieka promieniuje mniej więcej tak, jak ciało doskonale czarne. Może się to wydawać zaskakujące w przypadku osób o jasnej karnacji, jednak nasza skóra emituje podczerwień, a zatem ważne jest nie to, że odbija światło widzialne, ale to, że pochłania podczerwień (czyli dla podczerwieni w praktyce jest czarna).

Badanie promieniowania termicznego

Jak wiesz, fale elektromagnetyczne opisujemy m.in. za pomocą długości fali. Jaką długość fali ma więc promieniowanie termiczne? Aby odpowiedzieć na pytanie, wykonajmy doświadczenie.

Doświadczenie 18

1. Przygotuj żarówkę 6,3 V, przewody, 9 baterii 1,5 V oraz siatkę dyfrakcyjną. Jeśli nie masz fabrycznej siatki, wykonaj ją samodzielnie (patrz doświadczenie 3. s. 31).
2. Podłącz żarówkę do pojedynczego ogniwa. Obserwuj światło żarówki przez siatkę dyfrakcyjną. Jakie barwy widać? Którą z nich widać najsilniej?
3. Powtórz obserwacje z punktu 2. dla żarówki podłączonej do dwóch, trzech, sześciu i dziewięciu ogniw połączonych szeregowo. Jak zmieniają się twoje obserwacje w zależności od liczby ogniw?



Światło emitowane przez rozgrzane włókno żarówki to część jej promieniowania termicznego (poza tym znaczną część tego promieniowania

stanowi podczerwień). Jak zaobserwowałeś, takie promieniowanie można rozszczepić na różne barwy, czyli na światło o różnych długościach. Niektóre z barw widać wyraźniej niż inne.

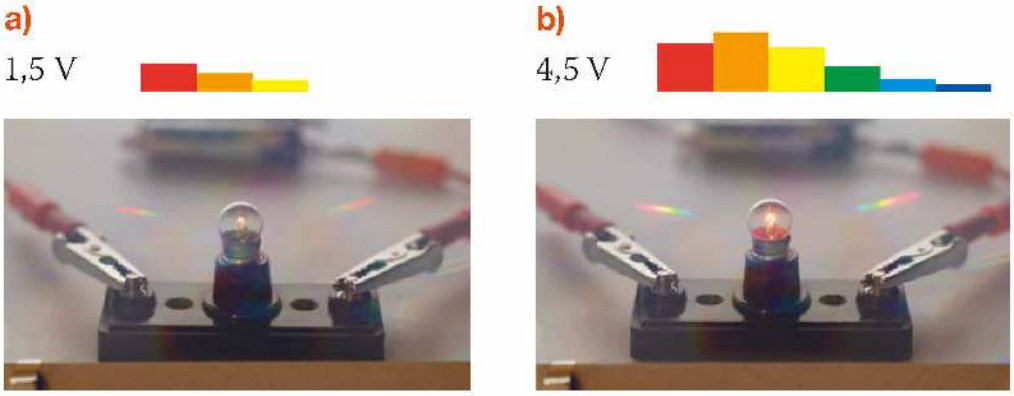
> Promieniowanie ciała doskonale czarnego składa się z fal o różnych długościach i emitowanych z różnym natężeniem.

Gdy do żarówki podłączamy więcej ogniw, płynie przez nią prąd o większym natężeniu. Powoduje on, że włókno mocniej się rozgrzewa. Zaobserwowałeś na pewno, że żarówka świeci wówczas jaśniej, a co ciekawsze, w miarę podłączania dodatkowych ogniw zmienia się barwa, którą widzimy najsilniej.
Dla jednego ogniwa dominuje kolor czerwony, kolejne barwy są coraz słabsze, a fioletowej praktycznie wcale nie widać. Przy większej liczbie ogniw najsilniejsze jest światło pomarańczowe, a potem żółte, widać też fale krótsze, łącznie z fioletem.

Gdy maleje długość fali, zwiększa się jej częstotliwość.

> Długość fali, dla której moc promieniowania jest maksymalna, maleje wraz ze wzrostem temperatury ciała.

Zauważmy jednak, że po zamianie jednego ogniwa (rys. 17.6a) na trzy (rys. 17.6b) barwa czerwona co prawda przestaje dominować nad innymi, ale jej natężenie i tak się zwiększa.



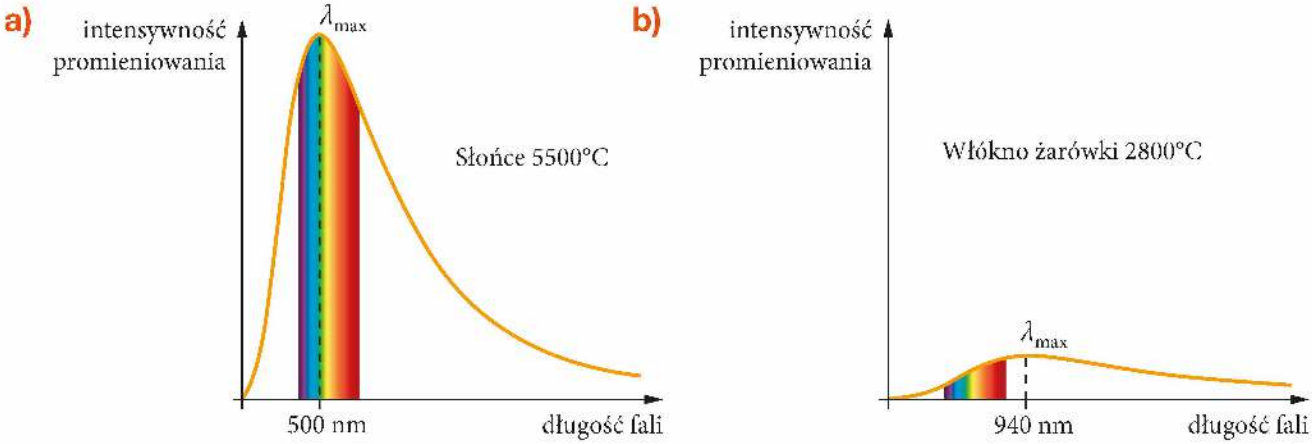
Rys. **17.6.** Prawa żarówka emituje więcej światła pomarańczowego niż czerwonego, ale i tak światła czerwonego emituje więcej niż żarówka lewa

Wykres promieniowania termicznego

Oko ludzkie nie jest dokładnym przyrządem do badania promieniowania, ponieważ w ogóle nie reaguje na podczerwień i nadfiolet, a w zakresie światła widzialnego na niektóre barwy jest bardziej czułe niż na inne. Dlatego w badaniach fizycznych do pomiaru natężenia promieniowania używamy odpowiednich przyrządów. Wyniki takich badań możemy w czytelny sposób przedstawić na wykresach.

Wykres na rysunku 17.7a przedstawia promieniowanie Słońca. Jak widzisz, nasza gwiazda najwięcej energii emituje w postaci żółtego światła widzialnego. Natężenie innych barw jest nieco mniejsze, a podczerwieni i nadfioletu – jeszcze mniejsze.
Porównaj teraz rysunek 17.7a z rysunkiem 17.7b. Drugi wykres także przedstawia promieniowanie termiczne, ale ciała znacznie chłodniejszego niż Słońce – rozgrzanego włókna tradycyjnej żarówki. Jak widzisz, w tym przypadku maksimum mocy promieniowania przypada na podczerwień. Właśnie dlatego żarówka ma niską sprawność. Z punktu widzenia oświetlania pomieszczeń emisja podczerwieni to marnowanie energii, ponieważ formą użyteczną jest tylko światło widzialne.
Z wykresu 17.7b wynika także, że w świetle żarówki więcej jest fal o niskiej częstotliwości niż o wysokiej. Zgadza się to z obserwacją gołym okiem: światło tradycyjnych żarówek nie jest białe, ale żółtawe.

Jednak nawet relatywnie słabe promieniowanie UV Słońca może mieć poważne skutki dla nieostrożnej osoby.



Rys. **17.7.** Promieniowanie termiczne Słońca (a) i tradycyjnej żarówki (b)

Wnioski z wykresów zgadzają się z tym, co powiedzieliśmy wcześniej:
- im wyższa temperatura, tym większa moc promieniowania,
- im wyższa temperatura, tym krótsze fale dominują w promieniowaniu.

Zauważ też, że gdy wykresy narysujemy w jednym układzie współrzędnych, nie przetną się one (patrz infografika s. 130–131).
Oznacza to, że jeśli temperatura ciała wzrośnie, to moc jego promieniowania zwiększy się w każdej częstotliwości. Jeśli np. podgrzejemy ciało promieniujące głównie światło czerwone, to wprawdzie w jego widmie ta barwa przestanie dominować, ale i tak będzie jej więcej niż przed ogrzaniem ciała.



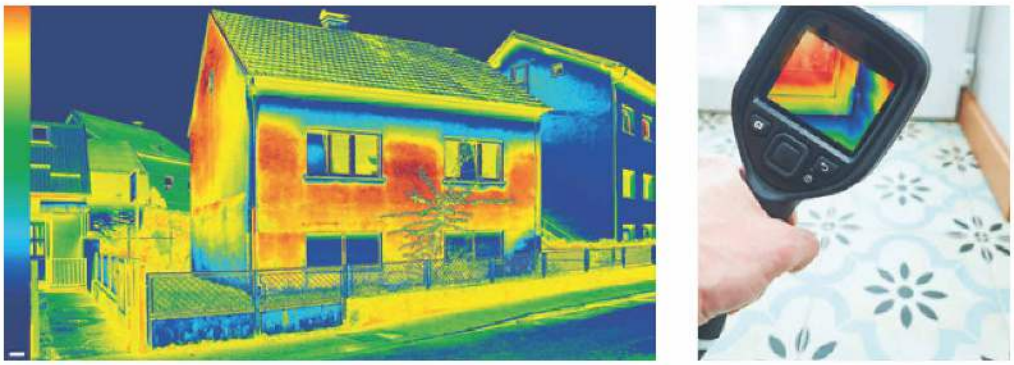
Rys. 17.8. Pomiar długości fali dominującej w promieniowaniu termicznym skóry człowieka pozwala zmierzyć temperaturę szybko i bez kontaktu

Kamera termowizyjna

Ciała, z którymi mamy do czynienia na co dzień, praktycznie całe promieniowanie emitują w zakresie podczerwieni. Ich promieniowania nie możemy więc obserwować gołym okiem. Jest to jednak możliwe,

gdy użyjemy kamery termowizyjnej, zamieniającej poszczególne częstotliwości podczerwieni na różne barwy światła widzialnego (rys. 17.9). Taka kamera pozwala m.in. badać izolację termiczną budynku. Miejsca, w których z domu „ucieka" dużo energii, są cieplejsze niż otoczenie.

a) b)



Rys. 17.9. Obrazy z kamery termowizyjnej na zewnątrz (a) i wewnątrz (b) domu

Fizyka wokół nas

PROMIENIOWANIE TERMICZNE I TEMPERATURA BARWOWA

Na opakowaniach żarówek albo w fotografii, podczas ustawiania balansu bieli, spotykamy się z pojęciem temperatury barwowej, podawanej w kelwinach. Im wyższa jest wartość temperatury barwowej, tym chłodniejszy odcień bieli. Ale jak to w ogóle jest możliwe, że światło białe, które jest mieszaniną wszystkich długości fal z przedziału 380–780 nm, może mieć różne odcienie?

PROMIENIOWANIE TERMICZNE

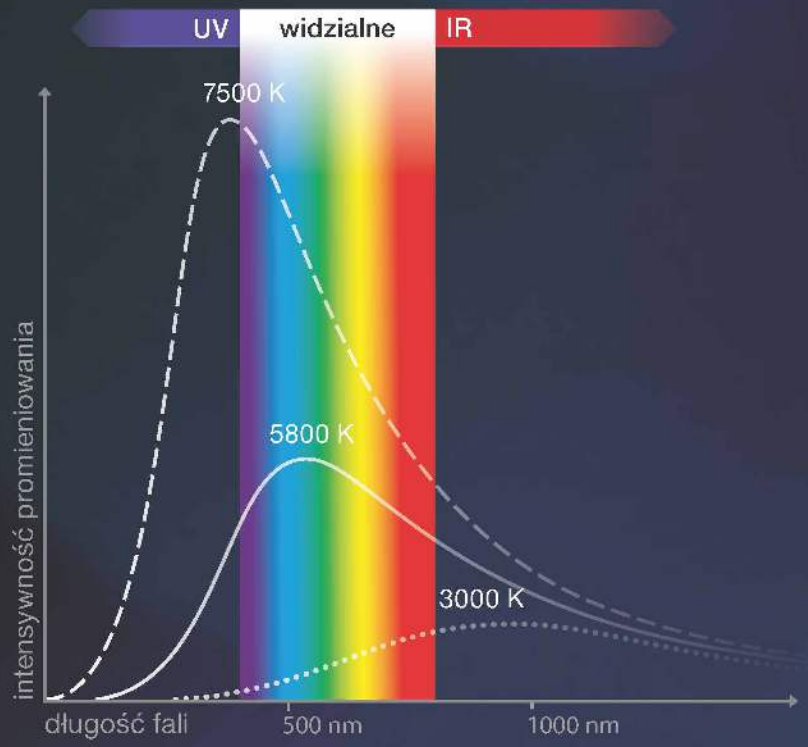
Każde ciało emituje promieniowanie elektromagnetyczne, którego zakres oraz intensywność zależą od temperatury.

Długość fali λ_{max}, przy jakiej ciało świeci najmocniej, maleje wraz ze wzrostem temperatury zgodnie z zależnością odkrytą w 1893 r. przez Wilhelma Wiena:

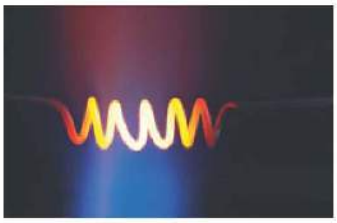
$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

gdzie: b – stała Wiena; $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ m · K, T – temperatura ciała w kelwinach.

Jeśli masz temperaturę ciała 36,6°C (ok. 310 K), to zgodnie ze wzorem świecisz w podczerwieni, z maksimum promieniowania w 9,4 μm.



Dopiero mocno rozgrzane ciała, np. gwóźdź włożony do płomienia, zaczynają emitować światło widzialne. Z początku jest ono głównie czerwone – mówimy, że gwóźdź jest rozgrzany do czerwoności. Gdy nadal będziemy zwiększać jego temperaturę, możemy go rozgrzać do białości, czyli do stanu, w którym żelazo emituje także światło widzialne o wyższych częstotliwościach (rys. 17.10). Mieszaninę różnych częstotliwości obserwujemy właśnie jako światło białe.



Rys. 17.10. Gołym okiem widzimy, że metalowa spirala jest najbardziej rozgrzana pośrodku

Z jeszcze wyższymi temperaturami mamy do czynienia w przypadku gwiazd. Maksimum promieniowania Słońca przypada na światło widzialne, ale są gwiazdy gorętsze, promieniujące głównie w nadfiolecie, a nawet emitujące głównie promieniowanie rentgenowskie. Każda taka gwiazda i tak wypromieniowuje więcej światła widzialnego na jednostkę swojej powierzchni niż na przykład Słońce, tyle że w stosunku do jej całkowitej mocy jest to stosunkowo niewielki procent.

TEMPERATURA BARWOWA, CZYLI ODCIENIE BIELI

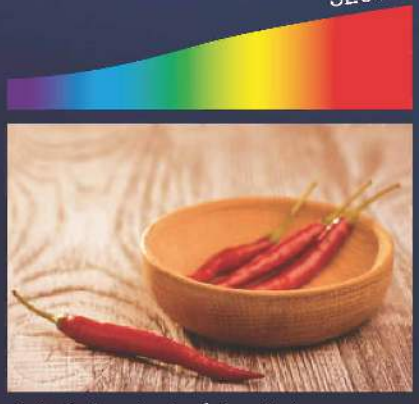
Światło jest idealnie białe wtedy, gdy fale z zakresu widzialnego występują w równych ilościach. Jeśli któraś z długości fal dominuje, pojawia się zabarwienie światła białego, które często jest niepożądane, np. w fotografii.

Idealna biel



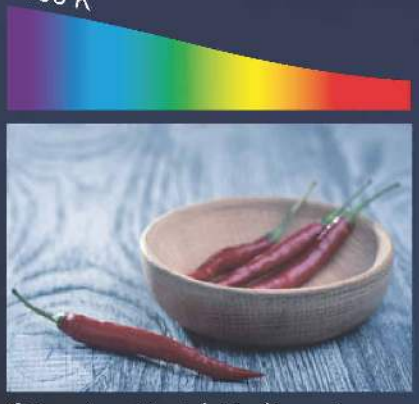
Światło idealnie białe nie może zostać wytworzone przez naturalne źródło. Światło słoneczne (ok. 5800 K), do którego jesteśmy najbardziej przyzwyczajeni, również nie jest idealnym światłem białym (patrz wykres na sąsiedniej stronie).

3200 K



Jeżeli dominują fale dłuższe, to odcień bieli jest żółtawy lub czerwonawy, a na opakowaniach żarówek emitujących takie światło można spotkać określenie „ciepła biel".

6500 K



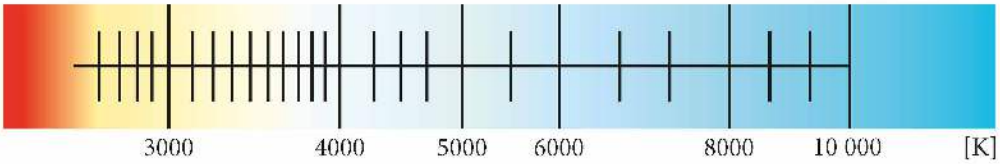
Gdy więcej jest fal krótszych, biel jest niebieskawa, a na opakowaniach żarówek o takim świetle pojawia się określenie „chłodna biel".

Powszechne określenia „ciepła biel" i „zimna biel", pojawiające się m.in. na opakowaniach żarówek, nie są związane z temperaturą barwową. Światło określane jako ciepłe ma niską temperaturę barwową, a zimne – wysoką. Im bardziej jest rozgrzane ciało, tym bardziej niebieskawe światło emituje. Określenia „ciepłe" i „zimne" wynikają ze stosowania ich w malarstwie, gdzie za barwy ciepłe uznaje się czerwienie, pomarańcze i żółcie, a za barwy zimne – fiolety, odcienie niebieskiego i zielenie.



A to ciekawe

Na żarówkach kompaktowych i LED często podaje się temperaturę w kelwinach. Oznacza ona temperaturę ciała doskonale czarnego emitującego promieniowanie zbliżone do promieniowania danej lampy. Temperatura 4000 K oznacza światło białe, zbliżone do dziennego, niższa – światło żółtawe, a wyższa – niebieskawe.



Prawo Wiena

Ilościowy opis omówionej wyżej zależności jest bardzo prosty.

> Długość fali, dla której moc promieniowania ciała doskonale czarnego jest maksymalna, jest odwrotnie proporcjonalna do jego temperatury bezwzględnej.

Tę zależność możemy zapisać za pomocą wzoru:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

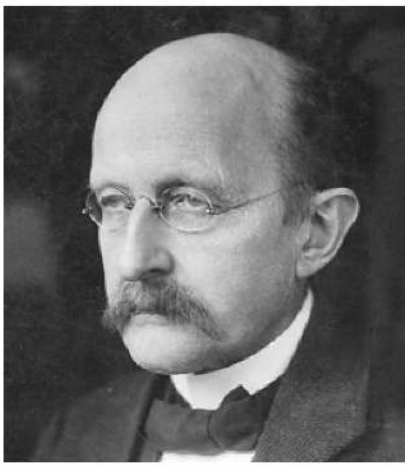
gdzie: λ_{max} – długość fali odpowiadająca maksymalnej mocy promieniowania, T – temperatura bezwzględna ciała (w kelwinach), b – stała $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ m · K.

Problem z ciałem doskonale czarnym

Dlaczego dziewiętnastowieczni fizycy mieli problem z wyjaśnieniem promieniowania ciała doskonale czarnego?
Samo istnienie tego promieniowania można zrozumieć na gruncie fizyki klasycznej. W każdym ciele drgają cząsteczki zawierające ładunki elektryczne, a drgające ładunki powodują emisję fali elektromagnetycznej. Co więcej, w wyższej temperaturze drgają one szybciej, więc powinny – zgodnie z obserwacjami – wytwarzać falę o wyższej częstotliwości i mniejszej długości.

Problem pojawia się przy opisie ilościowym (matematycznym). Z obliczeń wykonanych na podstawie praw fizyki znanych w XIX w. wynikało, że każde ciało powinno promieniować z nieskończoną mocą, czyli nawet w krótkim czasie wypromieniowywać nieskończoną energię. Ponieważ jest to niemożliwe, naukowcy doszli do wniosku, że znane im prawa są niewystarczające do opisu nowo odkrytych zjawisk fizycznych.

Rozwiązanie problemu podał pod koniec XIX w. Max Planck (rys. 17.11). Założył on, że ciała nie wysyłają promieniowania w sposób ciągły, ale w porcjach o energii proporcjonalnej do częstotliwości tego promieniowania. Porcje te nazwał **kwantami**.



Rys. 17.11. Max Planck otrzymał w 1918 r. Nagrodę Nobla m.in. za odkrycie kwantów energii

> Energia jednego kwantu promieniowania elekromagnetycznego jest proporcjonalna do częstotliwości tego promieniowania.
>
> $$E = hf$$

gdzie: E – energia jednego kwantu, f – częstotliwość promieniowania, h – stała Plancka, $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$.

Choć sam Planck uważał swoje założenie za formalny wybieg, bez znaczenia fizycznego, to – ku zaskoczeniu samego uczonego – jego założenie posłużyło do stworzenia mechaniki kwantowej, czyli teorii, która diametralnie zmieniła sposób myślenia o naturze świata.

Po tej lekcji powinieneś

- analizować promieniowanie termiczne ciał i jego zależność od temperatury;
- wiedzieć, do czego służy model ciała doskonale czarnego;
- rozumieć pojęcie kwantu energii;
- korzystać z prawa Wiena.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Odpowiedz na pytania.

a) Czy do oświetlenia przytulnej kawiarni wybierzesz żarówki LED opisane jako 2500 K czy 4000 K? Uzasadnij swoją odpowiedź.

b) W plastyce mówi się, że czerwony to barwa ciepła, a niebieski – zimna. Czy zgadza się to z zależnością częstotliwości od temperatury?

c) Gdyby włókno żarówki rozgrzać do temperatury 5000 K, emitowałoby ono znacznie więcej promieniowania w zakresie światła widzialnego. Taka żarówka miałaby więc dużo wyższą sprawność. Dlaczego nie stosuje się takiego rozwiązania?

2. Oblicz długość fali odpowiadającej maksymalnej mocy promieniowania termicznego śniegu o temperaturze –10°C. Porównaj ją z długością fali czerwonego światła widzialnego oraz z długością mikrofal z kuchenki ($f = 2450$ MHz).

3. Oblicz maksymalną i minimalną temperaturę ciała, którego maksymalna moc promieniowania przypada na światło widzialne.

4. Oblicz, jaką energię ma kwant światła czerwonego o długości fali 720 nm, a jaką – fioletowego o długości fali 380 nm.

5. Czerwony laser emituje światło o mocy 50 mW. Oblicz, ile kwantów światła emituje w ciągu sekundy.

17.2. Efekt cieplarniany

Przypomnij sobie

- Promieniowanie termiczne ma różną moc dla różnych częstotliwości.
- Długość fali, dla której moc promieniowania termicznego jest największa, maleje z temperaturą ciała.



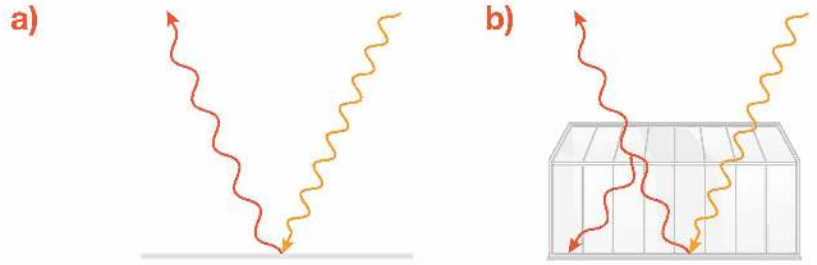
Rys. 17.12. Rok 2020 był piątym z rzędu sezonem huraganów nad Atlantykiem, które swoją liczbą znacznie przewyższyły normy wieloletnie

Z pewnością słyszałeś o efekcie cieplarnianym. Dzięki wiadomościom na temat promieniowania termicznego możesz teraz zrozumieć, na czym polega to zjawisko.

Działanie szklarni

Nazwa efektu cieplarnianego odwołuje się do cieplarni, czyli szklarni, w której zachodzi to samo zjawisko. Zacznijmy więc od wyjaśnienia jej działania. W jaki sposób w szklarni bez dogrzewania można utrzymać temperaturę wyższą niż na zewnątrz ? Czy nie jest to sprzeczne z drugą zasadą termodynamiki?

Otóż gdy promienie słoneczne padają na powierzchnię ziemi, powodują rozgrzewanie gleby. W miarę wzrostu temperatury gleba wypromieniowuje coraz więcej energii. Wzrasta też utrata ciepła realizowana na inne sposoby – odpływa ono w głąb ziemi i do powietrza. W stanie równowagi do gleby dociera tyle samo energii, ile jest przekazywane na zewnątrz (rys. 17.13a).



Rys. **17.13.** Wymiana ciepła: a) otwarta powierzchnia ziemi, b) szklarnia

Zgodnie z prawem Wiena dla $T = 20°C = 393\ K$ długość fali to $\lambda_{max} = 10^{-5}\ m = 10\ \mu m$.

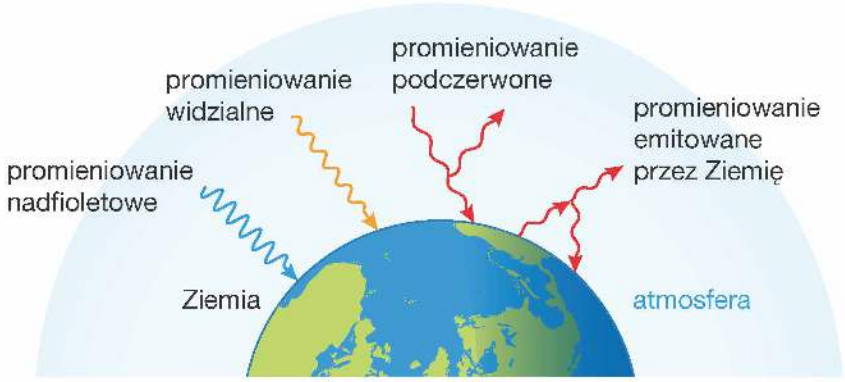
Sytuacja się zmienia, gdy gleba znajduje się w szklarni (rys. 17.13b). Szkło przepuszcza większość promieniowania słonecznego, a w każdym razie jego zasadniczą część – światło widzialne. Ponieważ temperatura gleby jest znacznie niższa niż temperatura Słońca, więc jej promieniowanie ma znacznie niższą częstotliwość – należy do dalekiej podczerwieni. Okazuje się, że szkło odbija część tego promieniowania z powrotem do szklarni, a gleba zyskuje więcej energii, niż traci. Jej energia wewnętrzna (a zatem także temperatura) rośnie do momentu, aż nowe, zwiększone straty ciepła zrównoważą szybsze dostarczanie energii. W szklarni taka równowaga ma miejsce przy temperaturze wyższej niż bez szklanego dachu.

Szyba szklarni przepuszcza promieniowanie słoneczne, ale odbija część promieniowania podczerwonego gleby, co skutkuje zwiększeniem temperatury w szklarni.

Temperatura w szklarni podnosi się powyżej temperatury otoczenia, ale nie jest to sprzeczne z drugą zasadą termodynamiki, ponieważ energia dociera ze Słońca, które jest dużo gorętsze niż gleba w szklarni.
Podobne zjawisko zachodzi w budynkach, zwłaszcza tych z dużymi południowymi oknami, oraz w pojazdach. Niestety, co roku zdarzają się przypadki śmierci dzieci pozostawionych w samochodzie w upalny dzień.

Efekt cieplarniany w atmosferze

Działanie szklarni omówiliśmy tak dokładnie, gdyż efekt cieplarniany zachodzący w atmosferze ma taką samą naturę. Funkcję szyby spełniają gazy cieplarniane, m.in.: dwutlenek węgla, para wodna i metan.



Rys. **17.14.** Powstawanie efektu cieplarnianego

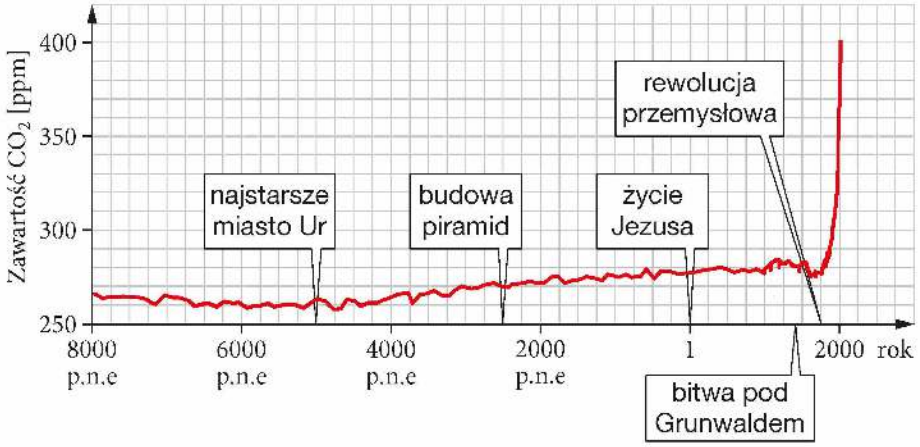
Gazy zawarte w atmosferze pochłaniają, a następnie emitują w stronę Ziemi część wysyłanego przez nią promieniowania podczerwonego. Powoduje to podniesienie temperatury Ziemi. To zjawisko nazywamy **efektem cieplarnianym**.

Gdyby Ziemia była pozbawiona atmosfery, średnia temperatura naszego globu byłaby o ponad 30°C niższa niż obecnie. Tak więc naturalnie występujący efekt cieplarniany jest zjawiskiem korzystnym: bez niego stale panowałaby epoka lodowcowa.
Sytuacja zmienia się drastycznie, gdy do atmosfery wprowadzamy dodatkowe gazy cieplarniane. O ile dodatkowa para wodna natychmiast się skrapla, o tyle dwutlenek węgla i metan pozostają w atmosferze i powodują nasilenie się efektu cieplarnianego.
Odkąd rozpoczęła się rewolucja przemysłowa i zaczęliśmy spalać paliwa kopalne: węgiel, a później także gaz ziemny i ropę naftową, emitujemy do atmosfery duże ilości CO_2 (rys. 17.15 na następnej stronie).

GWP (ang. *Global Warming Potential*) określa potencjał tworzenia efektu cieplarnianego w porównaniu z CO_2. Metan ma GWP = 23, czyli ma 23 razy większą zdolność do zatrzymywania ciepła w atmosferze niż CO_2. Jeszcze bardziej szkodliwe są freony, z GWP = 14 000 – ich produkcja została zakazana.

Powoduje to **globalne ocieplenie**, czyli zwiększenie się średniej temperatury powierzchni Ziemi.

Globalne ocieplenie, czyli zwiększanie się średniej temperatury powierzchni Ziemi, jest wywołane emisjami gazów cieplarnianych, głównie dwutlenku węgla.



Rys. **17.15.** Koncentracja CO_2 w atmosferze wyrażona w częściach milionowych (ppm – *parts per milion*)



Rys. 17.16. Chów zwierząt odpowiada za ok. 15% emisji gazów cieplarnianych, czyli tyle samo, ile cały transport lądowy, wodny i lotniczy. Największym problemem są przeżuwacze, które wytwarzają metan

Oprócz dwutlenku węgla wprowadzamy do atmosfery metan. Nie ma go tak dużo, ale jest on silniejszym gazem cieplarnianym od CO_2. Metan to główny składnik gazu ziemnego, uwalnia się z nieszczelnych instalacji gazowych. Jego drugim źródłem jest przemysłowy chów przeżuwaczy (bydło, owce, kozy) oraz wielbłądów, ponieważ metan powstaje w skomplikowanym przewodzie pokarmowym tych zwierząt (rys. 17.16).

Czy 1°C to dużo?

Od początku rewolucji przemysłowej średnia temperatura Ziemi podniosła się o ok. 1°C. Uczeni uważają, że granicą bezpieczeństwa jest 1,5°C, w najlepszym razie 2°C.

Jeżeli nie zmniejszymy tempa emisji CO_2, do tej granicy dojdziemy ok. 2050 r. Natomiast ok. 2100 r. przyrost średniej temperatury Ziemi wyniesie ok. 5°C.

Takie zmiany temperatury mogą się wydawać niewielkie, ponieważ odruchowo myślimy o zmianie **pogody**. Od południa do wieczora jednego dnia temperatura często zmienia się o znacznie więcej niż 5°C. Jednak tutaj chodzi o zmianę **klimatu**, czyli o średnią temperaturę całego globu w długim okresie.

Aby uzmysłowić sobie, że w tym przypadku 5°C to bardzo dużo, wystarczy zauważyć, że taka właśnie zmiana nastąpiła pomiędzy szczytem ostatniej epoki lodowcowej a czasami dzisiejszymi.

Klimat opisuje przebieg pogody w dłuższym okresie, natomiast **pogodę** określamy dla danej chwili.

Jeśli nie zmniejszymy emisji CO_2, to do 2100 r. wzrost temperatury będzie tak duży, jak od szczytu epoki lodowcowej do dziś.

Sprzężenia zwrotne

Nasilenie się efektu cieplarnianego wyzwala zjawiska, które przyczyniają się do dalszego ocieplenia. W takiej sytuacji mówimy o **dodatnim sprzężeniu zwrotnym**. Najważniejsze przykłady takiego sprzężenia to:

Parowanie oceanów

W wyższej temperaturze oceany szybciej parują, a w gorącym powietrzu może się zmieścić więcej pary wodnej, zanim zacznie się ona skraplać. Para wodna jest z kolei gazem cieplarnianym, czyli prowadzi do podwyższenia temperatury na Ziemi, więc także w oceanach.

Topnienie lodowców

Lód odbija znaczną część promieniowania słonecznego. Kiedy stopnieje, promienie słoneczne padają na znajdującą się pod nim glebę albo wodę oceanu i są pochłaniane w znacznie większym stopniu.

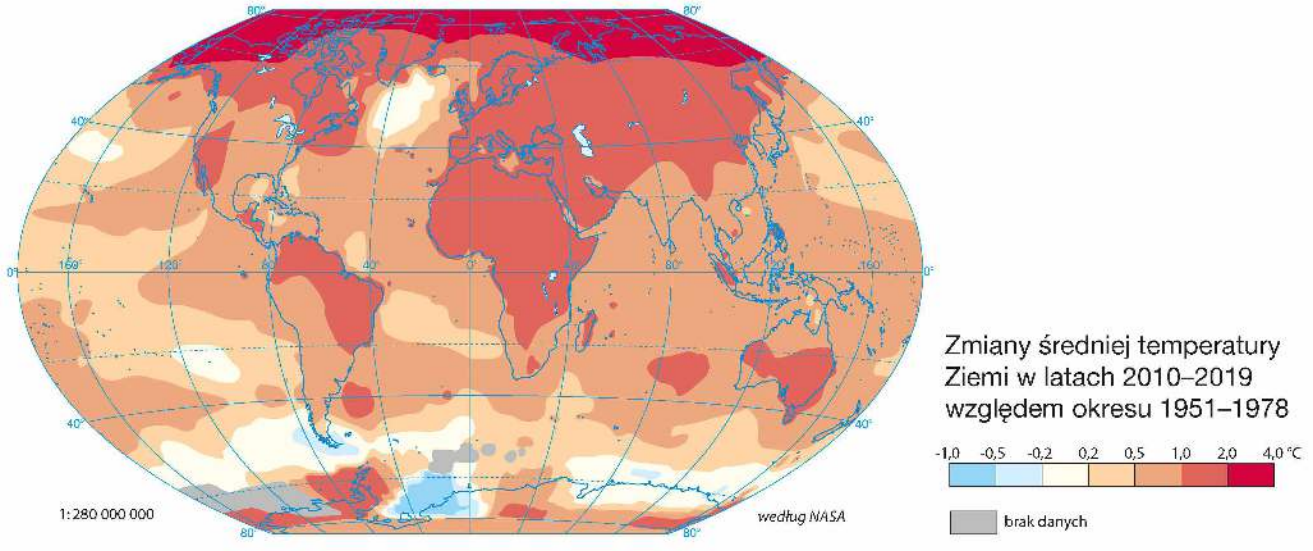
Rozmarzanie wieloletniej zmarzliny

Wieloletnia zmarzlina, zwana do niedawna wieczną, zaczyna topnieć. Spod lodu jest uwalniany metan – silny gaz cieplarniany.

Zmiany średniej temperatury Ziemi

Mapka pokazuje zmianę średniej temperatury Ziemi w latach 2010–2019 w porównaniu z latami 1951–1978. Łatwo zauważyć, że postępujące ocieplenie nie jest równomierne: najbardziej ogrzały się okolice północnego bieguna Ziemi.

Natomiast ochłodzenie mórz wokół Antarktydy wynika ze spływania do nich zimnej wody z topniejących lodowców.



Oprócz dodatnich istnieją także **ujemne sprzężenia zwrotne**. Przede wszystkim przy większej zawartości CO_2 w powietrzu rośliny szybciej rosną i pochłaniają więcej tego gazu. Niestety, sprzężenia ujemne nie równoważą sprzężeń dodatnich.

Skutki dla człowieka

Na skutki ocieplenia najbardziej są narażone obszary, gdzie już obecnie jest gorąco. W ciągu kilkudziesięciu lat znaczna część Afryki i część Azji nie będą się nadawały do zamieszkania. Oznacza to, że ich mieszkańcy będą migrować do chłodniejszych rejonów. Mowa nawet o setkach milionów ludzi.

W Polsce już niewielki wzrost średniej temperatury oznacza zwiększenie się liczby dni wyjątkowych upałów, a także częstsze występowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych, takich jak nawałnice, burze, wichury, trąby powietrzne. Te zjawiska obserwujemy już obecnie, a będą one przybierać na sile.

Tymczasem wystarczy kilka dni szczególnych upałów w czasie wzrostu roślin uprawnych albo nawałnica tuż przed żniwami, aby całkowicie zniszczyć zbiory.

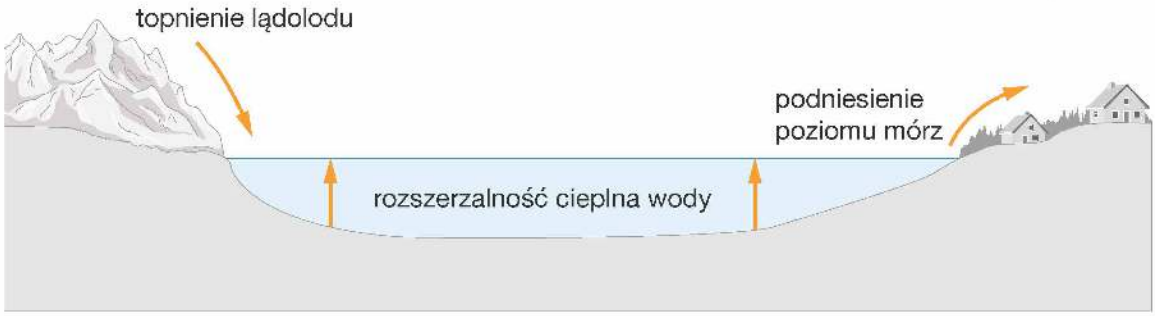
Smog a efekt cieplarniany

Efekt cieplarniany bywa mylony ze smogiem. Chociaż oba te zjawiska mają związek z zanieczyszczeniem powietrza, są zupełnie różne. Porównajmy je.

	SMOG	EFEKT CIEPLARNIANY
Przyczyna fizyczna	Pył (drobne cząstki stałe) zawieszony nisko w atmosferze	Gazy, np. CO_2, para wodna, metan, wysoko w atmosferze
Przyczyna po stronie ludzi	Niska emisja – spalanie w domowych piecach złej jakości węgla, spalanie śmieci, silniki Diesla	Spalanie paliw kopalnych i substancji organicznych. Niszczenie roślin, zwłaszcza wycinka drzew
Skutki	Choroby ludzi i zwierząt	Zmiana klimatu, susze, topnienie lodowców, podniesienie poziomu mórz
Zasięg	Lokalny – palenie śmieci w Puławach i okolicach powoduje smog w tym mieście, ale nie na przykład w Lublinie	Globalny – spalanie węgla w Chęcinach i w Melbourne ma wpływ na klimat w Amsterdamie
Skala czasowa	Po kilku dniach smog się rozwiewa	Klimat może ulec zmianie nawet na tysiąclecia
Dodatnie sprzężenie zwrotne	Nie występuje – obecność smogu nie powoduje, że przyroda sama wytwarza dodatkowy smog	Występuje – ocieplenie klimatu wzmacnia naturalną emisję gazów cieplarnianych, zanikają lodowce odbijające promieniowanie słoneczne

Ważnym i już obserwowanym skutkiem globalnego ocieplenia jest podnoszenie się poziomu mórz (rys. 17.17) oraz ich zakwaszanie.

Rozszerzalność cieplna wody, cz. II s. 68



Rys. **17.17.** Za wzrost poziomu morza odpowiadają w równym stopniu zwiększająca się ilość wody i jej rozszerzanie się pod wpływem rosnącej temperatury. Słona woda rozszerza się wraz ze wzrostem temperatury zawsze, także poniżej 4°C

Sposoby zapobiegania globalnemu ociepleniu

Globalnemu ociepleniu można zapobiegać. Niektóre spośród możliwych sposobów **ograniczania emisji gazu cieplarnianego CO_2** przedstawiono poniżej.

CO MOŻE BYĆ ZROBIONE PRZEZ

pojedyncze osoby	państwo
korzystanie z komunikacji publicznej i rowerów, ograniczenie przelotów samolotem	wspieranie komunikacji publicznej
ocieplanie mieszkań i domów	budowa elektrowni jądrowych, wiatrowych itp.
korzystanie z odnawialnych źródeł energii, np. paneli słonecznych	wspieranie wykorzystania w gospodarstwach domowych odnawialnych źródeł energii, np. paneli słonecznych
wegetarianizm (zwłaszcza niejedzenie mięsa przeżuwaczy)	wprowadzenie podatków uzależnionych od emisji dwutlenku węgla
oszczędzanie energii elektrycznej	
zdobywanie i propagowanie wiedzy o zmianach klimatu	

Jak widzisz, nawet jako jednostka możesz zrobić wiele dla klimatu. Inne działania są w stanie podejmować jedynie państwa, ale przecież jako pełnoletni obywatel i wyborca także ty masz lub niebawem będziesz miał wpływ na politykę swojego kraju.

Po tej lekcji powinieneś

- wiedzieć, jak powstaje efekt cieplarniany;
- znać sposoby przeciwdziałania globalnemu ociepleniu.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Zastanów się, co zrobisz, gdy zobaczysz dziecko albo zwierzę pozostawione w upalny dzień w samochodzie.

2. Oblicz długość fali emitowanej przez asfalt rozgrzany do temperatury 50°C, odpowiadającej maksimum mocy promieniowania. Oblicz, ile razy większa jest ta długość od długości fali światła żółtego, odpowiadającego maksimum mocy promieniowania słonecznego.

3. Pewnego dnia gleba poza szklarnią ma temperaturę 5°C i jest w równowadze termicznej z otoczeniem. Oblicz temperaturę gleby w szklarni przy założeniu, że jej szyba przepuszcza $\frac{2}{3}$ promieniowania podczerwonego, a pozostałą $\frac{1}{3}$ odbija w stronę gleby. Skorzystaj z prawa Stefana–Boltzmanna, które mówi, że moc promieniowania jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej.

4. Stronę *Nauka o klimacie* (adres na s. 309 i pod kodem QR) prowadzą fizycy atmosfery z Uniwersytetu Warszawskiego. Poszukaj tam odpowiedzi na podane niżej pytania oraz na dwa inne dotyczące zmian klimatu, samodzielnie postawione przez siebie.

a) Czy wulkany emitują mniej czy więcej CO_2 niż ludzie? Ile razy mniej lub więcej?



b) Czy obserwowane zmiany klimatu można wyjaśnić zmianami aktywności Słońca?

17.3. Zjawisko fotoelektryczne

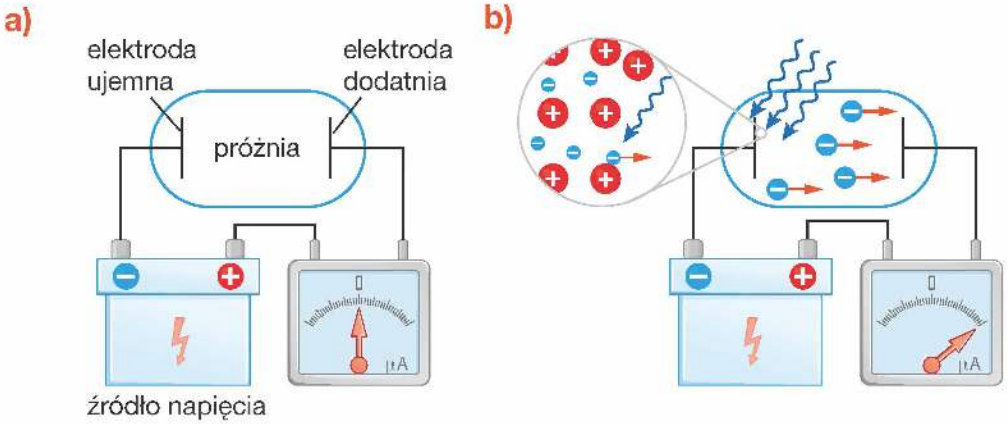
Przypomnij sobie

- Promieniowanie ciała doskonale czarnego wyjaśniono dzięki założeniu, że promieniowanie termiczne jest emitowane w porcjach energii, zwanych kwantami.
- Energia kwantu promieniowania jest proporcjonalna do częstotliwości: $E = hf$. Stałą proporcjonalności $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s nazywamy stałą Plancka.

W lekcji 17.1 powiedzieliśmy już o jednym ze zjawisk, których pełen opis był niemożliwy na gruncie fizyki klasycznej. Teraz zajmiemy się innym takim zjawiskiem.

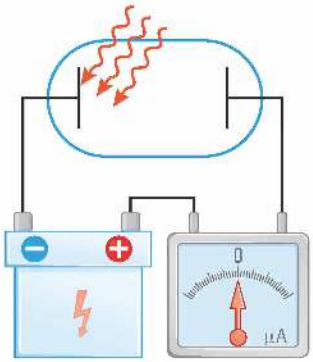
Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne

Układ do obserwacji zjawiska fotoelektrycznego przedstawiono na rysunku 17.18. Jest to bańka opróżniona z powietrza i wyposażona w dwie elektrody, wykonane najczęściej z cezu, podłączone do akumulatora. Taką bańkę nazywamy **fotokomórką**. W obwodzie jest też mikroamperomierz wskazujący ewentualny przepływ prądu.
Początkowo (rys. 17.18a) prąd nie płynie, co nas nie dziwi, skoro w bańce jest próżnia – nie ma nośników ładunków, które mogłyby się poruszać.



Rys. **17.18.** Układ do badania zjawiska fotoelektrycznego

Gdy jednak oświetlimy ujemną elektrodę niebieskim światłem (rys. 17.18b), prąd zaczyna płynąć. Dzieje się tak, ponieważ światło wybija elektrony z ujemnej elektrody.
Elektron wyrwany z metalu jest odpychany przez elektrodę ujemną, a przyciągany przez dodatnią, więc zaczyna się poruszać. Ponieważ takich elektronów jest wiele – płynie prąd.



Rys. 17.19. Jeżeli elektrody fotokomórki są zbudowane z cezu, to oświetlanie światłem czerwonym nie powoduje przepływu prądu

Zjawiskiem fotoelektrycznym zewnętrznym nazywamy wybijanie elektronów z powierzchni metalu przez promieniowanie elektromagnetyczne.

Wszystko, co powiedzieliśmy do tej pory, można jeszcze wyjaśnić w ramach fizyki klasycznej. Wiemy przecież, że fale elektromagnetyczne niosą pewną energię. W zmiennym polu elektrycznym związanym z taką falą elektron zaczyna drgać, a gdy jego energia jest dostatecznie duża, może się wyrwać z metalu.
Zagadkowa jest jednak trzecia część doświadczenia (rys. 17.19), gdy światło niebieskie zamienimy na czerwone. Okazuje się, że wtedy prąd nie płynie, niezależnie od natężenia światła.

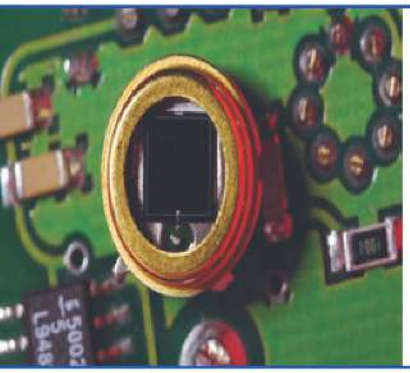
Zjawisko fotoelektryczne zachodzi tylko dla dostatecznie wysokiej częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego.

Dla metalu innego niż cez graniczna częstotliwość, od której możemy zaobserwować przepływ prądu, może być inna. W szczególności dla wielu metali potrzebne jest promieniowanie ultrafioletowe, aby przez fotokomórkę mógł popłynąć prąd.
Zasada jest jednak taka sama: promieniowanie musi mieć wystarczająco wysoką częstotliwość i jeśli ten warunek nie jest spełniony, to zwiększanie natężenia promieniowania nic nie da. Tego nie można wyjaśnić za pomocą fizyki klasycznej. Dla każdego materiału częstotliwość graniczna, powyżej której zachodzi zjawisko fotoelektryczne, jest inna.

Wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego

Jak pamiętasz, Max Planck uzasadnił istnienie promieniowania ciała doskonale czarnego dzięki założeniu, że jest to promieniowanie emitowane w porcjach, czyli kwantach.
W 1905 r. Albert Einstein wpadł na pomysł, że w analogiczny sposób można wyjaśnić zjawisko fotoelektryczne. Założył więc, że również pochłanianie promieniowania przez elektron następuje nie w sposób ciągły, ale w kwantach opisanych przez Plancka.

Za wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego Albert Einstein otrzymał w 1921 r. Nagrodę Nobla.



A to ciekawe

Dzisiaj fotokomórki zostały zastąpione przez fotodiody, których zasada działania opiera się na zjawisku fotoelektrycznym wewnętrznym, a nie zewnętrznym. Oznacza to, że elektrony zyskują energię, jaka pozwala im poruszać się po całej objętości materiału, ale go nie opuszczają.
Bańkę próżniową zastąpił tańszy i mniej delikatny kryształek półprzewodnika. Ponieważ fotodioda spełnia w praktyce taką samą funkcję, jaką dawniej pełniła fotokomórka, potocznie nazywa się ją tak samo – fotokomórką.

Jak już wspomnieliśmy, energia kwantu promieniowania – zwanego dzisiaj także **fotonem** – jest proporcjonalna do częstotliwości tego promieniowania:

$$E = hf$$

$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J · s to stała Plancka.

Energia pojedynczego fotonu zależy więc nie od natężenia światła, ale wyłącznie od jego częstotliwości. Światło czerwone o dużym natężeniu składa się z większej liczby fotonów niż światło fioletowe o małym natężeniu, jednak energia pojedynczego fotonu światła fioletowego jest większa niż energia fotonu światła czerwonego.
Opisana wyżej zależność pozwala wyjaśnić przyczynę zjawiska fotoelektrycznego. Elektron w metalu pochłania tylko jeden foton i zyskuje jego energię. Jeśli jest ona wystarczająca do wyrwania fotonu z metalu, to zachodzi zjawisko fotoelektryczne, a jeśli nie jest – zjawisko nie zachodzi. Prawdopodobieństwo, że elektron pochłonie jednocześnie dwa fotony (lub więcej), jest znikomo małe.
Z punktu widzenia zjawiska fotoelektrycznego istotna jest więc energia pojedynczego fotonu, związana z jego częstotliwością, a nie łączna energia wszystkich fotonów, uzależniona od ich liczby.

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na wybijaniu elektronów z powierzchni metalu przez fotony. Zachodzi ono tylko dla fotonów o dostatecznie dużej energii.

Zjawisko fotoelektryczne możemy porównać do próby rozbicia szyby: nie stłuczemy jej, jeśli będziemy w nią rzucać bardzo wieloma kulkami z papieru, ale bez problemu zrobimy to, kiedy rzucimy w nią jedną stalową kulką, nawet jeśli jej energia jest mniejsza niż łączna energia wszystkich kulek z papieru.
O tym, że zjawisko fotoelektryczne zachodzi na poziomie atomowym, świadczy fakt, że zachodzi ono niemal natychmiast – ok. 10^{-9} s po rozpoczęciu naświetlania. Gdyby elektrony były wybijane w wyniku nagrzewania metalu, trwałoby to znacznie dłużej.

Inne dowody kwantowej natury promieniowania

Nie tylko promieniowanie ciała doskonale czarnego i zjawisko fotoelektryczne dowodzą, że promieniowanie występuje w kwantach. Świadczy o tym wiele innych zjawisk.

Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne

To zjawisko zachodzi, gdy oświetlamy półprzewodnik promieniowaniem o odpowiedniej częstotliwości. W tym przypadku elektrony



Rys. 17.20. Dzięki ogniwom słonecznym możemy zamienić energię promieniowania Słońca w energię elektryczną

nie wydostają się poza materiał, ale poruszają swobodnie w jego obrębie i mogą przewodzić prąd elektryczny, podobnie jak w metalach. Zjawisko to stanowi podstawę działania ogniw słonecznych (rys. 17.20).

Zjawiska fotochemiczne

To szeroka klasa reakcji chemicznych zachodzących tylko pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego o odpowiedniej częstotliwości. Należy do nich wytwarzanie melaniny (ciemnego barwnika skóry) pod wpływem fotonów o wysokiej energii, należących do ultrafioletu. Dlatego do opalania się jest niezbędny ultrafiolet. Światłem widzialnym o bardzo dużym natężeniu można się poparzyć, ale nie da się opalić.
Także pochłanianie światła przez komórki siatkówki oka (czopki i pręciki) odbywa się tylko dla fotonów o odpowiedniej energii. Dlatego nie widzimy podczerwieni.

Opalić można się także promieniowaniem rentgenowskim lub gamma, ale potrzebna do tego dawka byłaby śmiertelna.

Siatkówka ludzkiego oka jest czuła na ultrafiolet, ale nie dociera on tam, ponieważ wcześniej jest pochłaniany przez płyny w gałce ocznej.

Jonizacja i zrywanie wiązań cząsteczkowych

Promieniowanie ultrafioletowe, rentgenowskie albo gamma może spowodować wyrwanie elektronu z atomu, czyli jego jonizację (zamianę w jon). Wybicie elektronu z atomu cząsteczki chemicznej oznacza zerwanie wiązania. Zniszczenie cząsteczek wchodzących w skład organizmu człowieka może prowadzić – nawet po wielu latach – do chorób nowotworowych.
Natomiast światło widzialne, podczerwień lub mikrofale nie mogą powodować tych zjawisk, gdyż energia pojedynczego fotonu jest na to za mała.
Nadfiolet może więc powodować raka skóry, natomiast nie stwierdzono dotąd, aby mikrofale, służące również do łączności komórkowej, mogły powodować negatywne skutki zdrowotne (inne niż poparzenie w przypadku bardzo dużego natężenia).

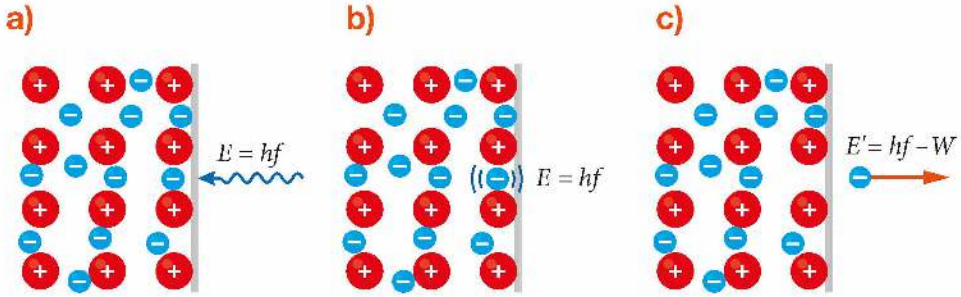
Fale czy cząstki?

Przez wiele lat fizycy się zastanawiali, czy światło jest falą czy strumieniem cząstek. Wydawało się, że na początku XIX w. ostatecznie wyjaśniono tę sprawę: dyfrakcja i interferencja dowiodły, że światło jest falą. Jednak sto lat później odkryto, że światło składa się z niepodzielnych kwantów, które pod wieloma względami zachowują się jak cząstki.
Ostatecznie ustalono, że światło jest obiektem zupełnie nowego rodzaju, który ma część własności podobnych do cząstek, a część – do fal.

Praca wyjścia

Powiedzieliśmy, że aby elektron został wybity z metalu, musi osiągnąć pewną minimalną energię. Zyskuje ją po pochłonięciu fotonu. Wiemy też, że dla różnych metali różna jest graniczna częstotliwość światła, dla

której zachodzi zjawisko fotoelektryczne, a więc także graniczna energia fotonu. Tę graniczną energię nazywamy tradycyjnie **pracą wyjścia** i oznaczamy W.



Rys. 17.21. Bilans energetyczny zjawiska fotoelektrycznego: a) foton o energii hf pada na powierzchnię metalu, b) elektron pochłania energię fotonu, c) wybity elektron ma energię kinetyczną mniejszą o W od energii fotonu

Zatem elektron po pochłonięciu fotonu promieniowania o częstotliwości f zyskuje energię:

$$E = hf$$

której część zostaje wykorzystana na pracę wyjścia (rys. 17.21). Oznacza to, że po wybiciu z metalu energia elektronu jest równa co najwyżej:

$$E' = hf - W$$

W przypadku dodatkowych strat energii, np. gdy elektron przed opuszczeniem metalu zderza się z jego jonami, energia elektronu jest mniejsza. W granicznym przypadku $hf = W$.

Elektronowolt

Wyrażanie energii elektronu w dżulach jest niewygodne, ponieważ trzeba posługiwać się bardzo małymi liczbami. W fizyce mikroświata częściej używamy znacznie mniejszej jednostki – elektronowoltów.

> Elektronowolt (1 eV) to energia, jaką zyskuje elektron rozpędzający się w polu elektrycznym pod napięciem 1 V.

Tak więc:

$$1\ \text{eV} = e \cdot 1\ \text{V} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1\ \text{V} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

$$1\ \text{J} = \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}}\ \text{eV} = 6{,}25 \cdot 10^{18}\ \text{eV}$$

Aby lepiej zrozumieć, dlaczego elektronowolt jest jednostką energii, warto przypomnieć sobie, że zgodnie z definicją wolta 1 J = 1 C · 1 V, a więc dżul można by inaczej nazwać kulombowoltem. W tabeli 17.1 podajemy prace wyjścia dla różnych metali w elektronowoltach.

Tabela 17.1. Praca wyjścia dla wybranych metali

Metal	Praca wyjścia [eV]
Arsen	5,1
Bar	2,5
Cez	2,1
Cynk	4,3
Glin (aluminium)	4,2
Lit	2,4
Miedź	4,5
Ołów	4,0
Platyna	5,3
Potas	2,2
Rubid	2,2
Sód	2,75
Srebro	4,7
Stront	2,5
Wolfram	4,6
Złoto	4,4

W obliczeniach przydatna będzie także stała Plancka przeliczona na jednostkę eV · s:

$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s} = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 6{,}25 \cdot 10^{18}\ \text{eV} \cdot \text{s} = 4{,}14 \cdot 10^{-15}\ \text{eV} \cdot \text{s}$

Podsumujmy:

$1\ \text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J} \quad 1\ \text{J} = 6{,}25 \cdot 10^{18}\ \text{eV} \quad h = 4{,}14 \cdot 10^{-15}\ \text{eV} \cdot \text{s}$

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać zjawisko fotoelektryczne;
- opisywać światło jako strumień fotonów;
- stosować zależność między energią fotonu a częstotliwością i długością fali.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Światło fioletowe wybija z elektrody cezowej elektrony, które następnie są rozpędzane w polu elektrycznym pod napięciem $U = 10$ V. Ile maksymalnie może wynosić końcowa prędkość wybitego elektronu?

Rozwiązanie

Aby obliczyć prędkość elektronu, najpierw musimy obliczyć jego energię. Przeanalizujmy zatem przemiany energii zachodzące w omawianym zjawisku. Elektron:

- najpierw zyskuje energię, gdy pochłania foton,
- następnie traci jej część, równą pracy wyjścia, aby wyrwać się z metalu,
- może tracić energię także na przykład podczas zderzeń z jonami, jednak te straty możemy pominąć, ponieważ interesuje nas prędkość – a więc też energia – maksymalna,
- na koniec zyskuje dodatkową energię w polu elektrycznym.

Zacznijmy od obliczenia energii fotonu:

$$E_{\text{fot}} = hf$$

Ponieważ znamy długość fali, a nie jej częstotliwość, korzystamy z zależności $c = \lambda f$ i otrzymujemy wzór:

$$E_{\text{fot}} = \frac{hc}{\lambda}$$

Długość fali światła fioletowego (oraz wartości stałych c i h) możemy odczytać z tablic na końcu podręcznika. Interesująca nas długość fali wynosi $\lambda = 400$ nm. Obliczamy energię fotonu światła fioletowego:

$$E_{\text{fot}} = \frac{4{,}14 \cdot 10^{-15}\,\text{eV} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{400 \cdot 10^{-9}\,\text{m}} \approx 3{,}1\ \text{eV}$$

Aby obliczyć energię po wybiciu elektronu z cezu, musimy uwzględnić jego pracę wyjścia. Odczytujemy jej wartość z tablic: $W = 2{,}1$ eV. Stąd:

$$E_e = 3{,}1 \text{ eV} - 2{,}1 \text{ eV} = 1 \text{ eV}$$

Zgodnie z definicją elektronowolta: w polu elektrycznym pod napięciem 10 V elektron zyskuje energię 10 eV, więc jego końcowa energia kinetyczna wyniesie:

$$E_k = 11 \text{ eV} \approx 1{,}76 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Gdy wyznaczymy prędkość ze wzoru na energię kinetyczną:

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

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}}$$

i podstawimy masę elektronu znalezioną w tablicach: $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, otrzymamy:

$$v \approx 1{,}97 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1970 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Odpowiedź: Elektron będzie się poruszał z prędkością co najwyżej ok. 1970 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

1. Oblicz maksymalną i minimalną energię fotonów światła widzialnego, czyli światła o długości fali pomiędzy $\lambda_1 = 380$ nm i $\lambda_2 = 780$ nm. Odpowiedź podaj w elektronowoltach. Jakiej barwie odpowiada maksymalna, a jakiej minimalna energia fotonu?

2. Oblicz długość fali promieniowania, jakim trzeba oświetlić elektrodę z platyny, aby wyrywane z niej elektrony poruszały się z prędkością mniejszą niż 1000 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$. Do jakiego zakresu fal należy takie promieniowanie?

3. Oblicz maksymalną prędkość elektronu wybitego z rubidu przez światło fioletowe o długości fali $\lambda = 380$ nm.

4. Oszacuj, ile fotonów emituje w ciągu sekundy lampa LED o mocy 10 W i sprawności 50%.

17.4. Foton jako cząstka

Przypomnij sobie

- Światło składa się z niepodzielnych porcji, zwanych kwantami światła albo fotonami.
- Energia fotonu zależy do jego częstotliwości zgodnie ze wzorem $E = hf$, gdzie h jest stałą Plancka.

Foton

Słowo *światło* może oznaczać albo tylko światło widzialne, albo także podczerwień i nadfiolet.

Kiedy Max Planck wyjaśniał promieniowanie ciała doskonale czarnego, a Albert Einstein – zjawisko fotoelektryczne, obaj naukowcy mówili o kwantach, czyli porcjach światła lub innego promieniowania elektromagnetycznego.

Później jednak kwant promieniowania uznano za cząstkę elementarną i nadano mu nazwę **foton**, brzmiącą podobnie jak proton czy elektron. Nazwa ta pochodzi od greckiego słowa *fos*, w dopełniaczu *fotos*, które oznacza światło.

Pęd fotonu

Ważną cechą fotonu, która upodabnia go do innych cząstek elementarnych, jest posiadanie pędu. **Nie można** go jednak obliczać ze znanej ci zależności $p = mv$. Wzór ten nie obowiązuje także dla innych cząstek poruszających się z prędkościami zbliżonymi do prędkości światła, takich jak elektron rozpędzony w akceleratorze.

Pęd fotonu o częstotliwości f i energii E wyznaczamy z zależności:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{E}{c}$$

Podobnie jak w przypadku innych ciał, wektor pędu fotonu jest skierowany w stronę, w którą porusza się foton.

Spróbujmy oszacować pęd światła, z jakim mamy do czynienia na co dzień. Przeciętna lampa LED o mocy 10 W i sprawności 50% emituje w ciągu 1 s światło o energii 5 J, czyli fotony o łącznej energii 5 J. Załóżmy, że jest ono emitowane w jednym kierunku (w tym celu można zastosować odpowiednie zwierciadło). Łączny pęd fotonów wynosi:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{5\,\mathrm{J}}{3 \cdot 10^8\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} \approx 1{,}67 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

$$[p] = \frac{\mathrm{J}}{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = \frac{\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{m}} = \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{m}} = \mathrm{N} \cdot \mathrm{s} = \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot \mathrm{s} = \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Gdy poświecimy taką lampą na ciemne pudełko, absorbuje (pochłania) ono fotony i przejmuje ich pęd, a więc zgodnie z drugą zasadą dynamiki działa na nie siła:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{1{,}67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{1\ \mathrm{s}} = 1{,}67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{N}$$

Druga zasada dynamiki, cz. I s. 211
$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$

Nic więc dziwnego, że po włączeniu lampki pudełko nie zacznie się przesuwać – siła wywołana przez światło jest miliony razy za mała, aby przezwyciężyć tarcie. Pokrycie pudełka srebrzystą folią pozwoliłoby zwiększyć tę siłę dwukrotnie, ponieważ foton nie zatrzymałby się, ale odleciał z powrotem, czyli zmiana pędu byłaby dwukrotnie większa. To jednak niewiele by pomogło.

Podobnie gdy włączamy latarkę, nie czujemy szarpnięcia podobnego do odrzutu broni palnej. Mimo tak niewielkiej wartości pęd światła znalazł praktyczne zastosowanie (patrz „A to ciekawe" poniżej).

Odrzut przy emisji fotonu

Jednym z pierwszych zjawisk demonstrowanych przy okazji omawiania zasady zachowania pędu dla ciał makroskopowych jest zjawisko odrzutu. Wypuszczony z ręki nadmuchany, ale niezawiązany balonik lata bezładnie po całym pokoju, a strzelba zaczyna się poruszać wstecz, gdy wystrzeli pocisk. Odrzut przy włączeniu latarki jest zbyt słaby, aby go obserwować, ponieważ masa latarki w skali atomowej jest ogromna. Jednak na poziomie poszczególnych atomów można zaobserwować zjawisko odrzutu.

Odrzut, cz. I s. 213

Skoro foton ma swój pęd, z zasady zachowania pędu wynika, że:

- atom emitujący foton zyskuje pewien pęd i zaczyna się poruszać w przeciwną stronę niż wyemitowany foton (rys. 17.22),

Zasada zachowania pędu, cz. I s. 213

Jeśli na układ ciał nie działają siły zewnętrzne lub działające siły się równoważą, to suma pędów ciał w tym układzie nie ulega zmianie.

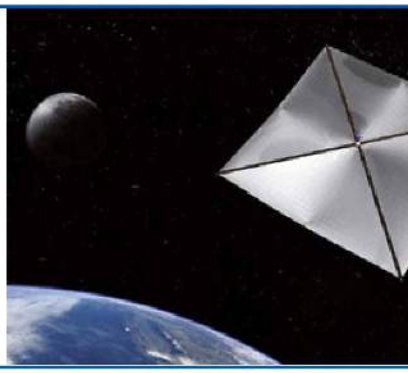


Rys. **17.22.** Zmiana pędu atomu przy emisji fotonu

A to ciekawe

Jeżeli w przestrzeni kosmicznej rozepniemy dużą odblaskową powierzchnię, zwaną żaglem słonecznym, to światło słoneczne może wprawić ją w ruch, ponieważ pęd fotonów przy odbiciu zmienia się na przeciwny. W kosmosie nie ma tarcia ani oporu ośrodka, który równoważyłby siłę wynikającą z nacisku fotonów.

Pierwszym pojazdem kosmicznym napędzanym żaglem słonecznym była japońska sonda kosmiczna IKAROS, która w 2010 r. dotarła do Wenus.



- atom absorbujący foton także zyskuje pewien pęd i zaczyna się poruszać w tym samym kierunku, w którym wcześniej poruszał się foton (rys. 17.23).



Rys. **17.23.** Zmiana pędu atomu przy absorpcji fotonu

Przy badaniu odrzutu atomów możemy – podobnie jak dla ciał makroskopowych – korzystać zarówno z zasady zachowania pędu, jak i zasady zachowania energii. W przypadku energii fotonu stosujemy wzór $E = hf$, natomiast dla atomu – wzór na energię kinetyczną $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. Zastosowanie obu tych zasad zachowania przedstawiamy w przykładzie poniżej.

Po tej lekcji powinieneś

- korzystać ze wzoru na pęd fotonu;
- korzystać z zasady zachowania pędu i zasady zachowania energii do opisu odrzutu atomów przy emisji i absorpcji fotonu;
- wyjaśniać, dlaczego zjawisk związanych z odrzutem atomów nie obserwujemy w życiu codziennym.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Spoczywający pojedynczy atom neonu o masie atomowej 20,18 u absorbuje (pochłania) foton o długości fali 540 nm, a następnie emituje foton w przeciwną stronę. Oblicz prędkość atomu po emisji fotonu. Oblicz, o ile mniejszą częstotliwość będzie miał wyemitowany foton w stosunku do fotonu pochłoniętego.

Uwagi. Przez długość fali rozumiemy tu jej długość w próżni. Prędkość uzyskana przez atom w wyniku odrzutu jest na tyle mała, że możesz korzystać ze znanych ci wzorów na pęd i energię kinetyczną.

Rozwiązanie

Przeliczmy najpierw masę atomu na kilogramy ($1\ \text{u} = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$), a długość fali absorbowanego fotonu na metry: $m = 20{,}18\ \text{u} \approx 3{,}35 \cdot 10^{-26}\ \text{kg}$, $\lambda_1 = 540\ \text{nm} = 5{,}4 \cdot 10^{-7}\ \text{m}$.

Pochłonięty foton miał pęd o wartości:

$$p_1 = \frac{hf_1}{c}$$

a wyemitowany foton pęd o wartości:

$$p_2 = \frac{hf_2}{c}$$

Zwrot pędu wyemitowanego fotonu był przeciwny do zwrotu pędu pochłoniętego fotonu, więc pęd atomu zmienił się o:

$$p = \frac{h}{c}(f_1 + f_2)$$

Taki też był końcowy pęd atomu. Skoro więc $p = mv$, to mamy:

$$mv = \frac{h}{c}(f_1 + f_2) \qquad (1)$$

gdzie v to końcowa prędkość atomu (po wyemitowaniu fotonu).
Energia kinetyczna, jaką uzyskał atom, jest równa różnicy energii fotonów:

$$E_k = E_1 - E_2$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = h(f_1 - f_2) \qquad (2)$$

Otrzymaliśmy zatem układ dwóch równań (1) i (2) z niewiadomymi v oraz f_2, gdyż wielkość f_1 łatwo obliczymy:

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1}$$

Przekształcamy równanie (1) i otrzymujemy układ:

$$\begin{cases} mvc = h(f_1 + f_2) \\ \frac{1}{2}mv^2 = h(f_1 - f_2) \end{cases}$$

Wystarczy dodać je stronami, aby uzyskać zależność:

$$mvc + \frac{1}{2}mv^2 = 2hf_1$$

Po uporządkowaniu i wstawieniu wzoru na f_1 otrzymujemy równanie kwadratowe z niewiadomą v:

$$\frac{1}{2}mv^2 + mcv - 2h\frac{c}{\lambda_1} = 0$$

Gdy je rozwiążemy, otrzymamy:

$$v = \sqrt{c^2 + \frac{4hc}{m\lambda_1}} - c$$

Po podstawieniu wartości liczbowych dostajemy: $v \approx 7{,}33 \cdot 10^{-2}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$.
Teraz ze wzoru (2) możemy od razu wyznaczyć interesującą nas różnicę $f_1 - f_2$:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h(f_1 - f_2) \quad \rightarrow \quad f_1 - f_2 = \frac{mv^2}{2h}$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy: $f_1 - f_2 \approx 136\,\text{kHz}$.
Jest to znikoma wielkość wobec częstotliwości fotonu (jednak nawet taką różnicę potrafimy zmierzyć!):

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} \approx 5{,}6 \cdot 10^{14}\,\text{Hz}$$

Odpowiedź: Atom zacznie się poruszać z prędkością ok. 73 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$. Częstotliwości fotonów pochłoniętego i wysłanego różnią się o 136 kHz.

Zadania s. 152

Pytania i zadania

1. Wartość pędu fotonu o energii E można zapisać w postaci $p=\frac{E}{c}$. Czy dla ciał makroskopowych jest podobnie, tzn. czy ich pęd równy jest $\frac{E_k}{v}$, gdzie E_k jest energią kinetyczną, a v – prędkością?

2. Na lodowisku stoi pingwin na płozach, służący dzieciom do nauki jazdy. Zakładamy, że może się on poruszać po lodzie bez tarcia. W pingwina uderza od tyłu piłka o masie 200 g, nadlatująca z prędkością 10 $\frac{m}{s}$. Tuż przed zderzeniem i tuż po nim piłka porusza się poziomo. Załóżmy, że to zderzenie jest sprężyste. Oblicz, jaką część energii utraci piłka, jeśli masa pingwina wynosi:

a) 2 kg,

b) 8 kg.



3. Foton promieniowania rentgenowskiego o długości fali 70 pm odbija się od swobodnego atomu węgla tak, że zwrot jego prędkości zmienia się na przeciwny. O jaki procent zmniejszy się energia fotonu po odbiciu?

4. Jaką masę musiałoby mieć swobodne ciało, aby odbijający się od niego foton światła fioletowego zmieniał się w foton światła niebieskiego?

5. Obejrzyj film *How does laser cooling work?* (adres na s. 309 i pod kodem QR). Zapisz odpowiedź na tytułowe pytanie w kilku zdaniach. Wyjaśnij poniższe zagadnienia.

a) Dlaczego atom gazu absorbuje foton światła laserowego tylko wtedy, gdy zbliża się do lasera, a nie wtedy, gdy się od niego oddala?

b) Foton zostaje zaabsorbowany, a więc jego energia zostaje pochłonięta przez atom. Jednak atom zwalnia, a więc jego energia kinetyczna się zmniejsza. Jak to pogodzić z zasadą zachowania energii?

c) W jaki sposób z gazu odpływa energia nawet nieco większa niż dostarczona przez lasery?

d) Jakie praktyczne zastosowanie ma ta metoda?

17.5. Falowa natura materii

Przypomnij sobie

- Światło ulega dyfrakcji i interferencji, więc jest falą.
- Wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego jest możliwe przy założeniu, że światło składa się z fotonów.

Fala i cząstka

W poprzednim rozdziale wykonywaliśmy doświadczenia dowodzące falowej natury promieniowania elektromagnetycznego: sprawdzaliśmy, że dla tego promieniowania zachodzą interferencja i dyfrakcja. Z drugiej jednak strony efekt fotoelektryczny świadczy o tym, że promieniowanie elektromagnetyczne składa się z fotonów, czyli cząstek (korpuskuł).

Dyfrakcja i interferencja fal elektromagnetycznych, s. 22

W zależności od rodzaju eksperymentu lub obserwacji ujawniają się albo falowe, albo cząstkowe własności światła. Ten stan rzeczy nazywamy **dualizmem korpuskularno-falowym**.

Innymi słowy, światło ma dwoisty charakter: jest jednocześnie falą i strumieniem cząstek.

Materia i fale

W 1923 r. francuski fizyk Louis de Broglie (czytaj: lui de broj) w swojej rozprawie doktorskiej zaproponował nowe spojrzenie na ten problem. Skoro promieniowanie elektromagnetyczne jest zarówno falą, jak i cząstkami, to taką samą własność powinna mieć też zwykła materia. W zależności od rodzaju prowadzonej obserwacji jej przedmiot, czyli na przykład elektrony, powinien się zachowywać albo jak cząstki, albo jak fale.



Rys. 17.24. Louis de Broglie

Hipoteza de Broglie'a zakłada, że:

> Każdej cząstce odpowiada fala materii o długości:
>
> $$\lambda = \frac{h}{p}$$
>
> gdzie p oznacza pęd cząstki, a h to stała Plancka.

Równanie to było wzorowane na wzorze na pęd fotonu (patrz zad. 4. s. 159).

Długość fali wyznaczoną z powyższej zależności nazywamy **długością fali de Broglie'a**.

Ponieważ stała Plancka wyraża się bardzo małą liczbą, obiekty makroskopowe mają bardzo małe długości fali de Broglie'a. Na co dzień obserwujemy jedynie ich korpuskularną naturę. Na przykład z pociskiem

o masie 3,4 g lecącym z prędkością 900 $\frac{m}{s}$ jest związana fala o długości rzędu 10^{-34} m, więc pocisk zawsze zachowuje się jak cząstka. Aby zaobserwować jego falową naturę, np. dyfrakcję na szczelinie, musielibyśmy dysponować szczeliną o szerokości zbliżonej do długości tej fali, czyli 10^{-34} m.

Aby zrozumieć, jak mała jest to wielkość, porównajmy ją z promieniem atomu, którego długość wynosi 10^{-10} m. Szczelina pozwalająca zaobserwować falową naturę pocisku musiałaby być tyle razy mniejsza od atomu, ile razy atom jest mniejszy od Układu Słonecznego. Tymczasem sam pocisk ma rozmiary ok. 10^{-2} m.

Jednak w przypadku cząstek o małej masie (np. elektronów) efekty falowe są możliwe do zaobserwowania.

Średnica Układu Słonecznego (do orbity Plutona) wynosi 12 mld km = $= 1{,}2 \cdot 10^{13}$ km.

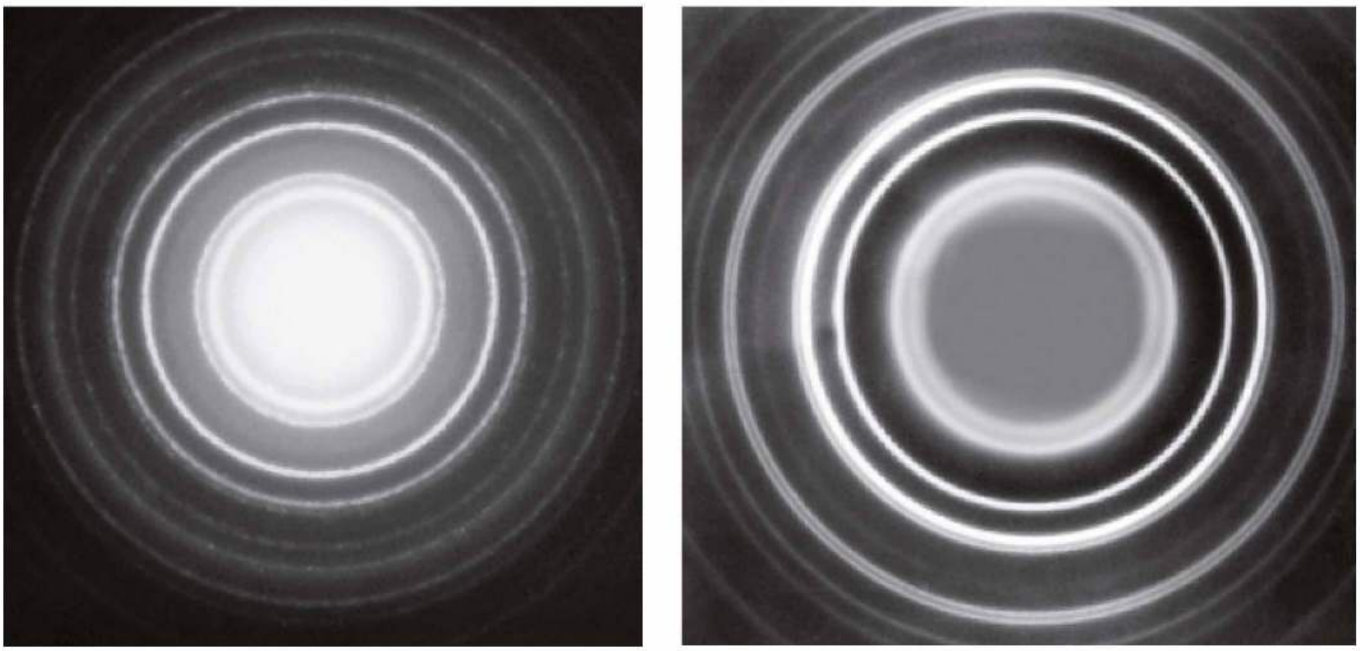
Doświadczalny dowód falowej natury materii

Ostatecznym dowodem falowej natury światła było zaobserwowanie interferencji. Podobnie stało się z falami materii.

Już w 1925 r. Amerykanie Clinton Davisson i Lester Germer, a w 1927 r. również Brytyjczyk George Thomson zaobserwowali, że strumień elektronów ulega dyfrakcji oraz interferencji na sieci krystalicznej, będącej naturalną siatką dyfrakcyjną. Uzyskali oni obraz interferencyjny ukazujący elektrony w taki sposób, jak gdyby były falami o określonej długości.

Clinton Davisson i George Thompson dostali w 1937 r. Nagrodę Nobla „za eksperymentalne odkrycie dyfrakcji elektronów na kryształach".

a) b)

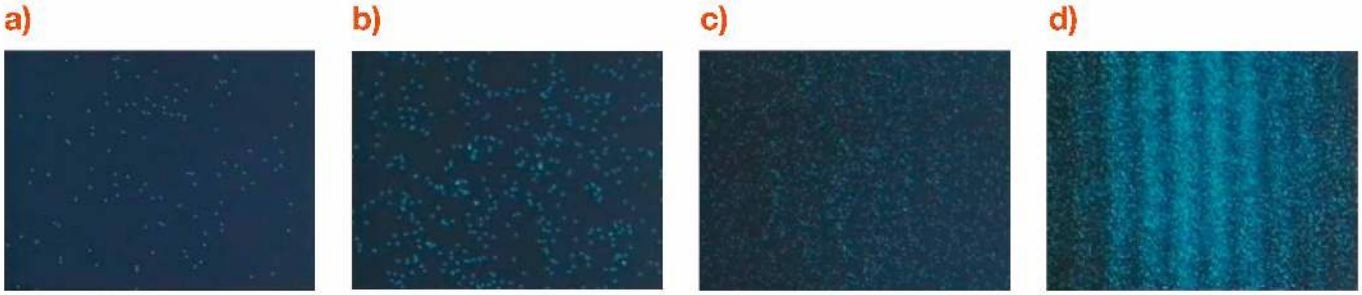


Rys. **17.25.** Obrazy interferencyjne uzyskane po dyfrakcji elektronów na sieci krystalicznej cyrkonu (a) i promieniowania rentgenowskiego na krysztale złota (b). Białe i czarne obszary odpowiadają wzmacnianiu i wygaszaniu się fali

Falowa natura pojedynczej cząstki

Stosunkowo nietrudno zaakceptować falową naturę strumienia elektronów. Można sobie wówczas wyobrazić, że elektrony interferują ze sobą nawzajem. Nie jest to jednak prawidłowe wyjaśnienie, o czym przekonuje nas następujący eksperyment.

Jeśli w doświadczeniu podobnym do doświadczenia Younga na przesłonę z dwiema szczelinami będziemy kierować pojedyncze elektrony, powiedzmy co 1 sekundę, także powstanie obraz interferencyjny. Stanie się tak, mimo że w chwili wysyłania kolejnego elektronu poprzedni będzie już dawno pochłonięty przez ekran.



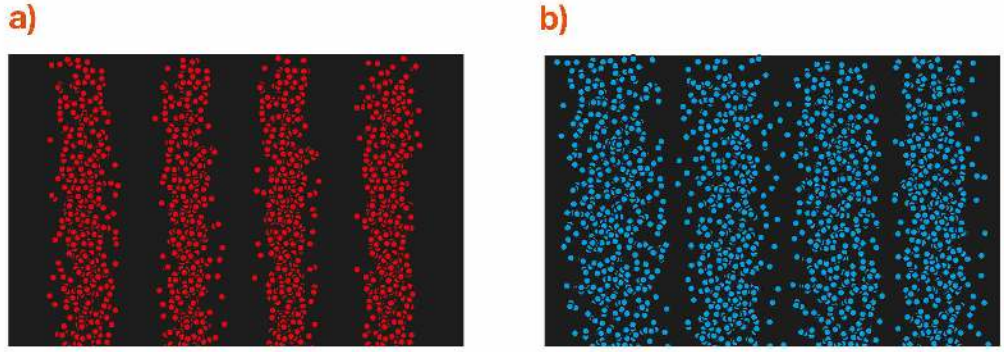
Rys. **17.26.** Tworzenie obrazu interferencyjnego przez elektrony

Właśnie ta obserwacja potwierdza, że właściwości falowe ma nie tylko strumień elektronów, lecz także pojedynczy elektron. Nie oznacza to jednak, że każdy elektron z osobna tworzy prążki interferencyjne.

Na rysunku 17.26 przedstawiono kolejne etapy powstawania takiego obrazu. Każdy elektron trafia w losowe miejsce ekranu i tworzy jasną plamkę.

Jednak prawdopodobieństwo takiego zdarzenia nie jest takie samo dla każdego punktu ekranu. Tam, gdzie jest większe, trafia statystycznie więcej elektronów i tam też tworzą się prążki.

Jak wynika z rysunku 17.27, sytuacje dla fotonów i elektronów są jednakowe. Gdy natężenie światła jest tak małe, że z jego źródła co kilka sekund są emitowane pojedyncze fotony, nie widzimy od razu prążków interferencyjnych, a jedynie ślady uderzeń pojedynczych fotonów. Dopiero po bardzo dużej liczbie uderzeń ślady te zlewają się i tworzą prążki.

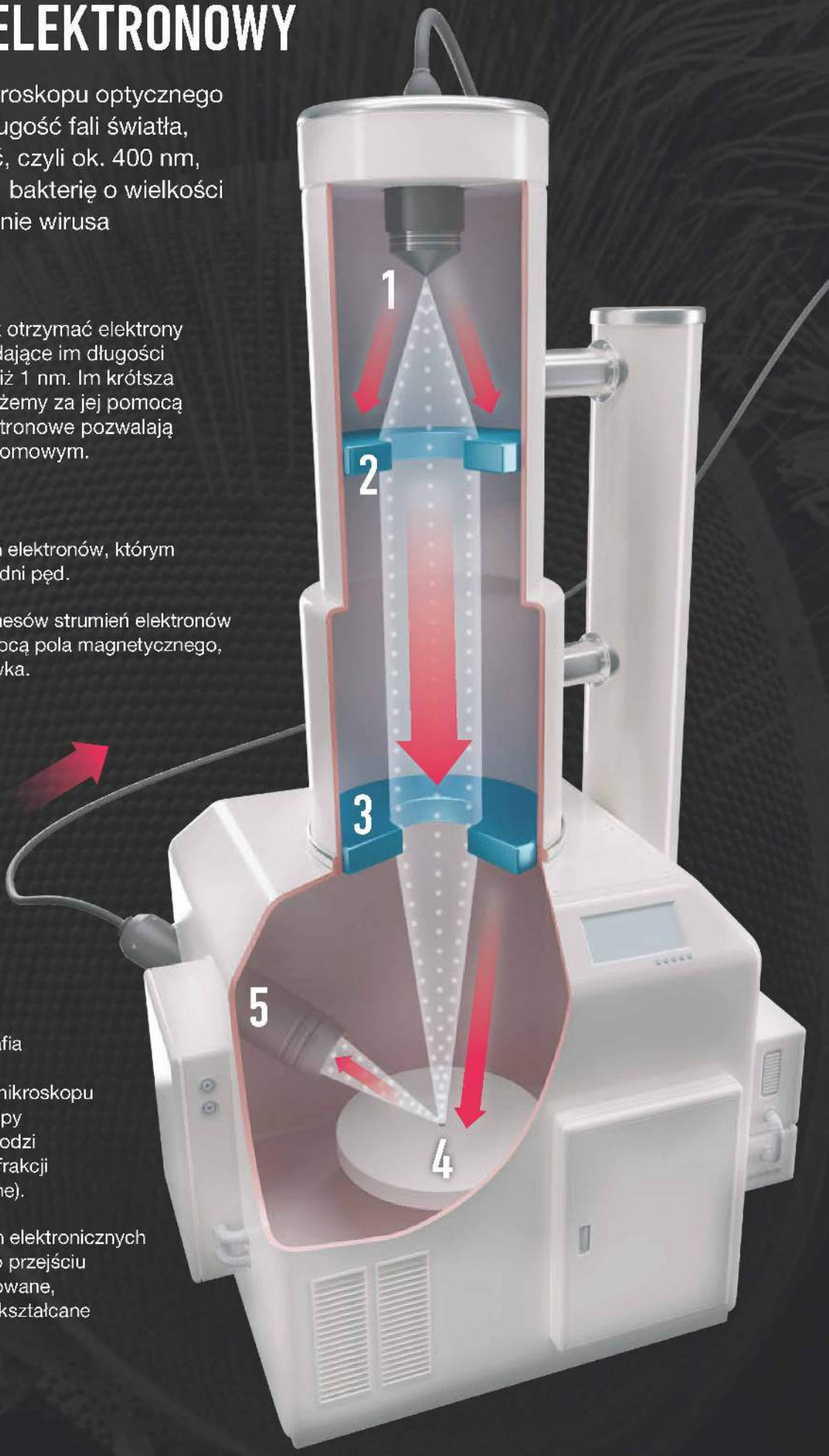


Rys. **17.27.** Elektrony (a) i fotony (b) przechodzące przez układ z podwójną szczeliną tworzą bardzo podobne obrazy interferencyjne. Na rysunku przedstawiono wyniki symulacji komputerowej tego zjawiska

MIKROSKOP ELEKTRONOWY

Zdolność rozdzielcza mikroskopu optycznego jest ograniczona przez długość fali światła, jaką możemy zastosować, czyli ok. 400 nm, co pozwala oglądać m.in. bakterię o wielkości 2 μm (czyli 2000 nm), ale nie wirusa o wielkości 50 nm.

Stosunkowo łatwo jest jednak otrzymać elektrony o pędach takich, że odpowiadające im długości fali de Broglie'a są mniejsze niż 1 nm. Im krótsza fala, tym mniejsze obiekty możemy za jej pomocą zobrazować. Mikroskopy elektronowe pozwalają badać materię na poziomie atomowym.



1 Źródło emituje strumień elektronów, którym nadawany jest odpowiedni pęd.

2 W układzie elektromagnesów strumień elektronów jest formowany za pomocą pola magnetycznego, działającego jak soczewka.

3 W kolejnym układzie elektromagnetycznym wiązka jest skupiana.

4 Strumień elektronów trafia na powierzchnię próbki i w zależności od typu mikroskopu ulega odbiciu (mikroskopy skaningowe) lub przechodzi przez próbkę i ulega dyfrakcji (mikroskopy transmisyjne).

5 W specjalnych układach elektronicznych elektrony po odbiciu lub przejściu przez próbkę są rejestrowane, a uzyskane dane – przekształcane na obraz powierzchni.

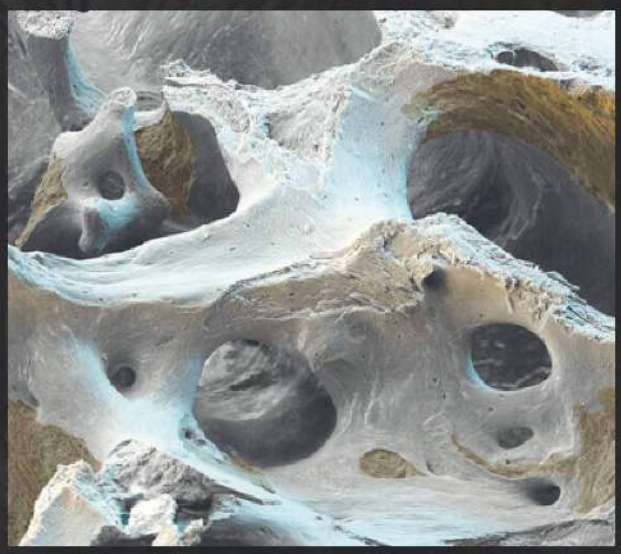


głowa motyla

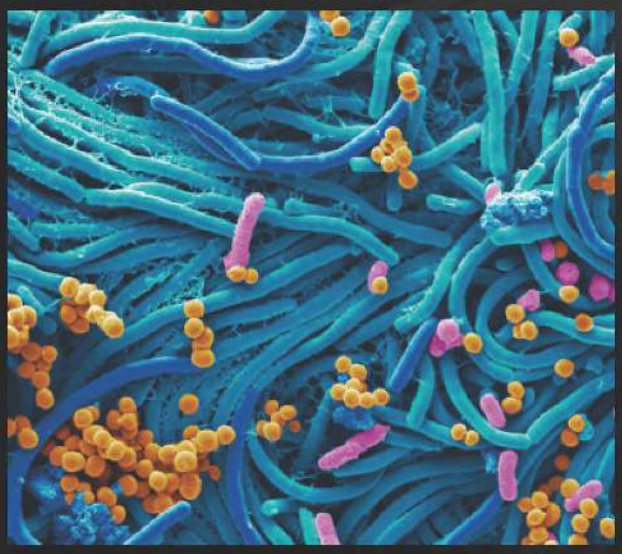
6 Na monitorze jest wyświetlany czarno-biały obraz powierzchni w powiększeniu nawet 10 mln razy.

7 Kolory na zdjęciu uzyskuje się w wyniku cyfrowej obróbki obrazu.

kość



bakterie na telefonie



liść pomidora



azotan sodu



Co w tych falach faluje?

Fale mechaniczne polegają na rozchodzeniu się drgań mechanicznych, czyli na okresowych zmianach położenia cząsteczek ośrodka, a fale elektromagnetyczne – na rozchodzeniu się okresowych zmian pola elektrycznego i magnetycznego. Czy fala materii także jest związana z okresowymi zmianami jakiejś wielkości?

Tak, zachodzą wówczas zmiany wielkości, której do tej pory nie omawialiśmy. Chodzi o ampilitudę **fali prawdopodobieństwa**. Wielkość ta pozwala obliczyć prawdopodobieństwo, że cząstka znajdzie się w danym czasie w tym czy innym miejscu.

Prawa fizyki rządzące zachowaniem cząstek mających właściwości falowe – a więc wszystkich bardzo małych cząstek materii – opisuje teoria o nazwie **mechanika kwantowa**.

Warto wiedzieć, że zgodnie z nią nie da się jednoznacznie przewidzieć, w jaki sposób zajdzie zjawisko fizyczne, a jedynie obliczyć prawdopodobieństwo jego zajścia. Na przykład możemy obliczyć prawdopodobieństwo uderzenia fotonu w daną część ekranu i zweryfikować swoje obliczenia dzięki zbadaniu wielu fotonów. Nie przewidzimy jednak, gdzie uderzy jeden konkretny foton.

Czy dla ciał makroskopowych również można stosować prawa fizyki kwantowej? Tak, choć byłoby to niepotrzebnym utrudnieniem. W tym przypadku prawdopodobieństwo, że zachowają się one zgodnie z prawami fizyki klasycznej, różni się od 1 w tak niewielkim stopniu, że rozsądniej jest tę różnicę pominąć.

Po tej lekcji powinieneś

- wiedzieć, na czym polega dualizm korpuskularno-falowy;
- rozumieć hipotezę de Broglie'a o falowych własnościach materii;
- opisywać doświadczenia ujawniające falową naturę materii;
- wyjaśniać budowę i zasadę działania mikroskopu elektronowego.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Z jaką prędkością muszą się poruszać elektrony, aby można było ich użyć do obserwacji pojedynczych atomów? Zakładamy, że w tym celu długość fali powinna być równa średnicy atomu. Jakie napięcie jest potrzebne, aby rozpędzić elektron do takiej prędkości?

Rozwiązanie

Sprawdzamy w tablicach fizycznych lub w części 1. podręcznika, że średnica atomu jest rzędu 0,1 nm. Z założeń zadania wynika, że taką samą długość fali de Broglie'a powinny mieć elektrony. Długość tej fali z szukaną prędkością v jest związana zależnością:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

z której wyznaczamy prędkość:

$$v = \frac{h}{m \cdot \lambda}$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$v = 7{,}28 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 7300 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Musimy jeszcze obliczyć napięcie potrzebne do przyspieszenia elektronów. Jak wiesz, napięcie to różnica potencjałów, czyli różnica elektrycznej energii potencjalnej ładunku w dwóch punktach pola elektrycznego. W opisywanym przypadku elektron przemieścił się z punktu, w którym elektryczna energia potencjalna była wyższa, do punktu, w którym była ona niższa. Różnica energii zmieniła się w energię kinetyczną. Skoro znamy już prędkość, jaką musi mieć elektron, możemy obliczyć tę ostatnią wielkość:

$$E_\text{k} = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot (7{,}28 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \approx 2{,}412 \cdot 10^{-17}\ \text{J}$$

Ponieważ zadanie dotyczy elektronu, dalsze rachunki będą prostsze, gdy przeliczymy energię na elektronowolty:

$$E_\text{k} \approx 151\ \text{eV}$$

Zgodnie z definicją elektron zyskuje energię 1 eV, gdy rozpędzające go napięcie wynosi 1 V. Analogicznie zyskuje on energię 151 eV, gdy rozpędzające go napięcie wynosi 151 V.

Odpowiedź: Elektron trzeba rozpędzić do prędkości ok. 7300 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$. Potrzebne jest do tego napięcie ok. 151 V.

Uwaga. Rozdzielczość mikroskopu elektronowego ma więcej ograniczeń niż sama długość fali de Broglie'a, dlatego stosuje się wyższe napięcia, czyli elektrony o większym pędzie i krótszej fali.

1. Ile wynosi długość fali de Broglie'a elektronu przyspieszanego różnicą potencjałów 100 V?

2. Jaką prędkość musiałby mieć elektron, aby długość odpowiadającej mu fali de Broglie'a była równa długości fali światła żółtego?

3. Oblicz długość fali de Broglie'a dla piłki tenisowej o masie 65 g i prędkości 60 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ (z taką mniej więcej prędkością porusza się ona tuż po mocnym serwisie). Wyjaśnij, dlaczego nie obserwujemy dyfrakcji ani interferencji, gdy piłka trafi w siatkę pośrodku boiska.

4. Wykaż, że także dla fotonów jest spełniony wzór na długość fali de Broglie'a.

5. Zapoznaj się z artykułem *Coraz bliżej kota* (adres na s. 309 i pod kodem QR). Oblicz, ile razy masa wymienionej w nim rekordowej substancji, dla której zaobserwowano interferencję, jest większa od masy elektronu. Możesz poszukać informacji, czy od czasu publikacji artykułu rekord został pobity.

17.6. Widma emisyjne i absorpcyjne gazu

Przypomnij sobie

- Z rozszczepienia światła białego otrzymujemy tęczę, czyli barwy płynnie przechodzące od czerwonej do fioletowej.
- Atomy mogą absorbować i emitować fotony.

Widma ciągłe i dyskretne

W poprzednim rozdziale badaliśmy rozkład światła białego na poszczególne barwy (częstotliwości) m.in. dzięki zjawisku załamania. Otrzymywaliśmy **widmo ciągłe** – barwy płynnie przechodzące jedna w drugą. Jak powiedzieliśmy w pierwszym temacie tego rozdziału, widmo promieniowania ciała doskonale czarnego zawsze jest ciągłe. Okazuje się jednak, że istnieją także widma nieciągłe. Zbadamy to w prostym doświadczeniu.



Doświadczenie 19 – obowiązkowe

Obserwacja widma atomowego za pomocą siatki dyfrakcyjnej

1. Przygotuj lampkę ze świetlówką (np. kompaktową, im tańsza, tym lepsza do tego doświadczenia) oraz lampkę z tradycyjną żarówką. Jeśli w pracowni macie rurki Plückera, możesz ich użyć zamiast świetlówki.
2. Przygotuj siatkę dyfrakcyjną. Jeśli nie masz fabrycznej, wykonaj ją samodzielnie (patrz doświadczenie 3. s. 31).
3. Popatrz na każdą z lamp przez siatkę dyfrakcyjną. Czym różnią się obserwowane widma?

Widmo światła emitowanego przez rozgrzane ciało (włókno żarówki) jest widmem ciągłym – jedna barwa przechodzi płynnie w następną. Inaczej jest w świetlówce (rys. 17.28) ze światłem emitowanym przez gaz, który pobudzamy do świecenia poprzez wyładowania elektryczne.



Rys. 17.28. Przykładowe widmo świetlówki kompaktowej

Widmo pobudzonego do świecenia gazu złożonego z pojedynczych atomów jest widmem dyskretnym (nieciągłym) – składa się z pojedynczych linii.

Linie te są charakterystyczne dla danej substancji, co możemy wykorzystać w praktyce do jej analizy jakościowej.

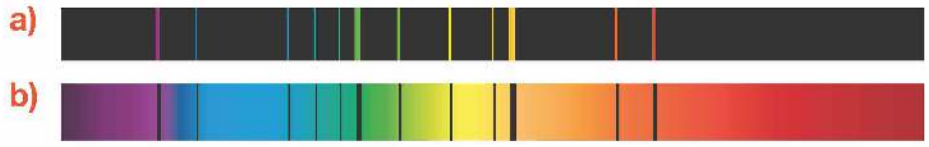
Analiza widma jest wykorzystywana w chemii, biologii, astrofizyce, a także w kryminalistyce (patrz „A to ciekawe" na s. 163).

Widma emisyjne i absorpcyjne

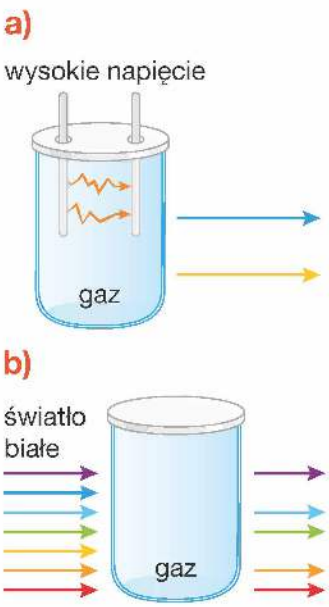
Do tej pory zajmowaliśmy się widmem promieniowania **emitowanego** (wysyłanego) przez gaz. Rozważmy teraz inną sytuację: **pochłanianie** promieniowania przez taki sam gaz. Okazuje się, że pochłania on tylko fale o wybranych częstotliwościach, a wszystkie pozostałe – przepuszcza. Które konkretnie fale pochłania? Zasada jest bardzo prosta:

> Gaz pochłania fale o tych samych częstotliwościach, które emituje, gdy jest pobudzony do świecenia.

W ten sposób powstaje **widmo absorpcyjne**, złożone z prawie wszystkich częstotliwości, z wyjątkiem pochłoniętych przez gaz (rys. 17.29 i 17.30).



Rys. **17.30.** Widmo węgla w stanie gazowym: a) emisyjne, b) absorpcyjne



Rys. **17.29.** Powstawanie widma: a) emisyjnego, b) absorpcyjnego

Wzór Rydberga

Przez wiele lat pozostawało zagadką, dlaczego konkretna substancja ma taki, a nie inny układ linii widmowych, a nawet – dlaczego w ogóle widmo gazu pod niskim ciśnieniem nie jest ciągłe.



Rys. **17.31.** Widzialna seria linii w widmie wodoru i długości fal dla poszczególnych linii widma

Znalezienie regularności w obrębie jednego widma także było trudne i udało się tylko dla najprostszego z pierwiastków – wodoru. Opiszemy teraz te regularności. Otóż widmo wodoru składa się z kilku serii. Tylko jedna z nich należy do światła widzialnego (patrz rys. 17.31), a pozostałe do podczerwieni lub nadfioletu.

Okazuje się, że długość fali linii o numerze n w serii o numerze m można obliczyć ze wzoru zwanego wzorem Rydberga:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

gdzie $R = 1{,}1 \cdot 10^7 \ \frac{1}{\mathrm{m}}$ jest stałą zwaną stałą Rydberga, której wartość dobrano tak, aby pasowała do danych doświadczalnych.

Najpierw, w 1884 r., został ustalony wzór dla serii w świetle widzialnym ($m = 2$), a potem odkryto kolejne serie, niewidoczne gołym okiem, i określono ogólny wzór.

$\frac{1}{\lambda_{czer}} = 1{,}1 \cdot 10^7 \frac{1}{m}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right)$, stąd $\lambda_{czer} \approx 655$ nm

Uwaga. Linii w serii nie numerujemy od $n = 1$, ale od $\boldsymbol{n = m + 1}$. Na przykład linie w świetle widzialnym odpowiadają serii o numerze $m = 2$, czyli pierwsza z nich (czerwona) nosi numer $n = 3$, następna (jasnoniebieska) to $n = 4$ itd.

Wzór Rydberga prawidłowo opisywał długości fali dla poszczególnych linii widmowych, został on jednak odgadnięty – dopasowany do wyników pomiarów.

Fizycy w XIX w. nie umieli go wyprowadzić z żadnego podstawowego prawa przyrody. Wiedzieli więc, jak położone są linie widmowe, nie mieli jednak pojęcia, dlaczego tak jest.

Pochodzenie linii widmowych

Odpowiedź na to ostatnie pytanie przyniosły badania nad budową atomu. W ich wyniku okazało się, że energia elektronu w atomie nie może być dowolną liczbą, ale jest **skwantowana**, to znaczy przyjmuje jedną spośród ściśle określonych wartości.

Na przykład energia elektronu w atomie wodoru może wynosić:

$$\frac{-13{,}6\text{ eV}}{1^2} = -13{,}6\text{ eV}, \frac{-13{,}6\text{ eV}}{2^2} = -3{,}4\text{ eV}, \frac{-13{,}6\text{ eV}}{3^2} = -1{,}5\text{ eV}, \ldots$$

Energie te są ujemne, ponieważ za zero przyjmujemy energię w sytuacji, gdy elektron jest całkowicie oderwany od atomu.

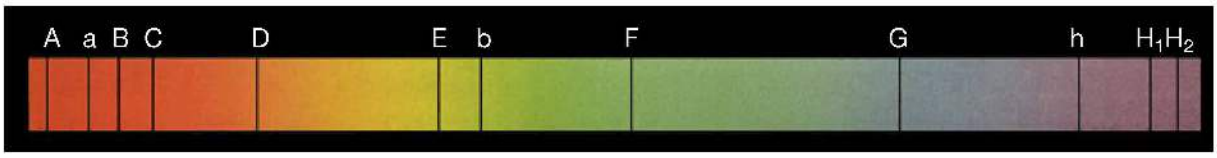
Nie może jednak osiągać wartości pośrednich, np. –10 eV.

Jeśli w uproszczeniu wyobrażamy sobie, że elektron w atomie krąży wokół jądra, skwantowanie energii oznacza, że nie każda orbita jest dozwolona. Elektron może znajdować się tylko w niektórych odległościach od jądra, dla których energia (suma energii kinetycznej i potencjalnej oddziaływania w polu elektrycznym jądra) przyjmuje określone wartości.

A to ciekawe

Gdy patrzymy na tęczę, nie widzimy w niej żadnych przerw. Jednak dokładniejsza analiza widma światła słonecznego za pomocą spektroskopu pozwala dostrzec w nim wąskie, cienkie linie. Odkrył je na początku XIX w. Joseph von Fraunhofer i od jego nazwiska nazywamy je liniami Fraunhofera.

W 1868 r. zauważono, że brakujące długości fal w widmie Słońca odpowiadają liniom w widmie gazów, i słusznie skojarzono ich powstawanie z pochłanianiem niektórych fal w zewnętrznych warstwach Słońca lub w atmosferze Ziemi. Dzięki temu ustalono, z jakich pierwiastków są zbudowane Słońce i inne gwiazdy. Odkryto też nowy pierwiastek, który – jak się wówczas wydawało – nie występuje na Ziemi. Nadano mu nazwę hel (od gr. *helios* – słońce). Dopiero 27 lat później okazało się, że hel występuje także na naszej planecie.

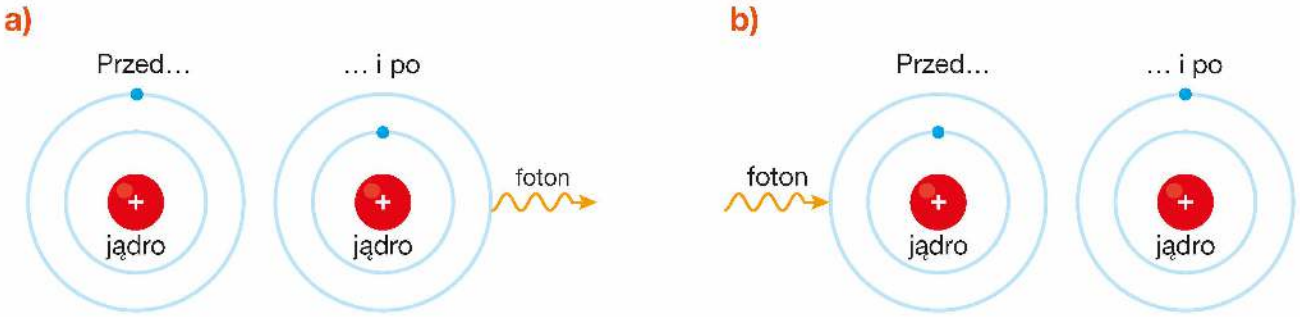


Powyżej pokazano linie Fraunhofera w widmie światła słonecznego. Symbole na zdjęciu to tradycyjne nazwy linii widmowych, które identyfikują poszczególne pierwiastki: A, a oraz B – tlen w atmosferze Ziemi, b – magnez, C, F oraz h – wodór, D – sód, E – żelazo, G oraz H – wapń.

Co dzieje się z energią, gdy elektron przechodzi (mówimy, że spada) na niższą orbitę, czyli jego energia skokowo się zmniejsza? Otóż zostaje ona wypromieniowania w postaci fotonu (rys. 17.32a). I odwrotnie: gdy foton jest pochłaniany przez elektron, jego energia rośnie, czyli wskakuje on na wyższą orbitę (rys. 17.32b).

Pamiętaj, że orbity to tylko poglądowy sposób wyobrażania sobie elektronów o różnej energii.

Elektron przeskakujący między dwiema orbitami emituje lub absorbuje foton.



Rys. **17.32.** a) wysyłanie (emisja) fotonu, b) pochłanianie (absorpcja) fotonu

Ponieważ energia elektronu jest skwantowana, więc także energia emitowana przy przeskokach może przyjmować skończoną liczbę wartości. Właśnie dlatego widmo emisyjne jest dyskretne.

Każdej linii widmowej odpowiada przeskok elektronu pomiędzy określonymi dwiema orbitami.

W przypadku atomu wodoru ta zależność jest szczególnie prosta.

Przy przeskoku elektronu z orbity numer n na orbitę numer m jest emitowany foton odpowiadający linii widmowej numer n w serii numer m.

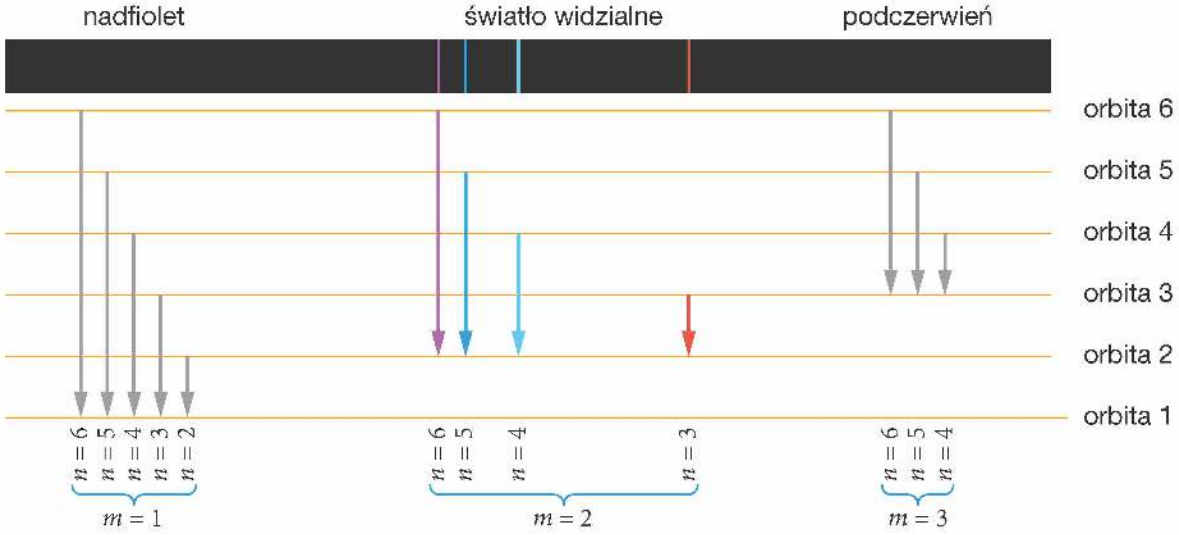
Teraz stało się jasne, dlaczego numerację linii zaczynamy od $n = m + 1$. Skoro elektron ma spadać z orbity n na orbitę m, to liczba n musi być większa od m.

$n > m$,
$n = m + 1$,
$n = m + 2$, ...
m – numer serii,
n – numer linii

A to ciekawe

Kiedy na miejscu przestępstwa policja znajdzie choćby śladową ilość niezidentyfikowanej substancji, sprawdza jej skład. Jeśli jest jej zbyt mało do przeprowadzenia klasycznej analizy chemicznej, stosuje się analizę widma. Polega ona na badaniu promieniowania substancji doprowadzonej do postaci gazowej poprzez ogrzewanie. Pozwala to określić skład badanej próbki, co ułatwia ustalenie źródła pochodzenia podejrzanej substancji.





Rys. **17.33.** Widmo atomu wodoru składa się z prążków o określonych długościach fali (odległości między orbitami nie zachowują skali)

Kiedy elektron ma najmniejszą możliwą energię, czyli gdy znajduje się na najniższej możliwej orbicie, mówimy, że atom znajduje się w **stanie podstawowym**.
Natomiast gdy ma wyższe energie, czyli znajduje się na wyższych orbitach, wtedy atom jest w **stanie wzbudzonym**.

Powstawanie widma ciągłego

Wyjaśniliśmy, jak powstaje dyskretne widmo rozrzedzonego gazu. Skoro jednak cała materia jest zbudowana z atomów, to dlaczego nie wszystkie widma są dyskretne?

Fizyka wokół nas

ZASTOSOWANIA LASERÓW

Od małych wskaźników laserowych codziennego użytku do wielkich i drogich przyrządów o dużej mocy – lasery służą nam w różnych dziedzinach życia.



Promień lasera w poziomicy spełnia funkcję długiej linijki i pomaga wyznaczyć punkty znajdujące się na tej samej wysokości.

Okazuje się, że atomy ciała stałego, cieczy lub gazu pod wysokim ciśnieniem również emitują fotony przy przejściu elektronu z wyższego poziomu energetycznego na niższy. Jednak elektrony oddziałują nie tylko z jądrem własnego atomu, lecz także między sobą, a nawet z sąsiednimi atomami.
Możliwych stanów energetycznych jest tak wiele, że emitowane widmo składa się z ogromnej liczby linii, które zlewają się ze sobą i tworzą widmo ciągłe.

Emisja wymuszona

Wyjaśniliśmy, w jaki sposób powstaje ciągłe widmo promieniowania termicznego i dyskretne widmo rozgrzanych gazów. A jak powstaje światło laserowe, złożone z fal o jednej długości, a do tego spójne?
Zasada działania lasera jest zapisana w jego nazwie, która pochodzi od angielskiego skrótu LASER: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania.
Zjawisko to schematycznie przedstawiono na rysunku 17.34 (na następnej stronie).

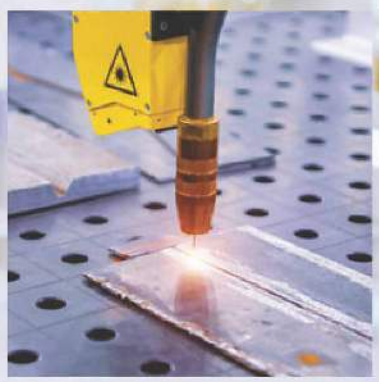
Obecnie także po angielsku *laser* piszemy i czytamy jako zwykłe słowo.

W zjawisku emisji wymuszonej foton powoduje przejście elektronu na niższą orbitę i w konsekwencji emisję drugiego, identycznego fotonu.

Każdy z tych dwóch fotonów może znowu spowodować emisję wymuszoną i w sumie otrzymamy cztery fotony, następnie osiem itd.



Niewłaściwie wykorzystany laser może spowodować utratę wzroku. Jednak zastosowany umiejętnie, pomaga w leczeniu schorzeń oczu. Operacja laserowa jest bezpieczniejsza niż ta przeprowadzona za pomocą skalpela.



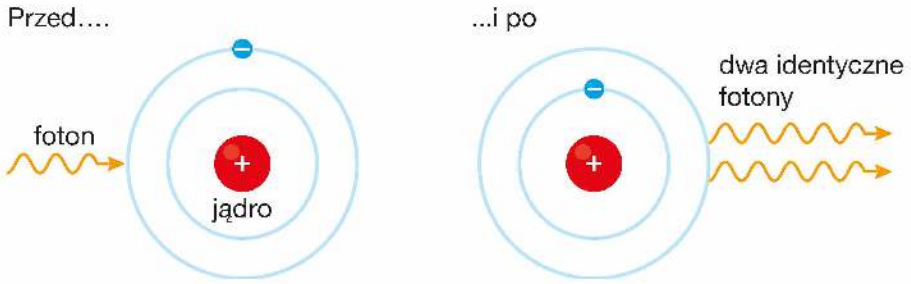
Laser pozwala nie tylko precyzyjnie ciąć stal, lecz także ją spawać.



Ustawienie czytnika nad kodem zajmuje dużo mniej czasu niż wpisywanie go za pomocą klawiatury.



Laser służy do odczytywania płyt CD, DVD i BluRay – rozpoczęły one nową erę jakości dźwięku.



Rys. **17.34.** Schemat emisji wymuszonej

Jak łatwo zauważyć, aby w danym ośrodku mogła zachodzić emisja wymuszona, musi się tam znajdować wiele atomów w stanie wzbudzonym – więcej niż atomów w stanie podstawowym, które pochłaniałyby powstające fotony. Spełnienie tego warunku nie jest proste, ponieważ elektrony mają tendencję do wracania do stanu podstawowego. W różnych typach laserów osiąga się to w różny sposób.

Po tej lekcji powinieneś

- rozróżniać widma emisyjne i absorpcyjne gazów, wiedzieć jak powstają;
- wiedzieć, czym różni się stan podstawowy atomu od stanu wzbudzonego;
- interpretować układ linii widmowych atomu wodoru;
- posługiwać się wzorem Rydberga.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Oblicz częstotliwość dla jasnoniebieskiej linii widmowej wodoru.

2. Oblicz długość fali oraz częstotliwość dla linii widmowej o numerze 5 w trzeciej serii promieniowania atomu wodoru.

3. Oblicz długość fali promieniowania pochłanianego przez atom wodoru, kiedy jego elektron przechodzi z orbity drugiej na czwartą.

4. Jakiemu przeskokowi elektronu w atomie wodoru odpowiada fala o długości 1090 nm? Do jakiego zakresu fal elektromagnetycznych należy takie promieniowanie?

5. Z orbity n na orbitę 1 elektron może spaść bezpośrednio i wyemitować przy tym promieniowanie o długości λ_{n1}. Może też najpierw spaść na orbitę k ($1 < k < n$), a dopiero stamtąd na orbitę 1 i wyemitować najpierw promieniowanie o długości λ_{nk}, a potem promieniowanie o długości λ_{k1}. Uzasadnij, że pomiędzy tymi długościami fal zachodzi związek:

$$\frac{1}{\lambda_{n1}} = \frac{1}{\lambda_{nk}} + \frac{1}{\lambda_{k1}}$$

6. W wielu szkolnych pracowniach wykorzystujemy typ lasera zwany laserem helowo-neonowym. Foton jest w nim emitowany przy przejściu elektronu z orbity o energii –0,9 eV na orbitę o energii –2,85 eV. Jaka jest długość fali światła emitowanego przez ten laser? Jaką barwę ma to światło?

Jeśli w twojej szkole znajduje się taki laser, sprawdź, czy rzeczywiście jego światło ma barwę, która wynika z twoich obliczeń.

17.7. Model atomu Bohra

Przypomnij sobie

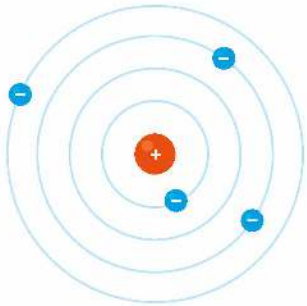
- Każdy pierwiastek ma charakterystyczne widmo.
- Widmo wodoru można opisać wzorem Rydberga.

Modele atomu na początku XX w.

Na początku XX w. fizycy wiedzieli, że atom zawiera ładunki dodatnie i ujemne. Znano już elektrony. Jednak na temat budowy atomu stawiano wiele hipotez, których nie dało się zweryfikować na podstawie doświadczeń. Kilka modeli zaproponowanych wówczas przez różnych fizyków przedstawiamy w ramce poniżej.

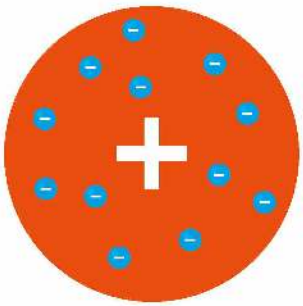
Różne modele atomu

Trzech fizyków, których modele atomu przedstawiamy, otrzymało Nagrodę Nobla: Philipp Lenard (promieniowanie katodowe, 1905 r.), Joseph Thomson (przewodnictwo elektryczne gazów, 1906 r.), Jean Perrin (czyt. żan peran, nieciągła budowa materii, 1926 r.).



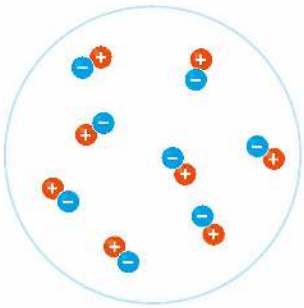
Jean Perrin, 1901 r.

Elektrony krążą po orbitach wokół dużej dodatnio naładowanej cząstki – model podobny do późniejszego modelu Bohra



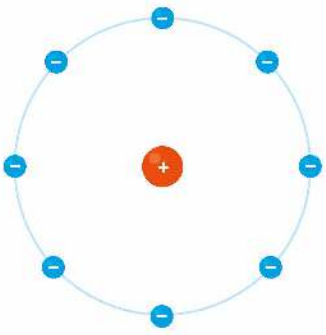
Joseph Thomson, 1902 r.

Małe elektrony znajdują się wewnątrz jednorodnej kuli o ładunku dodatnim



Philipp Lenard, 1903 r.

Pary ładunków (dodatni i ujemny) poruszają się swobodnie w całej objętości atomu



Hantaro Nagaoka, 1904 r.

Elektrony są rozmieszczone na jednej orbicie



Rys. 17.35. Bohr przedstawił swój model atomu w 1913 r., a w 1922 r. otrzymał za tę pracę Nagrodę Nobla

Postulaty Bohra

Opiszemy teraz nieco dokładniej kolejny model, który został zaproponowany przez Nielsa Bohra (czyt. nilsa bora). Model ten był podobny do modelu Perrina. Znacząca różnica polegała na tym, że Bohr nie poprzestał na opisie, ale przyjął założenia ilościowe, które pozwoliły wyjaśnić częstotliwości linii widmowych.
Postulaty (założenia) Bohra były następujące:

1. Elektron może znajdować się tylko na jednej z dozwolonych orbit.

2. Na n-tej dozwolonej orbicie moment pędu elektronu jest równy:

$$L = n\frac{h}{2\pi}$$

gdzie h jest stałą Plancka.

3. Atom emituje promieniowanie tylko wtedy, gdy elektron zmienia orbitę.

Ostatnie założenie Bohra zgadza się z twoją wiedzą z poprzedniej lekcji. Jednak, kiedy opracowywał on swój model, takie stwierdzenie było sprzeczne ze znanymi prawami fizyki klasycznej.
Wiedziano, że skoro elektron porusza się po okręgu, to zmienia się kierunek wektora jego prędkości, a co za tym idzie, wytwarzane przez niego pole magnetyczne jest zmienne (zmienia się kierunek wektora indukcji magnetycznej). Zmienne pole magnetyczne jest przyczyną powstawania zmiennego pola elektrycznego, które z kolei jest przyczyną powstawania zmiennego pola magnetycznego itd. Zatem elektron krążący wokół jądra powinien stale emitować falę elektromagnetyczną, co oznacza, że traciłby energię i zbliżał się do jądra. Można obliczyć, że w ułamku sekundy spadłby na jądro.
Na gruncie fizyki klasycznej nie potrafiono wyjaśnić, dlaczego tak się nie dzieje. Jeśli jednak przyjmiemy, że elektron może poruszać się tylko po określonych orbitach, musimy się zgodzić także z brakiem promieniowania: gdyby elektron stopniowo tracił energię, musiałby się poruszać po spirali, zmieniając swoją odległość od jądra w sposób stopniowy.

Promień orbity

Ponieważ drugi postulat Bohra ma postać ilościową (jest równaniem), na jego podstawie można wyciągnąć wiele wniosków, m.in. dotyczących rozmiarów atomu wodoru, energii elektronu i częstotliwości emitowanego promieniowania.
Zacznijmy od obliczenia wielkości atomu, a konkretnie – promienia orbity, po jakiej porusza się elektron. Bohr zakładał, że elektron krąży wokół jądra, przyciągany siłą elektrostatyczną, podobnie jak planeta okrążająca gwiazdę jest przyciągana siłą grawitacji.

W ruchu elektronu po okręgu siła dośrodkowa jest równa sile przyciągania elektrostatycznego:

$$m\frac{v^2}{r}=\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

gdzie: m – masa elektronu, e – ładunek elementarny, r – promień orbity, v – prędkość elektronu, ε_0 – przenikalność elektryczna próżni.
Jeśli przekształcimy ten wzór i dopiszemy indeksy n, otrzymamy:

$$mv_n^2 r_n=\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \quad (1)$$

Porównajmy go z postulatem Bohra:

$$L=\frac{nh}{2\pi}$$

czyli:

$$mv_n r_n=\frac{nh}{2\pi} \quad (2)$$

Podnieśmy równanie (2) do kwadratu:

$$m^2 v_n^2 r_n^2=\frac{n^2h^2}{4\pi^2}$$

i podstawmy do jego lewej strony równanie (1):

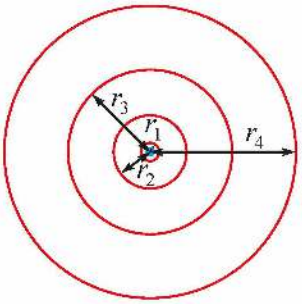
$$mr_n\cdot\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}=\frac{n^2h^2}{4\pi^2}$$

Stąd otrzymujemy wzór na r_n:

$$r_n=n^2\frac{h^2\varepsilon_0}{\pi me^2}=n^2 r_1, \text{ gdzie } n=1, 2, 3, \ldots$$
$$r_1=\frac{h^2\varepsilon_0}{\pi me^2}=5{,}29\cdot10^{-11}\ \text{m}$$

Symbolem r_1 oznaczyliśmy promień orbity 1 (najniższej, czyli najbliższej jądra). Długości kolejnych promieni orbit rosną jak kwadraty kolejnych liczb naturalnych (rys. 17.36).

Porównaj te obliczenia z wyznaczaniem pierwszej prędkości kosmicznej (cz. III s. 42). Co jest podobne, a co się zmieniło?



Rys. 17.36. Pierwsze cztery spośród dozwolonych orbit elektronowych w atomie wodoru

Energia elektronu

Gdy znamy wzór na promień n-tej orbity r_n, możemy obliczyć energię kinetyczną i potencjalną elektronu na tej orbicie:

$$E_{\text{kin}}=\frac{mv^2}{2}=\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}$$

Z kolei energia potencjalna – zgodnie ze wzorem na energię w polu elektrycznym – jest równa:

$$E_{\text{pot}}=-\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n}$$

Całkowita energia elektronu w atomie wodoru jest równa sumie energii kinetycznej i potencjalnej, zatem wynosi:

$$E_n=E_{\text{kin}}+E_{\text{pot}}=-\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}$$

Korzystamy z zależności $\frac{mv^2}{r}=\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$, z której wyznaczamy v^2.

Gdy podstawimy r_n do wzoru na energię całkowitą, zobaczymy, że dozwolona energia może przyjmować tylko określone wartości:

$$E_n = -\frac{1}{n^2}\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} = -\frac{E_0}{n^2}, \text{ gdzie } n = 1, 2, 3, \ldots,$$

$$E_0 = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}$$

gdzie E_0 jest wartością bezwzględną energii elektronu na najniższej orbicie.

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy:

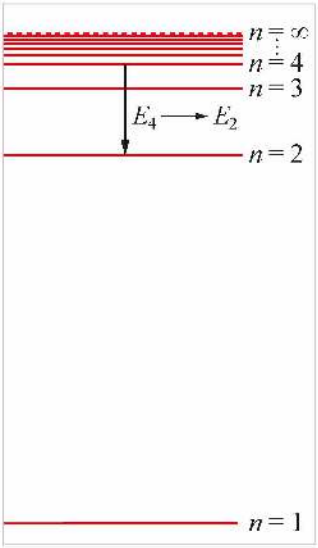
$$E_0 = 13{,}6 \text{ eV} = 2{,}18 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Takie same wyniki uzyskuje się z zastosowaniem mechaniki kwantowej, w której do opisu cząstek używa się fal materii.

Atom wodoru ma najniższą energię w stanie podstawowym, czyli wtedy, gdy elektron znajduje się na orbicie najbliższej jądra (zwanej też najniższą). Energia ta wynosi $E_1 = -13{,}6$ eV.

Wszystkie pozostałe energie są większe, choć zawsze ujemne. Ujemna wartość energii elektronu oznacza, że tworzy on z tym jądrem układ związany.

Jak pamiętamy, tak właśnie jest w przypadku pola elektrycznego, gdy ładunek próbny i źródło się przyciągają, a także w polu grawitacyjnym (gdzie przyciągają się wszystkie ciała).



Rys. 17.37. Dozwolone energie atomu wodoru

Wartości energii elektronu w atomie wodoru na poszczególnych orbitach, zwanych także **poziomami energetycznymi**, przedstawia schemat (rys. 17.37). Jak już pisaliśmy, najniższy poziom energetyczny nazywamy stanem podstawowym, a pozostałe – stanami wzbudzonymi.

Gdy atom znajduje się w stanie podstawowym, a jego energia zostanie zwiększona o E_0, to będzie ona równa zeru, czyli elektron będzie mógł oderwać się od jądra. Wyrwanie elektronu z atomu nazywamy jonizacją, a energię E_0 nazywamy **energią jonizacji**.

Wyprowadzenie wzoru Rydberga

Zgodnie z zasadą zachowania energii energia wyemitowana przez atom w czasie, gdy elektron zmienia orbitę, jest różnicą energii stanu początkowego i końcowego, czyli:

$$hf = E_n - E_m = E_0\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

Stąd:

$$f = \frac{E_0}{h}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

gdzie E_0 jest energią jonizacji, a elektron przeskakuje z orbity numer n na orbitę numer m.

Jeżeli skorzystamy z równości $c = \lambda f$ i wyznaczymy $\frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c}$, wyprowadzony wcześniej wzór na częstotliwość możemy przekształcić do postaci:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_0}{hc}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

Porównajmy go ze wzorem Rydberga:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

Widzimy, że różnią się one tylko stałymi przed nawiasem. Obliczmy zatem stałą w pierwszym wzorze:

$$\frac{E_0}{hc} = \frac{13{,}6\,\text{eV}}{4{,}14 \cdot 10^{-15}\,\text{eV} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 1{,}1 \cdot 10^7\,\frac{1}{\text{m}}$$

Okazuje się, że otrzymaliśmy stałą Rydberga, czyli:

$$\frac{E_0}{hc} = R$$

Tak więc **model Bohra pozwala wyprowadzić wzór Rydberga.**

Ograniczenia modelu Bohra

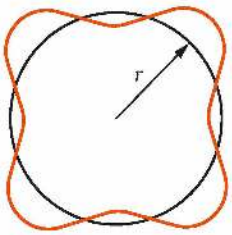
Wydawałoby się, że wyjaśnienie wzoru Rydberga było wielkim sukcesem. Jednak model atomu Bohra nie wzbudził powszechnego zachwytu fizyków. „Taki sympatyczny i inteligentny człowiek, a kompletnie oszalał" – skomentował propozycję Bohra fizyk Carl Runge. A wybitni naukowcy Max von Laue i Otto Stern zagrozili: „Jeśli coś wyjdzie z tych nonsensów Bohra, to przestaniemy zajmować się fizyką!". Na szczęście nie spełnili swojej groźby.

Trudno dziwić się tym opiniom. Model Bohra był sprzeczny ze znanymi wówczas prawami fizyki – przecież elektron na orbicie powinien tracić energię na promieniowanie. Tymczasem proponowany przez Hantara Nagaokę model (patrz s. 167) pozwalał rozwiązać ten problem: promieniowanie emitowane przez jeden elektron byłoby w znacznej części pochłaniane przez inne elektrony znajdujące się na tej samej orbicie.
W dodatku model Bohra opierał się na przyjętych bez uzasadnienia postulatach. Zwłaszcza drugi postulat Bohra sprawia wrażenie wymyślonego na siłę, aby dało się z niego wyprowadzić to, co chcemy.
Do tego wszystkiego, był to model tylko jednego, najprostszego atomu i nie dało się go uogólnić na atomy innych pierwiastków.

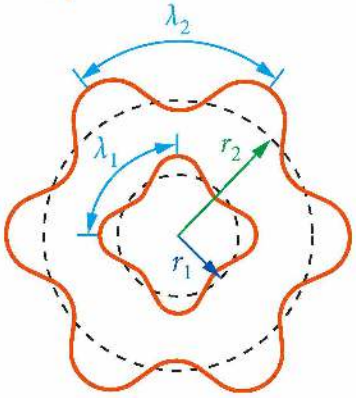
Drugi postulat Bohra i falowa natura materii

Drugi postulat Bohra możemy dzisiaj uzasadnić na podstawie wiadomości o falowej naturze materii. Bohr oczywiście nie miał takiej możliwości, ponieważ hipoteza de Broglie'a i jego wzór nie były jeszcze znane.

a)



b)



Rys. 17.38. a) przykład fali stojącej na zamkniętej strunie, b) obwód orbity elektronu jest wielokrotnością długości związanej z nim fali materii

W rozdziale „Fale mechaniczne" (w części 2. podręcznika) badaliśmy fale stojące na strunie. Taka fala nie może mieć dowolnej długości, ponieważ na jej końcach muszą znajdować się węzły (miejsca, gdzie struna się nie porusza).
Wyobraźmy sobie, że napinamy strunę w kształcie pętli. Można byłoby na niej wytworzyć wyłącznie taką falę stojącą, która po obejściu struny dookoła znalazłaby się w tej samej fazie (rys. 17.38a). Każda fala o innej długości interferowałaby z samą sobą i się wygaszała.
W tej sytuacji wielokrotność długości fali λ_n byłaby równa długości pętli:

$$n\lambda_n = l$$

gdzie: $n = 1, 2, 3, \ldots$ – liczba naturalna, l – długość pętli.
Analogicznie dzieje się z elektronem w atomie. Ma on naturę falową i porusza się po swego rodzaju zamkniętej pętli – orbicie o promieniu r i długości $2\pi r$.

Aby elektron tworzył falę stojącą zamiast wygaszać się na skutek interferencji, musi zachodzić związek:

$$n\lambda_n = 2\pi r_n$$

gdzie $n = 1, 2, 3, \ldots$ – liczba naturalna (numer orbity), a r_n – promień pętli (rys. 17.38b).
Jeśli do tego warunku podstawimy długość fali de Broglie'a $\lambda_n = \frac{h}{mv}$, to otrzymamy zależność:

$$\frac{nh}{mv} = 2\pi r_n$$

gdzie: h – stała Plancka, m – masa elektronu, a v – jego prędkość.

Ten wzór możemy przekształcić do postaci:

$$mvr_n = \frac{nh}{2\pi}$$

Moment pędu, cz. I s. 269

Zauważmy, że lewa strona tego równania to moment pędu L elektronu. Otrzymujemy więc wzór, który stanowił podstawowe założenie Bohra:

$$L = n\frac{h}{2\pi}$$

Wzór zaproponowany przez Bohra został wyprowadzony dopiero po 10 latach na podstawie hipotezy de Broglie'a.

Model Bohra a współczesna fizyka

Dzisiaj model Bohra, nawet udoskonalony przez uwzględnienie falowej natury elektronu, ma znaczenie tylko historyczne. W pierwszej połowie XX w. powstała teoria zwana mechaniką kwantową, która pozwala opisywać wszystkie atomy, a nie tylko jeden, najprostszy. Poznasz ją, jeśli będziesz studiować fizykę, do czego gorąco zachęcamy.

Model Bohra możemy porównać do modelu Kopernika. Jego także nikt dziś nie używa, jednak miał on ważne znaczenie w historii astronomii. Poniżej przedstawiamy porównanie obu modeli.

TEORIA KOPERNIKA	MODEL BOHRA
Przedstawiała planety krążące wokół Słońca po orbitach w kształcie okręgów.	Przedstawiał elektrony krążące wokół jądra atomu po orbitach w kształcie okręgów.
Została odrzucona, zanim jeszcze powszechnie ją przyjęto.	Został odrzucony, zanim jeszcze powszechnie go przyjęto.
Dziś korzystamy nie z niej, ale z prawa grawitacji, które pozwala wyjaśnić także wiele innych zjawisk niż ruch planet.	Dziś nie korzystamy z niego, ale z mechaniki kwantowej, która pozwala wyjaśnić znacznie więcej zjawisk niż widmo jednego atomu.
Pozostał z niej jednak jeden ważny postulat: Ziemia jest jedną z planet.	Pozostał z niego jednak jeden ważny postulat: wielkości opisujące atom są skwantowane i mogą zmieniać się jedynie skokowo – tylko wtedy emitowane lub pochłaniane jest promieniowanie.
Teoria ta pomogła odkryć prawo grawitacji.	**Model ten pomógł sformułować mechanikę kwantową.**

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać model Bohra atomu wodoru i uzasadniać jego założenia na podstawie falowej natury materii;
- wyprowadzać wzór Rydberga z modelu Bohra;
- rozwiązywać zadania dotyczące modelu Bohra.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Uzasadnij w jak najprostszy sposób, że między energią kinetyczną E_{kin} i potencjalną E_p elektronu na dowolnej orbicie atomu wodoru zachodzi zależność:

$$E_p = -2E_{kin}$$

Tematem jednego z zadań w poprzedniej części podręcznika było udowodnienie tego samego wzoru dla satelity krążącego wokół Ziemi. Jak sądzisz, z czego wynika to podobieństwo?

2. Sporządź w zeszycie wykres zależności prędkości elektronu w atomie wodoru od numeru orbity.

17.8. Otrzymywanie promieni Röntgena

Przypomnij sobie

- Zmiana prędkości poruszającego się ładunku powoduje, że emituje on falę elektromagnetyczną.
- Promieniowanie X (rentgenowskie) to fale elektromagnetyczne z zakresu długości od 1 pm (10^{-12} m) do 10 nm (10^{-8} m).
- Długość fali jest odwrotnie proporcjonalna do jej częstotliwości.



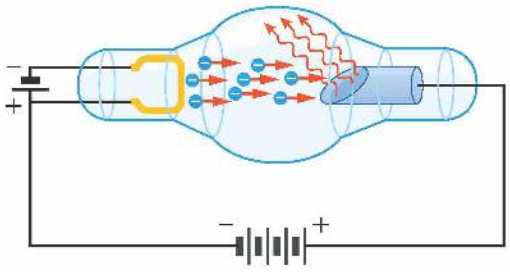
Rys. 17.39. Większość z nas miała robione zdjęcie rentgenowskie. Jednak zawsze należy pamiętać, że promieniowanie X w większej dawce jest szkodliwe, o czym ostrzega napis przed pracownią RTG

Promieniowanie hamowania

Promienie Röntgena, zwane także promieniami X, zostały odkryte w 1895 r. i niemal natychmiast zaczęto je wykorzystywać w diagnostyce medycznej (rys. 17.39). Otrzymywanie promieni Röntgena przypomina proces odwrotny do zjawiska fotoelektrycznego.

Lampa rentgenowska, podobnie jak fotokomórka, to bańka próżniowa z dwiema elektrodami (rys. 17.40). Jednak w tym przypadku elektroda ujemna (katoda) jest podgrzewana, a nie oświetlana. Wysoka temperatura oznacza dużą energię zarówno drgających jonów, jak i elektronów swobodnych. Niektóre elektrony mają energię na tyle dużą, że wyrywają się z katody.

Ponieważ do elektrod jest przyłożone wysokie napięcie (dziesiątki kilowoltów), więc elektron, który wyrwie się z katody, jest silnie przyspieszany przez pole elektryczne wewnątrz bańki, przelatuje przez całą jej długość i z dużą prędkością uderza w anodę.



Rys. 17.40. Lampa katodowa wytwarzająca promienie Röntgena

Gdy elektron uderza w anodę, gwałtownie hamuje i z tego powodu emituje falę elektromagnetyczną. Ze względu na swoje pochodzenie jest ona nazywana **promieniowaniem hamowania**.
Przy odpowiedniej wartości przyspieszenia (zależnej od energii elektronu, a więc pośrednio – od napięcia) promieniowanie hamowania ma taką częstotliwość, że zaliczamy je do promieniowania rentgenowskiego.

Krótkofalowa granica promieniowania Röntgena

Maksymalna energia promieniowania uzyskanego za pomocą lampy rentgenowskiej odpowiada sytuacji, gdy cała energia, jaką elektron uzyskuje w polu elektrycznym wewnątrz lampy rentgenowskiej, zmienia się w energię jednego fotonu. Można ją więc obliczyć z zależności, w której energię dostarczoną przez pole elektryczne porównujemy z energią fotonu:

$$eU = hf_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}}$$

gdzie: e – ładunek elementarny (wartość bezwzględna ładunku elektronu), U – napięcie przyłożone między elektrodami w lampie rentgenowskiej, f_{max} – maksymalna częstotliwość emitowanego promieniowania, λ_{min} – odpowiadająca jej minimalna długość fali, h – stała Plancka, c – prędkość światła.

Z tej zależności możemy wyznaczyć zarówno minimalną długość fali:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eU}$$

jak i napięcie potrzebne do uzyskania określonej długości fali. Na przykład dla $\lambda_{min} = 1$ nm otrzymujemy $U = 1240$ V.

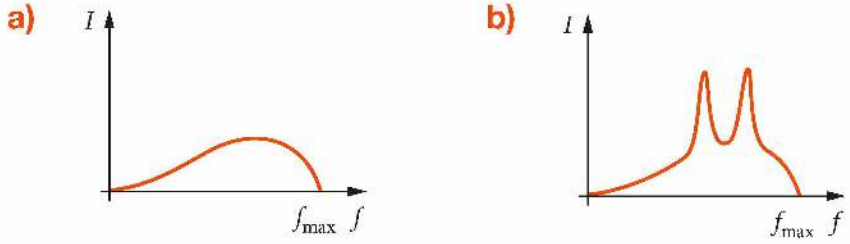
Sprawdźmy jednostkę:

$$[\lambda_{min}] = \frac{\mathrm{J \cdot s \cdot \frac{m}{s}}}{\mathrm{C \cdot V}} = \frac{\mathrm{J \cdot m}}{\mathrm{C \cdot \frac{J}{C}}} = \frac{\mathrm{J \cdot m}}{\mathrm{J}} = \mathrm{m}$$

Tę minimalną długość fali nazywamy **granicą krótkofalową** promieniowania rentgenowskiego wytwarzanego pod danym napięciem. Zauważ, że λ_{min} zależy tylko od napięcia U. Wszystkie pozostałe symbole we wzorze oznaczają stałe.

Widmo promieniowania Röntgena

W lampie rengenowskiej oprócz fotonów o maksymalnej energii powstają także fotony o energii niższej, wytwarzane przez elektrony, które część swojej energii oddały jonom w anodzie. Można wykazać (choć wykracza to poza możliwości szkolnej fizyki), że widmo promieniowania hamowania jest opisane przez wykres przedstawiony na rysunku 17.41a.



Rys. **17.41.** Widmo promieniowania rentgenowskiego: a) promieniowanie hamowania, b) pełny wykres

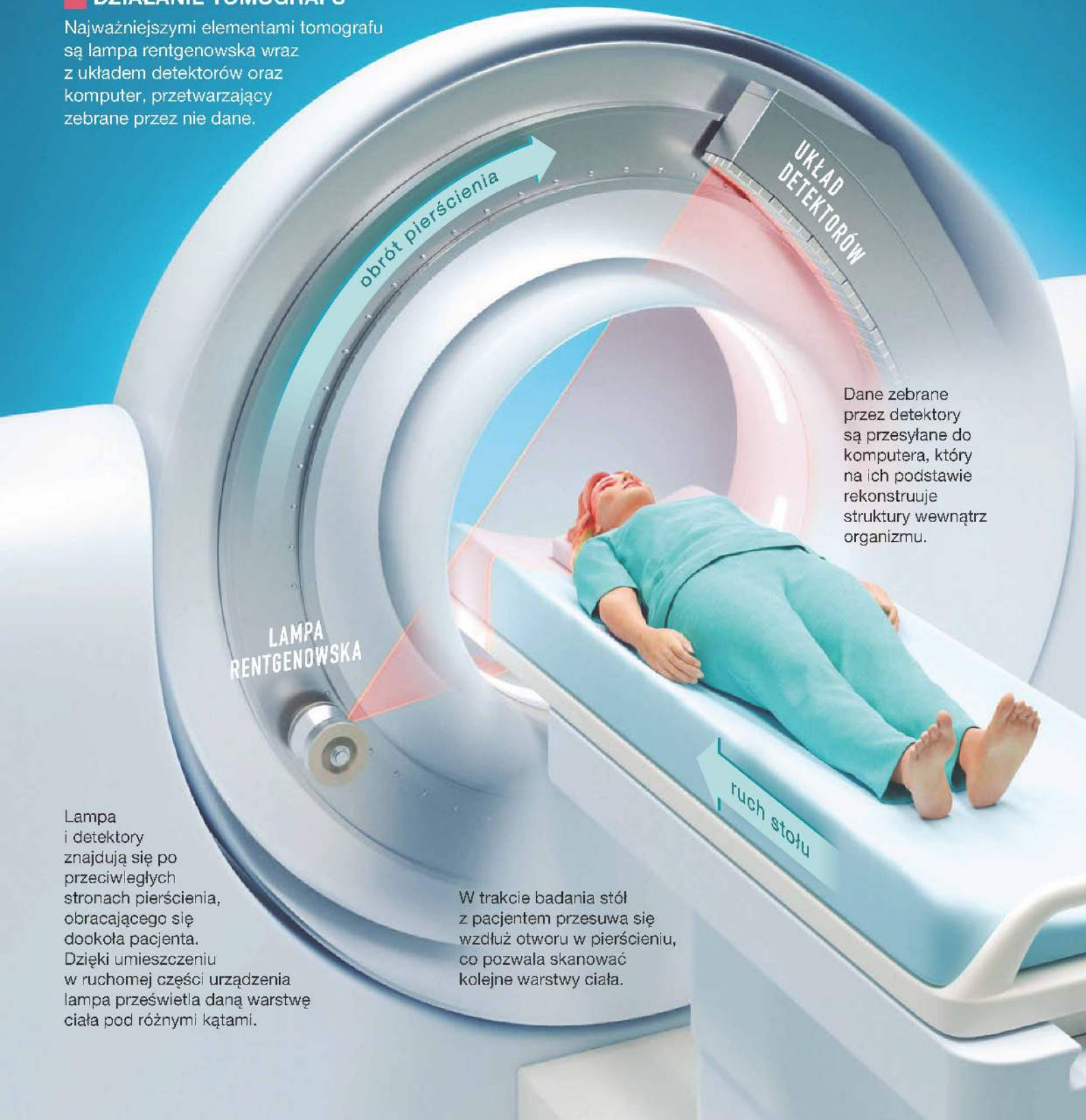
Dodatkowo dla niektórych częstotliwości występują ostre piki (rys. 17.41b). Odpowiadają one promieniowaniu wytwarzanemu przez wzbudzone atomy.

TOMOGRAFIA KOMPUTEROWA

Tomografia komputerowa jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych technik diagnostycznych. Dzięki niej w bezinwazyjny sposób możemy zobrazować wnętrze ciała pacjenta. Słowo *tomografia* jest złożeniem dwóch członów zaczerpniętych z języka greckiego: *tomos* – wartstwa i *grapho* – zapisuję. Tomografia oznacza więc zapisywanie warstw, przekrojów.

DZIAŁANIE TOMOGRAFU

Najważniejszymi elementami tomografu są lampa rentgenowska wraz z układem detektorów oraz komputer, przetwarzający zebrane przez nie dane.



Dane zebrane przez detektory są przesyłane do komputera, który na ich podstawie rekonstruuje struktury wewnątrz organizmu.

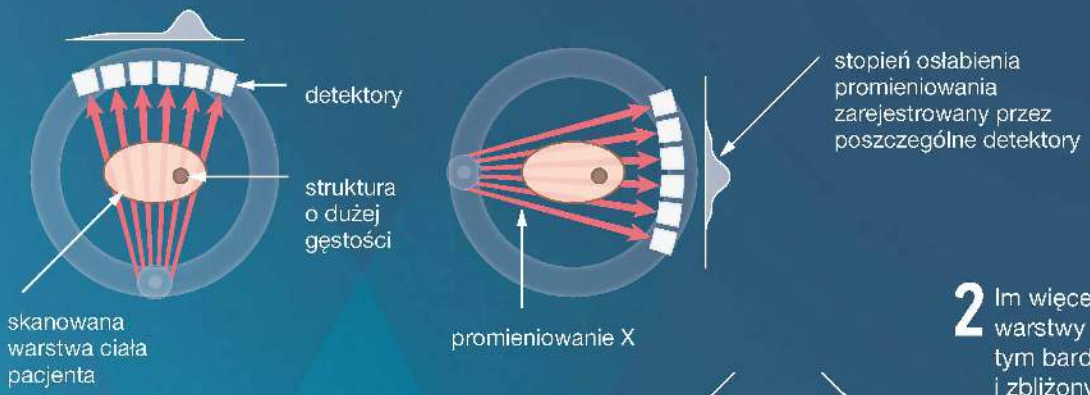
Lampa i detektory znajdują się po przeciwległych stronach pierścienia, obracającego się dookoła pacjenta. Dzięki umieszczeniu w ruchomej części urządzenia lampa prześwietla daną warstwę ciała pod różnymi kątami.

W trakcie badania stół z pacjentem przesuwa się wzdłuż otworu w pierścieniu, co pozwala skanować kolejne warstwy ciała.

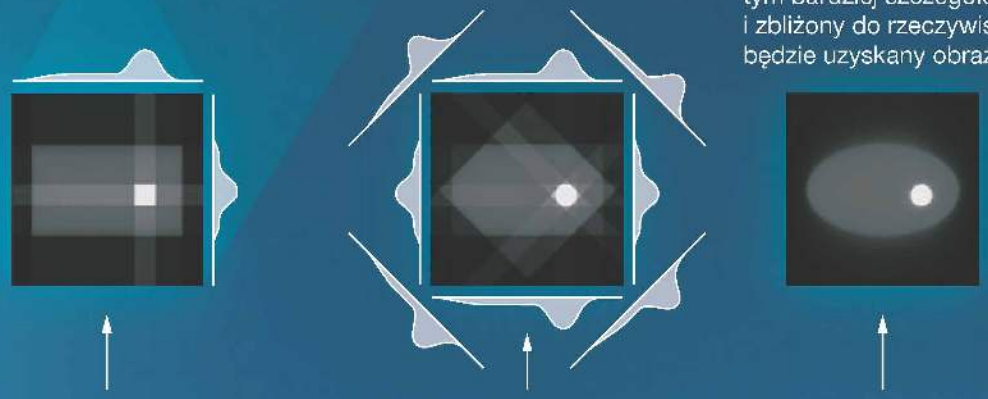
JAK POWSTAJE OBRAZ

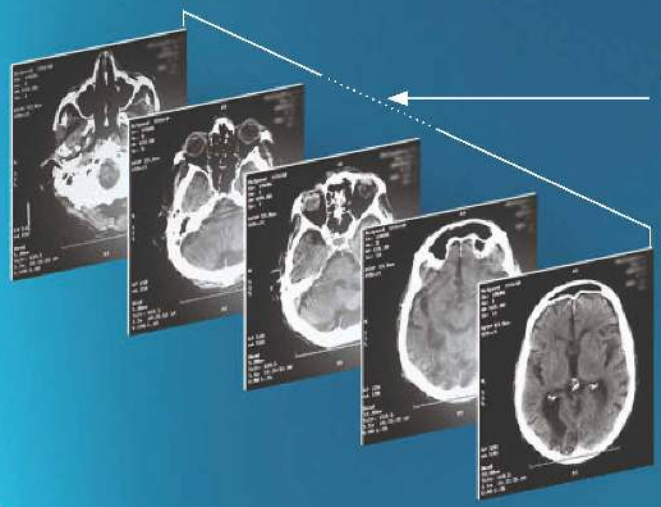
Promieniowanie rentgenowskie przechodzące przez ciało pacjenta jest pochłaniane przez tkanki w ilości zależnej od ich gęstości. Następnie detektory przekazują do komputera informacje o stopniu osłabienia sygnału.

1 Jeśli dla danej warstwy ciała wykona się pod różnymi kątami przynajmniej dwie takie projekcje (naświetlenia), to na ich podstawie można utworzyć mapę pochłaniania promieniowania, a więc mapę gęstości tkanek w tej warstwie.

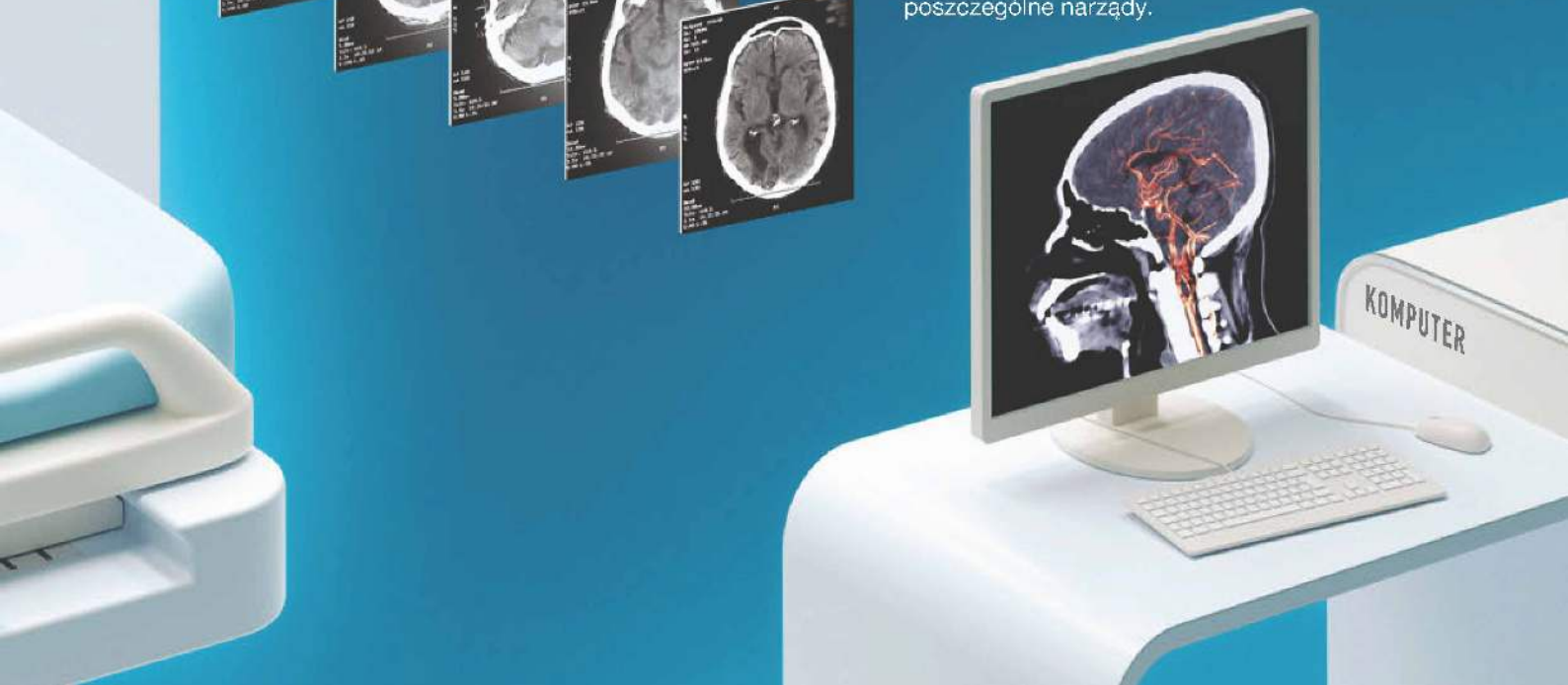


2 Im więcej projekcji dla danej warstwy zarejestrujemy, tym bardziej szczegółowy i zbliżony do rzeczywistego będzie uzyskany obraz.





3 Na podstawie zrekonstruowanych obrazów (map gęstości) wszystkich zeskanowanych warstw komputer odtwarza pełny trójwymiarowy model ciała pacjenta. Dzięki temu, że tkanki różnią się między sobą gęstością, można w nim wyodrębnić poszczególne narządy.

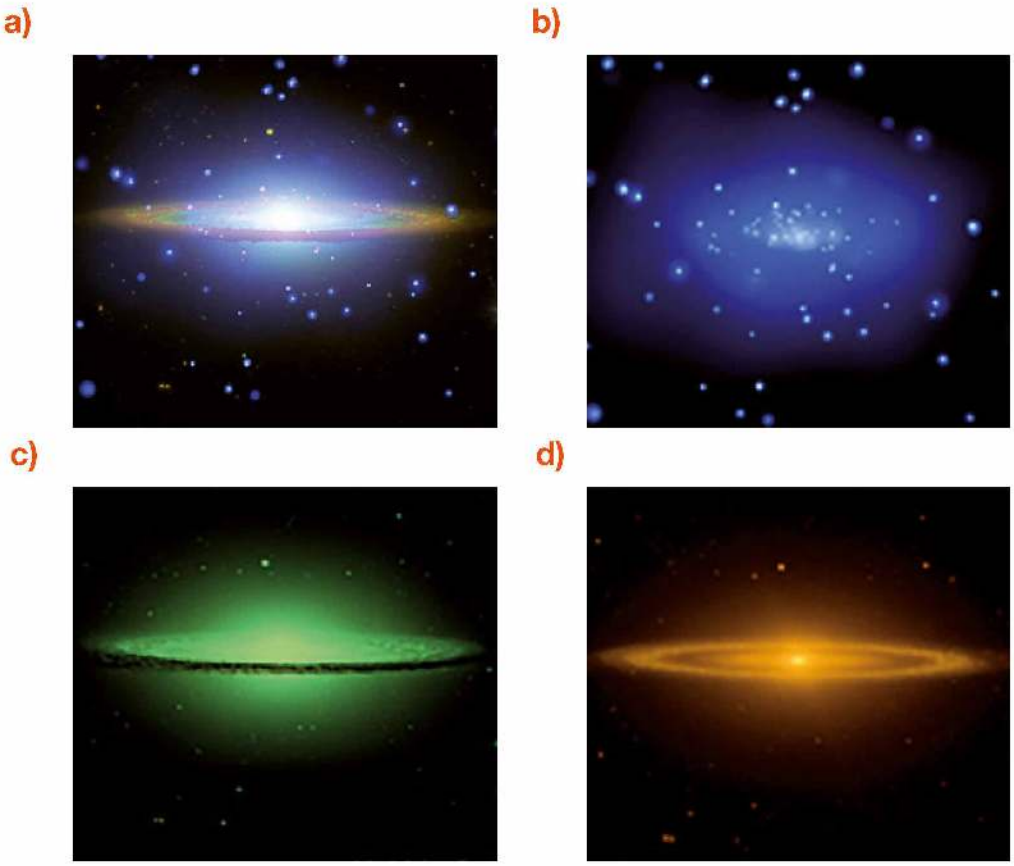


Obserwacje astronomiczne

W kosmosie promieniowanie rentgenowskie jest bardzo rozpowszechnione. Wysyłają je wszystkie obiekty o temperaturze powyżej miliona kelwinów.
Obiekty te są wyjątkowo interesujące. Zalicza się do nich m.in. gaz opadający na czarne dziury i rzadką materię wypełniającą przestrzenie między galaktykami w gromadach galaktyk.

Promieniowanie rentgenowskie dobiega do nas także z pozostałości po wybuchach gwiazd supernowych, a nawet z Księżyca, który odbija promieniowanie Słońca.

Na rysunku 17.42 pokazano galaktykę Sombrero: obraz w promieniach X (niebieski), zdjęcie w świetle widzialnym (zielony) i obraz w podczerwieni (pomarańczowy) oraz połączenie wszystkich trzech obrazów.



Rys. **17.42.** Obrazy galaktyki Sombrero: a) połączenie obrazów, b) w promieniach X, c) w świetle widzialnym, d) w podczerwieni – więcej na stronie pod kodem QR (adres na s. 309)

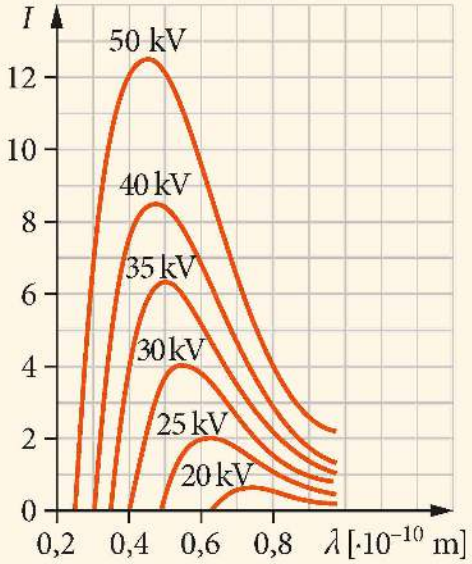
Po tej lekcji powinieneś

- opisywać mechanizm powstawania promieniowania rentgenowskiego;
- rozwiązywać zadania dotyczące promieniowania hamowania i widma promieniowania rentgenowskiego.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Na wykresie przedstawiono rozkład kilku widm promieniowania X, otrzymanych w wyniku wyhamowywania na anodzie wolframowej elektronów przyspieszanych w polu o określonym napięciu. Symbolem λ oznaczono długość emitowanej fali, a symbolem I – natężenie promieniowania. Na podstawie danych odczytanych z wykresu oblicz iloraz $\frac{e}{h}$.



Rozwiązanie

Zauważmy, że obie stałe z ilorazu (e i h) mają związek z energią. Energia, jaką elektron uzyskuje w polu elektrycznym pod napięciem U, wynosi eU, a energia fotonu jest równa hf. Te wielkości są sobie równe, gdy cała energia, jaką elektron uzyskuje w polu elektrycznym wewnątrz lampy, zmienia się w energię jednego fotonu:

$$eU = hf_{max}$$

Stąd:

$$\frac{e}{h} = \frac{f_{max}}{U}$$

Jak wynika z wykresu, nawet dla jednej wartości napięcia emitowane promieniowanie ma różne długości fali, a co za tym idzie – różne częstotliwości. Dzieje się tak dlatego, że nie zawsze cała energia elektronu zmienia się w energię fotonu. Im większa część energii elektronu zmienia się w energię fotonu, tym foton ma większą energię, a odpowiadająca mu fala – wyższą częstotliwość i mniejszą długość.

W skrajnym, interesującym nas przypadku, kiedy cała energia elektronu zmienia się w energię fotonu, energia fotonu uzyskuje maksymalną możliwą wartość, czyli długość fali osiąga wartość najmniejszą.
Ponieważ częstotliwość promieniowania zależy od długości fali następująco:

$$f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}}$$

więc możemy zapisać:

$$\frac{e}{h} = \frac{c}{\lambda_{\min} U} \qquad (1)$$

Wybierzmy jeden z wykresów. Niech to będzie wykres dla $U = 30$ kV, dla którego łatwo odczytać najmniejszą długość fali:

$$\lambda_{\min} = 0{,}4 \cdot 10^{-10}\ \text{m}$$

Po podstawieniu danych liczbowych do (1) otrzymujemy:

$$\frac{e}{h} = 2{,}5 \cdot 10^{14}\ \frac{\text{C}}{\text{J} \cdot \text{s}}$$

Odpowiedź: Iloraz $\frac{e}{h}$ wynosi $2{,}5 \cdot 10^{14}\ \frac{\text{C}}{\text{J} \cdot \text{s}}$.

Uwaga. Zadanie może się wydawać osobliwe. Po co specjalnie wyznaczać iloraz dwóch stałych, skoro znamy każdą z nich? Okazuje się jednak, że w wielu sytuacjach iloraz lub iloczyn dwóch stałych możemy wyznaczyć doświadczalnie z większą dokładnością niż każdą z nich z osobna.

1. Jakie napięcie jest potrzebne, aby lampa rentgenowska wytwarzała fale z całego zakresu tego promieniowania?
2. Oblicz krótkofalową granicę promieniowania rentgenowskiego wytworzonego przez lampę, do której przyłożono napięcie $U = 60$ kV. Oblicz także odpowiadające mu częstotliwość i energię fotonu.
3. Powtórz obliczenia z przykładu, ale dla innego wykresu niż omówiony w rozwiązaniu. Porównaj wynik z wynikiem z przykładu.

Projekt Spektroskop

Zadania

1. Zbuduj spektroskop zgodnie z poniższą instrukcją.
2. Skieruj spektroskop szczeliną w kierunku lampy i zajrzyj do okienka. Zobaczysz widmo światła. Oko trzeba przyłożyć do okienka tak, aby do wnętrza przyrządu nie dostawało się światło z zewnątrz. Możesz także nakryć głowę ciemną tkaniną, tak jak robili dawni fotografowie. Spod tkaniny powinna wystawać tylko część spektroskopu ze szczeliną.
3. Zbadaj w ten sposób światło z różnych źródeł, np. różnych rodzajów lamp, płomienia ze spalania różnych substancji, błękitnego nieba, świecącego na niebiesko monitora LCD.

   Uwaga. Nie patrz za pomocą spektroskopu (ani żadnych innych przyrządów) na Słońce – możesz stracić wzrok! Widmo Słońca można obserwować na ekranie. Zastanów się, jak wykorzystać cień spektroskopu, aby ustawić go szczeliną w stronę Słońca.
4. Opisz swoje obserwacje jak najdokładniej. Widmo światła lamp możesz porównać z informacjami na stronach internetowych producentów, a widmo płomieni – z widmami pierwiastków wchodzących w skład spalanych substancji. A jakie barwy widać w niebieskim świetle monitora?

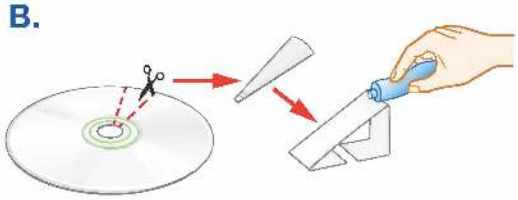
Instrukcja budowy spektroskopu

1. Znajdź albo sklej z kartonu podłużne pudełko o długości 20–30 cm i pozostałych wymiarach 5–10 cm. Możesz pomalować je od środka na czarno, choć nie jest to konieczne.
2. Wytnij fragmenty pudełka w sposób pokazany na rysunku A.
3. Ze starej płyty CD wytnij wycinek o szerokości ok. 3 cm (rys. B).
4. Za pomocą kleju i paska kartonu umocuj kawałek płyty naprzeciwko okienka wyciętego w bocznej ścianie pudełka (rys. C).
5. Na odcięte denko załóż folię aluminiową (uważaj, aby jej nie pognieść) i ostrym nożykiem delikatnie wykonaj w niej wąskie nacięcie (rys. D).

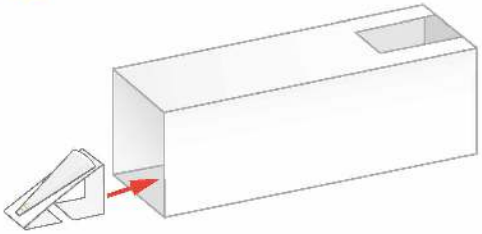
A.



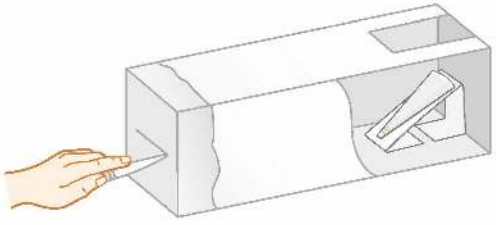
B.



C.



D.



Podsumowanie
Fizyka atomowa i kwanty promieniowania elektromagnetycznego

- Każde ciało wytwarza **promieniowanie termiczne (cieplne)** złożone z fal o różnej długości. Długość fali, dla której promieniowanie jest najsilniejsze, zależy od temperatury zgodnie z **prawem Wiena**:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

gdzie: λ_{max} – długość fali odpowiadająca maksymalnej mocy promieniowania, T – temperatura bezwzględna ciała (w kelwinach), b – stała $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m \cdot K}$.

- **Ciało doskonale czarne** to ciało, które pochłania całe padające na nie promieniowanie.

- **Efekt cieplarniany**

Gazy zawarte w atmosferze (zwłaszcza dwutlenek węgla, metan, para wodna) przepuszczają światło widzialne, ale odbijają w stronę Ziemi część emitowanego przez nią promieniowania podczerwonego.



- Nasilenie efektu cieplarnianego zostało wywołane przez działalność człowieka, głównie przez spalanie paliw kopalnych oraz przemysłową hodowlę przeżuwaczy. Jego skutkiem jest globalne ocieplenie – zmiana klimatu całej Ziemi.
- W systemie klimatycznym istnieje wiele sprzężeń zwrotnych, powodujących, że zwiększenie średniej temperatury Ziemi uruchamia zjawiska przyczyniające się do jej dalszego zwiększania.

- Energia E jednego fotonu, czyli **kwantu** (najmniejszej ilości) promieniowania elektromagnetycznego, jest równa:

$$E = hf$$

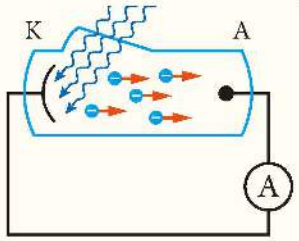
gdzie: h – stała Plancka $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s} = 4{,}14 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{eV \cdot s}$, f – częstotliwość promieniowania.

- **Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne** polega na wybijaniu elektronów z powierzchni metalu przez fotony. Zachodzi ono tylko dla promieniowania o częstotliwości większej od pewnej częstotliwości granicznej, czyli dla fotonów o dostatecznie dużej energii, która wystarcza na **pracę wyjścia** W. Po wybiciu elektronu z metalu energia elektronu jest równa co najwyżej:

$$E' = hf - W$$

- **Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne** polega na tym, że po oświetleniu półprzewodnika promieniowaniem o odpowiedniej częstotliwości jego elektrony uzyskują energię wystarczającą do poruszania się po całej próbce, ale jej nie opuszczają. Półprzewodnik może wtedy przewodzić prąd elektryczny.

- **Fotokomórka** to urządzenie, które w swoim działaniu wykorzystuje efekt fotoelektryczny.



- **Zjawisko fotochemiczne** to reakcja chemiczna zachodząca pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego o dostatecznie wysokiej częstotliwości.

- Foton ma **pęd** o wartości:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{E}{c}$$

gdzie: h – stała Plancka, f – częstotliwość promieniowania, c – prędkość światła, E – energia fotonu.

- Materia ma własności zarówno cząsteczkowe, jak i falowe (**dualizm korpuskularno-falowy**), dlatego każdemu obserwowanemu ciału możemy przypisać falę materii o długości:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

gdzie: λ – długość fali materii, tzw. **długość fali de Broglie'a**, h – stała Plancka, p – pęd ciała.

- Energia elektronu w atomie nie może być dowolna, ale zawsze przyjmuje tylko jedną z wartości zwanych **poziomami energetycznymi**. Najniższy dozwolony poziom energetyczny to **stan podstawowy**, a pozostałe poziomy to **stany wzbudzone**.

- Widmo światła emitowanego przez rozgrzane ciało jest **widmem ciągłym** – każda barwa płynnie przechodzi w następną.



- Widmo światła emitowanego przez wzbudzony gaz złożony z pojedynczych atomów jest **widmem dyskretnym** (liniowym) – składa się z pojedynczych linii, które są charakterystyczne dla danej substancji.

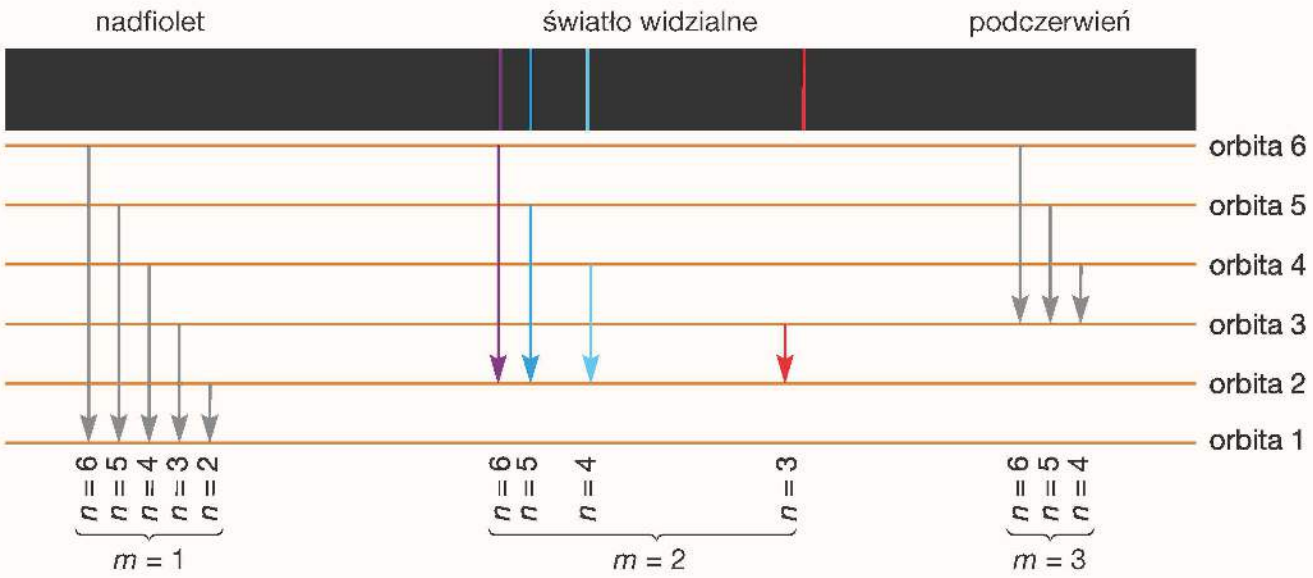


- **Wzór Rydberga** na długość fali emitowanej przez elektron przy przeskoku z orbity o numerze n na orbitę o numerze m:

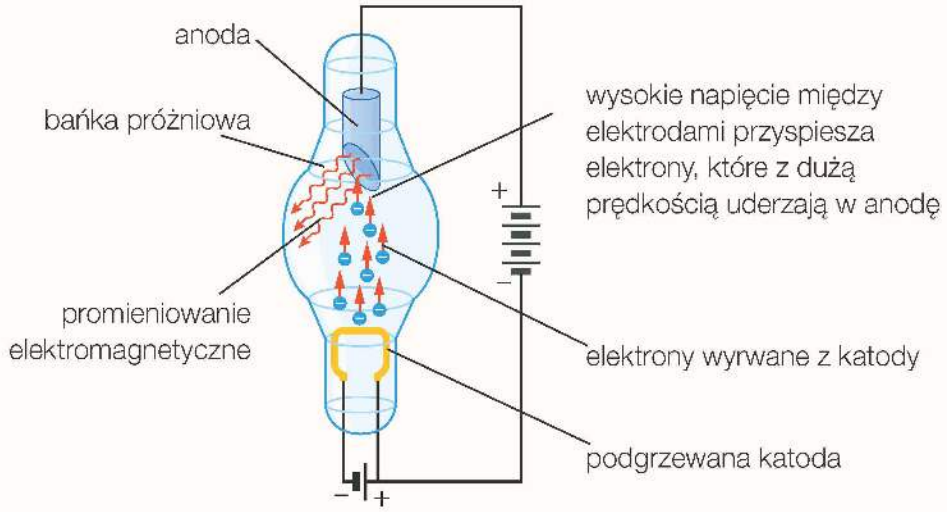
$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) = \frac{E_0}{hc}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right),\ n > m$$

gdzie: R – stała Rydberga $R = 1{,}1 \cdot 10^7\ \frac{1}{\mathrm{m}}$, E_0 – energia jonizacji, c – prędkość światła, h – stała Plancka.

Widmo atomu wodoru



Lampa rentgenowska



Minimalna długość fali promieniowania hamowania, czyli **krótkofalowa granica** promieniowania rentgenowskiego wytwarzanego przy danym napięciu:

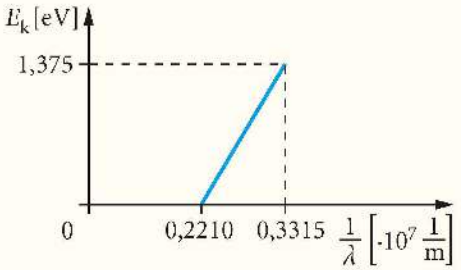
$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{ch}{eU}$$

gdzie: e – ładunek elementarny, U – napięcie przyłożone między elektrodami, h – stała Plancka.

Sposób na zadanie

Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk oraz ilustracji praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. Fotokatodę wykonaną z sodu oświetlano światłem o różnej długości fali, a następnie sporządzono wykres zależności maksymalnej energii kinetycznej uwalnianych fotoelektronów od odwrotności długości fali światła, którym oświetlano ten metal.



Zadanie 1.1 (0–2)
Oblicz pracę wyjścia elektronu dla tej katody. Wynik podaj w dżulach.

Zadanie 1.2 (0–3)
Na podstawie wykresu wyznacz stałą Plancka. Załóż, że praca wyjścia dla sodu wynosi 2,750 eV.

Rozwiązanie:

Wskazówka 1. Zanim zaczniesz cokolwiek obliczać, zastanów się, jak przebiega omawiane zjawisko. Jeśli w zadaniu jest wykres, sprawdź dokładnie, jakie wielkości zaznaczono na osiach.

Ad 1.1. W opisanym doświadczeniu katodę, czyli płytkę wykonaną z sodu, oświetlano światłem o różnej długości. Na poziomej osi wykresu znajduje się odwrotność długości fali. Kiedy ta odwrotność była dostatecznie duża, elektrony były wybijane, czyli zachodziło zjawisko fotoelektryczne.
Duża wartość odwrotności długości fali oznacza, że sama długość fali jest niewielka, a to z kolei znaczy, że częstotliwość jest wysoka. Tak więc zjawisko fotoelektryczne zachodzi dla fal o dostatecznie wysokiej częstotliwości, co zgadza się z naszą wiedzą na jego temat.
Graniczny przypadek to fala, dla której:

$$\frac{1}{\lambda} = 0{,}2210 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{m}}, \text{ a więc } \lambda = \frac{1}{0{,}2210 \cdot 10^7}\ \text{m}$$

Energia fotonu światła o tej długości jest równa pracy wyjścia $E_f = W$. Jeżeli foton ma mniejszą energię, nie wybija elektronów, a jeżeli ma większą – wybija je, a całość lub część pozostałej energii zmienia się w energię kinetyczną elektronu.

Energię fotonu obliczamy ze wzoru $E_f = hf$, a ponieważ $f = \frac{c}{\lambda}$, można go zapisać w postaci:

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} = hc \cdot \frac{1}{\lambda}$$

Wielkości h i c to stałe, a odwrotność długości fali dla granicznej wartości odczytaliśmy z wykresu. Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$E_f \approx 4{,}4 \cdot 10^{-19}\ \text{J} \approx 2{,}75\ \text{eV}$$

Odpowiedź: Praca wyjścia dla katody wykonanej z sodu wynosi ok. 2,75 eV.

Ad 1.2. W zadaniu 1.1 skorzystaliśmy z jednego z charakterystycznych punktów wykresu – punktu, w którym wykres się zaczyna. Skorzystamy teraz z innego punktu, którego współrzędne można dokładnie odczytać (koniec wykresu).
Punkt ten odpowiada sytuacji, gdy na katodę pada fala o długości:

$$\lambda = \frac{1}{0{,}3315 \cdot 10^7}\ \text{m}$$

a wybity elektron może osiągnąć maksymalnie energię kinetyczną 1,375 eV. Jaka przemiana energii zachodzi podczas tego zjawiska?
Energia fotonu częściowo zostaje zużyta na wyrwanie elektronu z metalu (czyli na pracę wyjścia), a cała reszta staje się energią kinetyczną elektronu. Możliwe są jeszcze straty energii, ale skoro 1,375 eV to **maksymalna** energia elektronu, więc odpowiada ona sytuacji, gdy te straty są pomijalnie małe.

Możemy zatem zapisać:

$$E_f = W + E_k$$

Podstawiamy wzór na energię fotonu i wyznaczamy stałą Plancka:

$$hc \cdot \frac{1}{\lambda} = W + E_k \quad \rightarrow \quad h = \frac{W + E_k}{c \cdot \frac{1}{\lambda}}$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$h = \frac{2{,}750\ \text{eV} + 1{,}375\ \text{eV}}{3 \cdot 10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0{,}3315 \cdot 10^7\ \frac{1}{\text{m}}} \approx 4{,}148 \cdot 10^{-15}\ \text{eV} \cdot \text{s} \approx 6{,}637 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$$

Odpowiedź: Otrzymaliśmy wartość stałej Plancka ok. $4{,}15 \cdot 10^{-15}$ eV · s.

Warto zapamiętać!

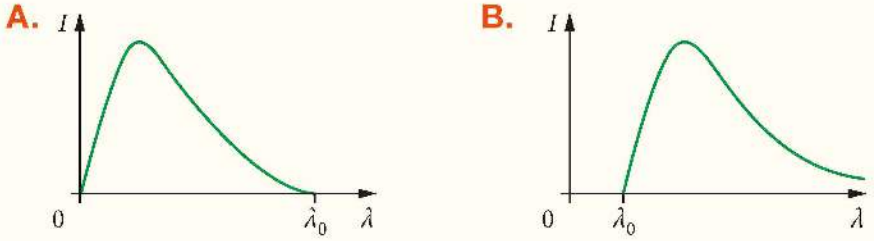
- Zjawisko fotoelektryczne zachodzi dla dostatecznie wysokiej częstotliwości światła, czyli dla dostatecznie małej długości fali światła.
- Maksymalna energia wybitnego elektronu to różnica między energią padającego fotonu a pracą wyjścia.

Zadanie 2. W lampie rentgenowskiej elektrony emitowane z katody są rozpędzane w polu elektrycznym, a następnie uderzają w anodę, gdzie gwałtownie hamują, co powoduje powstawanie promieniowania elektromagnetycznego. Promieniowanie to składa się z fotonów o różnej energii, a więc z fal o różnej częstotliwości. Jest tak, ponieważ elektron na ogół traci część energii na zderzenia z atomami anody. Maksymalna energia fotonu odpowiada całej energii elektronu.

Zadanie 2.1 (0–1)

Wskaż uzupełnienie zdania A lub B i jego uzasadnienie spośród 1–3.
Zależność natężenia promieniowania powstającego w lampie rentgenowskiej od długości fali tego promieniowania prawidłowo przedstawia wykres:

A.,	ponieważ	1.	energia fotonu nie może przekroczyć energii padającego elektronu.
B.,		2.	istnieje taka długość fali, dla której natężenie promieniowania jest maksymalne.
		3.	energia fotonu nie może być mniejsza niż energia padającego elektronu.



Zadanie 2.2 (0–4)

Elektrony w pewnej lampie rentgenowskiej są rozpędzane przez różnicę potencjałów U. Wyprowadź wzór pozwalający obliczyć λ_0 w zależności od U oraz stałych fizycznych. Przedstaw tę zależność na wykresie dla napięcia do 50 kV.

Rozwiązanie:

Ad 2.1

Poprawne uzupełnienie zdania to **B** i **1**.

> **Wskazówka 2.** W niektórych zadaniach podane jest dużo informacji na temat opisanego zjawiska, więc nawet jeśli nie pamiętasz ich z lekcji, to i tak masz szansę rozwiązać zadanie.

Zwróćmy uwagę na zdanie: „Maksymalna energia fotonu odpowiada całej energii elektronu". Wynika z niego, że energia fotonu nie może przekroczyć pewnej maksymalnej wartości. W takim razie także częstotliwość fali nie może przekroczyć pewnej wartości (czyli być zbyt duża – im większa energia, tym większa częstotliwość), a co za tym idzie – **długość fali nie może być zbyt mała** (im mniejsza długość fali, tym większe częstotliwość i energia). To oznacza, że poprawny jest wykres B, natomiast właściwe uzasadnienie to 1.

Zwróć uwagę, że zdanie 2. także jest prawdziwe, jednak nie stanowi uzasadnienia dla wyboru wykresu.

Ad 2.2. Wiemy już, że długość fali λ_0 odpowiada energii fotonu, którego energia jest równa całej energii padającego elektronu:

$$E_{\mathrm{f\,max}} = hf_{\max} = E_{\mathrm{e\,max}}$$

Z kolei elektron uzyskał swoją energię w polu elektrycznym pod napięciem U, więc jego energia wynosi:

$$E_{\mathrm{e\,max}} = Ue$$

Przyrównujemy wzory na energię, podstawiamy wzór na częstotliwość $f_{max} = \frac{c}{\lambda_0}$ i wyznaczamy minimalną długość fali, jaką może mieć promieniowanie:

$$hf_{max} = Ue \rightarrow \frac{hc}{\lambda_0} = Ue \rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{Ue}$$

We wzorze na długość fali h, c oraz e to stałe, czyli otrzymaliśmy żądany wzór.
Aby przedstawić go na wykresie, zauważmy, że mamy do czynienia z proporcjonalnością odwrotną:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{e} \cdot \frac{1}{U}$$

Obliczmy stały współczynnik:

$$\frac{hc}{e} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}} \approx 1{,}243 \cdot 10^{-6}\ \frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot \text{m} = 1{,}243 \cdot 10^{-6}\ \text{V} \cdot \text{m}$$

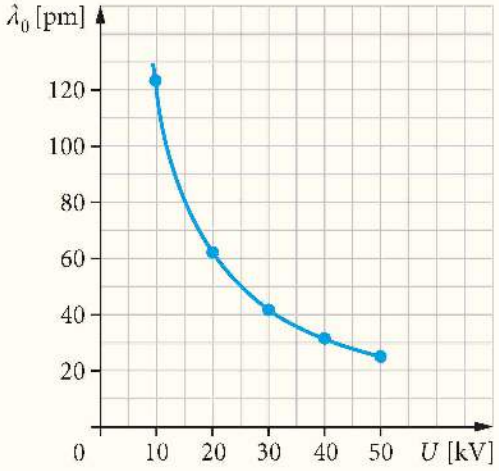
Teraz możemy obliczyć λ_0 dla kilku wartości U w podanym zakresie.

U [V]	10 000	20 000	30 000	40 000	50 000
λ_0 [m]	$1{,}243 \cdot 10^{-10}$	$6{,}215 \cdot 10^{-11}$	$4{,}143 \cdot 10^{-11}$	$3{,}108 \cdot 10^{-11}$	$2{,}486 \cdot 10^{-11}$

Warto zapisać te wielkości w wygodniejszych jednostkach i zaokrąglić.

U [kV]	10	20	30	40	50
λ_0 [pm]	124	62	41	31	25

Teraz możemy zaznaczyć dane punkty w układzie współrzędnych i naszkicować przechodzącą przez nie hiperbolę.



Warto zapamiętać!

- Ładunek poruszający się z przyspieszeniem emituje falę elektromagnetyczną. Ten fakt wykorzystujemy w praktyce w lampach rentgenowskich, gdzie rozpędzony elektron hamuje z przyspieszeniem o dużej wartości, gdy uderza w anodę lampy.
- Maksymalna energia fotonu emitowanego przez lampę rentgenowską jest równa energii elektronu, którą możemy obliczyć na podstawie napięcia, w jakim był rozpędzany elektron.
- Długość fali odpowiadającej tej maksymalnej energii fotonu to krótkofalowa granica promieniowania rentgenowskiego (najkrótsza możliwa długość fali wytwarzanej przez lampę). Zależy ona tylko od napięcia, w jakim rozpędza się elektron.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Dwie diody

Diody LED czerwona i zielona mają jednakowe moce i jednakowe sprawności. Wskaż właściwe zakończenie zdania spośród A–C oraz jego uzasadnienie spośród 1–3.

W porównaniu z zieloną diodą czerwona dioda emituje:

A.	tyle samo fotonów,	ponieważ	1.	moc wytwarzanego światła jest jednakowa.
B.	mniej fotonów,		2.	światło zielone ma wyższą częstotliwość.
C.	więcej fotonów,		3.	każdy foton światła o danej barwie ma jednakową energię.

Zadanie 2. Odrzut atomu

2.1. Spoczywający początkowo atom wodoru wyemitował foton światła o długości $\lambda = 433$ nm, co spowodowało jego odrzut.
Oblicz, z jaką prędkością zaczął poruszać się atom po wyemitowaniu fotonu. W którą stronę zaczął się poruszać?

2.2. Spoczywający początkowo atom wodoru wyemitował foton światła o długości $\lambda_1 = 433$ nm, a następnie foton promieniowania o długości $\lambda_2 = 121$ nm. Fotony te zostały wysłane w kierunkach wzajemnie prostopadłych.
Oblicz wartość prędkości atomu po obu emisjach i wyznacz kierunek, jaki tworzy ta prędkość z kierunkiem emisji pierwszego fotonu.

Zadanie 3. Interferencja elektronów

Źródło elektronów wytwarza jeden elektron na sekundę. Każdy z powstających elektronów zostaje rozpędzony w polu elektrycznym pod napięciem $U = 1$ kV, pada na przesłonę z dwiema cienkimi szczelinami odległymi o $d = 150$ nm, a następnie na ekran, umieszczony za nią w odległości $L = 10$ m. Ekran jest początkowo czarny, ale trwale przebarwia się na biało w miejscu, na które pada elektron. Z czasem na ekranie zarysowuje się obraz podobny do prążków powstających w wyniku interferencji światła.

3.1. Uzasadnij, że pomiędzy źródłem a ekranem nigdy nie znajdował się więcej niż jeden elektron.

3.2. Wyjaśnij, dlaczego przebieg doświadczenia pozwala wykluczyć hipotezę, że powstawanie prążków jest wynikiem wzajemnego oddziaływania elektronów.

3.3. Po zakończeniu eksperymentu chcemy włączyć źródło elektronów jeszcze na 1 s. Wskaż właściwe zakończenie zdania.
Na podstawie układu prążków możemy:
A. przewidzieć, w które miejsce padnie kolejny elektron, jeśli znów włączymy źródło.
B. spodziewać się, że elektron padnie z większym prawdopodobieństwem na jeden z białych prążków niż na jeden z czarnych.
C. spodziewać się, że elektron padnie z mniejszym prawdopodobieństwem na jeden z białych prążków niż na jeden z czarnych.

3.4. Oblicz, w jakiej odległości od środkowego (zerowego) prążka powstaje pierwszy jasny prążek.

Zadanie 4. Lampa rentgenowska

Pewna lampa rentgenowska pozwala płynnie regulować napięcie rozpędzające elektrony w przedziale od 10 kV do 20 kV.

4.1. Wybierz właściwe uzupełnienia zdania A lub B oraz C lub D.
Jeśli chcemy wytwarzać promieniowanie rentgenowskie o wysokiej częstotliwości, należy ustawić napięcie **A**/ **B**, ponieważ energia elektronów padających na anodę lampy jest wówczas **C**/ **D**.
A. 10 kV **B.** 20 kV **C.** najmniejsza **D.** największa

4.2. Oblicz, jakie napięcie należy ustawić, aby krótkofalowa granica promieniowania rentgenowskiego wytwarzanego przez lampę wynosiła 0,1 nm.

4.3. Zaznacz właściwe dokończenie zdania spośród A–C oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–3.
Przy ustalonym napięciu 10 kV fotony powstającego promieniowania rentgenowskiego mają energię równą:

A.	dokładnie 10 keV,	ponieważ	1.	elektrony poruszają się w rurze próżniowej bez oporów ruchu.
B.	co najmniej 10 keV,		2.	część energii elektronów zwiększa energię wewnętrzną anody.
C.	co najwyżej 10 keV,		3.	cała praca wykonana przez pole elektryczne nad danym elektronem zmienia się w jego energię kinetyczną.



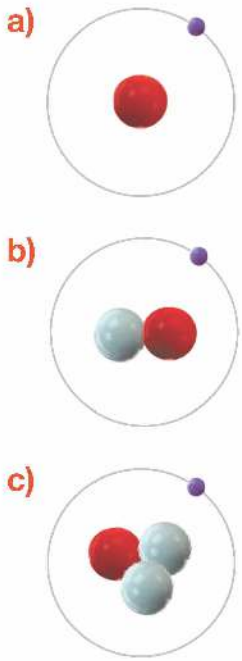
18 Fizyka jądrowa

1. Jądro atomowe
2. Reakcje jądrowe
3. Promieniowanie jądrowe
4. Czas połowicznego rozpadu
5. Masa a energia
6. Energia jądrowa
7. Energia syntezy termojądrowej
8. Ewolucja Słońca i innych gwiazd
9. Galaktyki i Wszechświat

18.1. Jądro atomowe

Przypomnij sobie

- Atom składa się z jądra i otaczających go elektronów.
- Jądro atomu jest zbudowane z protonów i neutronów.
- Elektron ma ładunek elektryczny $-e$, proton ma ładunek $+e$, a neutron jest obojętny elektrycznie.



Rys. 18.1. Izotopy wodoru w przyrodzie: a) prot (zwykły wodór) – 99,985%, b) deuter – 0,015%, c) tryt – śladowe ilości

Budowa jądra atomowego

O budowie atomu wspomnieliśmy już w rozdziale 17. Interesowały nas jednak głównie elektrony. Teraz zajmiemy się dokładniej budową jądra atomowego. Wiesz już, że składa się ono z protonów i neutronów, zwanych łącznie nukleonami (od łac. *nucleus* – jądro).

Jądra atomów tego samego pierwiastka zawierają tyle samo protonów. Mogą się one jednak różnić liczbą neutronów – wówczas mówimy o różnych izotopach tego samego pierwiastka.

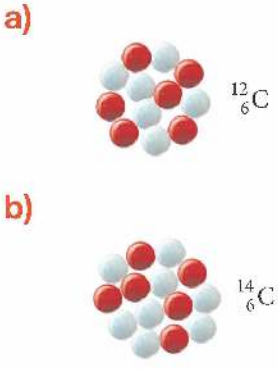
Nazwa *izotop* pochodzi od greckiego wyrażenia oznaczającego *w tym samym miejscu*. Chodzi o miejsce w układzie okresowym pierwiastków.

Izotopy tego samego pierwiastka mają praktycznie jednakowe właściwości chemiczne.

Jest tak, ponieważ:

- Atom zawiera tyle samo elektronów, ile protonów.
- Przy jednakowej liczbie elektronów jednakowy jest również ich układ na orbitach, w tym także na orbicie walencyjnej.
- O właściwościach chemicznych decydują elektrony walencyjne.

W przyrodzie występują różne izotopy wielu pierwiastków znanych z życia codziennego. Na przykład węgiel ma 6 protonów, a liczba jego neutronów najczęściej wynosi 6, ale czasami 8 (inne izotopy są niezwykle rzadkie, rys. 18.2). Oba te izotopy występują w CO_2 w atmosferze, są przyswajane przez rośliny w procesie fotosyntezy, trafiają do naszego pokarmu, więc ostatecznie nasze organizmy są z nich obu zbudowane.



Rys. 18.2. Schematyczny rysunek jądra węgla (protony – czerwone): a) $^{12}_{6}C$, b) $^{14}_{6}C$

Liczba atomowa i liczba masowa

Do opisu izotopów służą dwie wielkości:

Liczba atomowa (Z) oznacza liczbę protonów w jądrze, a liczba masowa (A) łączną liczbę nukleonów (protonów i neutronów).

Na przykład izotop węgla o 6 protonach i 8 neutronach ma liczbę atomową A = 6 i liczbę masową Z = 6 + 8 = 14. Liczby atomową i masową zapisujemy po lewej stronie symbolu chemicznego:

$$^{14}_{6}C$$

Często w takim zapisie pomijamy liczbę atomową (np. ^{14}C), ponieważ dla danego pierwiastka jest ona jednoznacznie określona. Poprawny jest także zapis: węgiel-14.

Liczba atomowa jest jednocześnie numerem pierwiastka w układzie okresowym. Ma ona przy tym ważne znaczenie fizyczne, z którego będziemy korzystać:

> **Liczba atomowa oznacza jednocześnie ładunek elektryczny jądra wyrażony w ładunkach elementarnych.**

Na przykład jądro węgla zawiera 6 protonów, więc jego ładunek wynosi $+6e$.

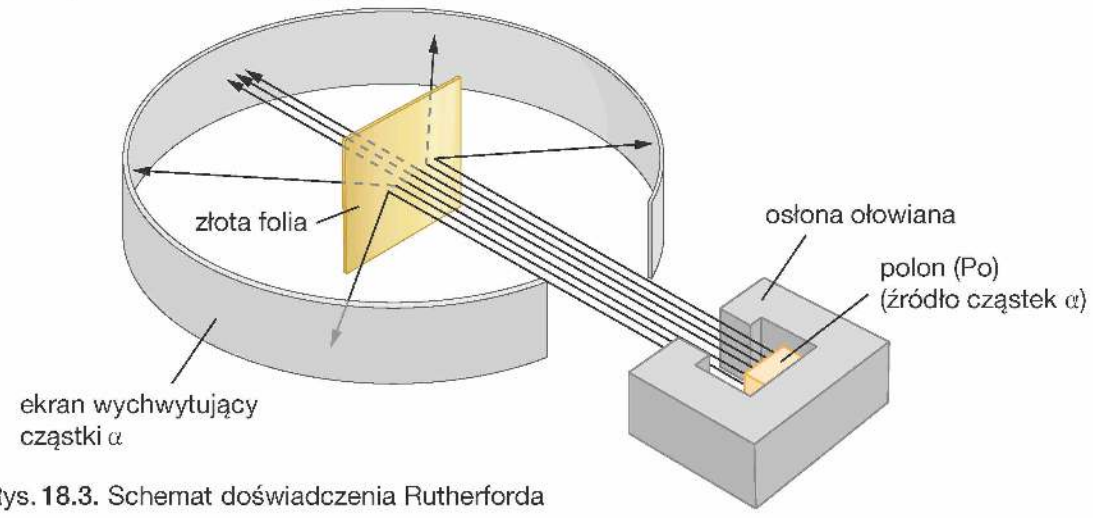
Ładunek protonu jest dodatni i równy ładunkowi elementarnemu $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

Odkrycie jądra atomowego

Zanim odkryto jądro atomowe, wiedziano, że atom zawiera ujemnie naładowane elektrony. Domyślano się więc, że musi zawierać także ładunek dodatni. Na ogół jednak atom wyobrażano sobie jako ciągłą, dodatnio naładowaną masę, w której jak rodzynki w cieście są rozmieszczone elektrony.

Kilka modeli atomu przedstawiliśmy w temacie 17.7, s. 167, przy czym tzw. model ciasta z rodzynkami to model Thompsona.

Pogląd ten uległ zmianie dopiero w 1911 r., po opublikowaniu przez Ernesta Rutherforda (czyt. raderforda) wyników pewnego doświadczenia (rys. 18.3). Bardzo cienką złotą folię bombardował on cząstkami alfa (jądrami helu). Większość cząstek przechodziła przez nią bez zmiany kierunku lub zmiana ta była nieznaczna. Jednak niektóre odbijały się pod kątem niemal 180°. Rutherford wspominał później, że to „było tak, jakby piętnastocalowy pocisk wystrzelony w kawałek bibułki odbił się od niej i trafił w strzelającego".



Rys. **18.3.** Schemat doświadczenia Rutherforda

Doświadczenie Rutherforda dowodziło, że atom jest w znacznej części pusty, ale zawiera także dużą masę skupioną w małej objętości. Dalsze doświadczenia wykazały, że jest ona naładowana dodatnio. Tę dodatnio naładowaną masę nazwano jądrem atomowym.

Liczba masowa a masa atomowa

Prawie cała masa atomu jest zgromadzona w jądrze.

> Proton i neutron mają zbliżone masy. Elektron ma masę ok. 2000 razy mniejszą od każdego z nukleonów.

Masę atomową (1 u) zdefiniowano jako $\frac{1}{12}$ masy atomu węgla ^{12}C.

Liczba masowa izotopu wodoru najpowszechniej występującego w przyrodzie wynosi 1, a masa atomowa wodoru jest równa 1,008 u. Podobieństwo tych liczb nie jest przypadkowe. Czysty izotop $^{1}_{1}H$ miałby masę atomową jeszcze bardziej zbliżoną do 1 u.

Podobnie masa atomowa azotu wynosi 14,006 u, a najczęstszy izotop tego pierwiastka to $^{14}_{7}N$.

Gdy pominiemy różnicę masy między protonem a neutronem, masę elektronów, a także deficyt masy (o którym powiemy w lekcji 18.6), stwierdzimy że jednostka masy atomowej to w przybliżeniu masa jednego nukleonu.

Masa atomowa podana w układzie okresowym to średnia masa atomowa, uwzględniająca różne izotopy pierwiastka wraz z częstością ich występowania.

Dokładniej: masa protonu to $1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ kg, masa neutronu to $1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ kg, a jednostka masy atomowej to $1{,}6605 \cdot 10^{-27}$ kg. Różnice nie przekraczają więc 1%.

W przypadku pierwiastków, w których składzie wyraźnie dominuje jeden izotop, masa atomowa jest zbliżona do liczby masowej tego izotopu. Inaczej jest choćby w przypadku miedzi, której masa atomowa wynosi ok. 63,54 u. Jest tak, ponieważ w przyrodzie występują dwa izotopy miedzi: ^{63}Cu oraz ^{65}Cu, przy czym drugi z nich stanowi ok. 30% atomów.

Oddziaływania jądrowe

Wszystkie protony w jądrze mają ładunek dodatni. Odpychają się więc siłami elektrycznymi, które jednak są równoważone przez przyciągające **siły jądrowe**.

Siły jądrowe działają tylko na niewielkich odległościach, więc w praktyce tak oddziałują na siebie tylko sąsiadujące ze sobą nukleony. To właśnie dlatego największe jądra rozpadają się samorzutnie: odpychanie elektryczne jest w nich silne, ponieważ protonów jest wiele, a dla sił jądrowych odległe (w skali jądrowej) nukleony nie mają znaczenia.

W odróżnieniu od sił elektrycznych, działających tylko pomiędzy naładowanymi elektrycznie protonami, siły jądrowe działają również między neutronami oraz między neutronami a protonami.

Cząstki elementarne

Nukleony, elektrony, a także fotony nazywamy **cząstkami elementarnymi**. Ta nazwa oznacza cząstki, których nie da się podzielić na mniejsze. Co prawda nukleony składają się z kwarków, ale kwarki nie występują jako cząstki swobodne.

Kwarki, cz. III s. 71

Oprócz wyżej wymienionych istnieje jeszcze bardzo wiele innych cząstek elementarnych. Wkrótce powiemy o jednej z nich – neutrinie.

Materia i antymateria

W przypadku prawie każdej cząstki elementarnej istnieje jej antycząstka, podobna pod wieloma względami, ale o przeciwnym ładunku elektrycznym. Antyelektron, zwany także pozytonem, ma więc ładunek dodatni. Swojej antycząstki nie ma natomiast foton lub inaczej – sam jest własną antycząstką.

W fizyce jądra atomowego literą gamma oznacza się wszystkie fotony, niezależnie od energii.

Gdy cząstka i jej antycząstka się spotkają, **anihilują**. Dosłownie oznacza to, że znikają, jednak nie znikają całkowicie – powstają z nich inne cząstki. Oto przykładowe równanie anihilacji elektronu i pozytonu:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$$

W reakcji anihiliacji 10-gramowego kamyka z antymaterii z 10-gramowym kamykiem z materii wydzieliłoby się $1{,}8 \cdot 10^{15}$ J energii, czyli prawie tysiąc razy więcej niż w eksplozji największej dotychczas testowanej bomby wodorowej.

Jak to obliczyć, pokażemy w temacie 18.5.

Zjawiskiem odwrotnym do anihilacji jest **kreacja**. Dosłownie oznacza ona stworzenie, ale cząstki nie powstają z niczego, tylko z fotonów. Jest bardzo mało prawdopodobne, że dwa fotony o odpowiedniej energii zderzą się w próżni i powstanie z nich para złożona z cząstki i antycząstki. Częściej zdarza się, że taka para powstaje w materii na skutek oddziaływań wysokoenergetycznego fotonu z atomami (jądrami i elektronami), zachodzących właśnie poprzez wymianę drugiego fotonu.

Materia i antymateria mają symetryczne właściwości, więc mogłoby się wydawać, że we Wszechświecie powinno być tyle samo jednego i drugiego rodzaju cząstek. Najprawdopodobniej tak jednak nie jest, chyba że gdzieś w bardzo dalekich obszarach kosmosu istnieją całe antygalaktyki, zbudowane z antymaterii. Na to jednak nic nie wskazuje.

Fizycy nie potrafią jeszcze do końca wyjaśnić źródła asymetrii między materią i antymaterią.

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać budowę jądra atomowego;
- posługiwać się pojęciami liczby atomowej i liczby masowej;
- znać terminy: pierwiastek, nukleon, izotop, cząstka elementarna, antymateria, anihilacja, kreacja.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Oszacuj stosunek gęstości gazów: helu i wodoru na podstawie własności ich atomów. Porównaj swój wynik z wartościami znalezionymi w tablicach fizycznych.

Rozwiązanie

Wodór występuje w przyrodzie prawie wyłącznie w postaci izotopu ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$, w cząsteczkach dwuatomowych. Natomiast hel jest gazem szlachetnym i jego cząsteczki są jednoatomowe, a w przyrodzie występuje niemal wyłącznie jako izotop ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$. W dobrym przybliżeniu masa cząsteczki wodoru jest więc równa masie dwóch protonów, a masa cząsteczki helu jest równa masie czterech protonów.

Ponieważ 1 mol każdego gazu ma taką samą objętość, w danej objętości wodoru znajduje się tyle samo cząsteczek, co w takiej samej objętości helu. To oznacza, że hel ma gęstość około dwukrotnie większą niż wodór.

Z tablic fizycznych wynika, że ten stosunek to w warunkach normalnych dokładniej:

$$\frac{d_{\mathrm{He}}}{d_{\mathrm{H}}} = \frac{0{,}164\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}}{0{,}0823\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}} \approx 1{,}993$$

Odpowiedź: Zgodnie z oszacowaniem hel ma gęstość dwukrotnie większą niż wodór, co z bardzo dobrą dokładnością zgadza się z danymi tablicowymi.

1. Wykonaj polecenia i odpowiedz na pytania:

a) Zapisz, ile protonów i ile neutronów jest w jądrze izotopu ${}^{56}_{26}\mathrm{X}$. Jakiego pierwiastka jest to izotop?

b) Znajdź w układzie okresowym pierwiastek, którego jądro zawiera dwa protony. Zapisz jego symbol.

c) Czy izotopy różnych pierwiastków mogą mieć jednakową liczbę masową? Jeśli nie, wyjaśnij dlaczego, a jeśli tak – podaj przykład.

d) Czy ciało człowieka zawiera więcej protonów czy neutronów?

2. W naturalnie występującym chlorze znajdują się izotopy ${}^{35}\mathrm{Cl}$ oraz ${}^{37}\mathrm{Cl}$, przy czym pierwszy stanowi 76% masy naturalnego chloru, a drugi 24%.

Oblicz średnią liczb masowych tych izotopów z uwzględnieniem częstości ich występowania. Porównaj wynik z masą atomową chloru, wynoszącą 35,45 u.

3. Jeśli w doświadczeniu Rutherforda zamienimy cząstki alfa na protony, to również zaobserwujemy odbicie niektórych cząstek od folii. Natomiast w przypadku neutronów takie zjawisko nie zachodzi. Skąd bierze się ta różnica?

Wskazówka. Proton odchyla się nie tylko wtedy, gdy trafi w samo jądro, ale również gdy znajdzie się w pobliżu. Dlaczego?

18.2. Reakcje jądrowe

Przypomnij sobie

- Jądro atomowe składa się z nukleonów: protonów i neutronów.
- Liczba protonów w jądrze, nazywana liczbą atomową, pozwala określić, do jakiego pierwiastka należy atom. Łączną liczbę nukleonów w jądrze nazywamy liczbą masową.
- Różne izotopy tego samego pierwiastka mają tyle samo protonów w jądrze, a więc jednakową liczbę atomową, ale różnią się liczbą neutronów, a więc także liczbą masową.

Jak wiesz, w reakcjach chemicznych nie ulegają zmianie pierwiastki biorące w nich udział. Gdy zapisujemy równanie reakcji chemicznej, po każdej stronie musi występować taka sama liczba atomów danego pierwiastka. Dzieje się tak dlatego, że w tych reakcjach jądra atomów zostają zachowane.
Inaczej jest w przypadku reakcji jądrowych.

W reakcjach jądrowych zmianie ulegają jądra atomowe, więc jedne pierwiastki mogą się zmieniać w inne.

Promieniotwórczość

Reakcje jądrowe można wywoływać sztucznie. Jednak w przyrodzie zachodzą także samorzutne reakcje jądrowe, zwane **rozpadami promieniotwórczymi**, ponieważ podczas tych reakcji jest emitowane promieniowanie.

Jądra niektórych izotopów są **stabilne**, a innych – **niestabilne**. Jądra niestabilne ulegają samorzutnym reakcjom rozpadu promieniotwórczego.

Rodzaj rozpadu i intensywność reakcji, czyli procent jąder w próbce, które rozpadną się w określonym czasie, zależą od izotopu.

O tempie rozpadu powiemy w lekcji 18.4.

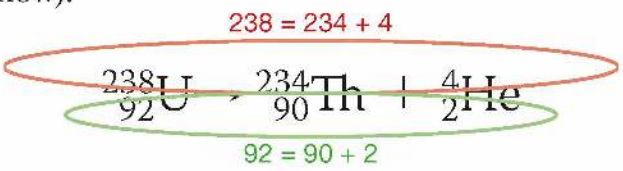
Rozpad alfa (α)

Najprostszym do zrozumienia przykładem reakcji jądrowej jest rozpad jądra atomowego na dwie części.
Szczególnie często zdarza się rozpad, w którym jednym z powstałych jąder jest jądro helu. Oto przykład:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

Rodzaje promieniowania zostały nazwane *alfa*, *beta* i *gamma*, zanim jeszcze poznano naturę każdego z nich.

Zauważ, że choć zmianie ulegają pierwiastki biorące udział w tej reakcji, nie ulegają zmianie liczby protonów i neutronów (a więc także całkowita liczba nukleonów).



W reakcjach rozpadu zamiast $^4_2$He często zapisuje się po prostu α.

Jądro helu jest nazywane **cząstką alfa**, a strumień takich cząstek wytwarzanych podczas rozpadu jąder atomowych to **promieniowanie alfa**.
W ten sposób rozpada się wiele dużych (ciężkich) jąder. Dzieje się tak dlatego, że siły przyciągania jądrowego działają tylko między sąsiednimi nukleonami, a siły odpychania elektrycznego – między wszystkimi protonami w jądrze.

Rozpad beta minus (β^-)

W rozpadzie beta minus jądro emituje **promieniowanie beta**, które jest po prostu strumieniem elektronów. To o tyle zagadkowe, że w jądrze nie ma elektronów, więc w jaki sposób mogą one opuszczać jądro?
Okazuje się, że w odpowiednich warunkach neutron może się zmienić w proton i elektron oraz przenikliwą cząstkę, zwaną antyneutrinem elektronowym $\bar{\nu}_e$.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Neutrina (oraz ich antycząstki – antyneutrina) są elektrycznie obojętne i bardzo przenikliwe, a oddziałują jedynie za pośrednictwem oddziaływań słabych (i grawitacyjnych, jak wszystko, co ma masę).
Właśnie rozpadowi beta minus ulega promieniotwórczy węgiel ^{14}C:

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}_e$$

W reakcjach rozpadu możemy też spotkać zapis elektronu jako β^-.

Przy elektronie w miejscu liczby masowej zapisaliśmy zero, ponieważ rzeczywiście elektron nie zawiera nukleonów. Natomiast zapisana w miejscu liczby atomowej liczba –1 oznacza ładunek elektryczny (podobnie jak liczba atomowa jąder).
Również w czasie tego procesu są zachowane liczba nukleonów: 14 = 14 + 0, oraz ładunek: 6 = 7 – 1.

Przemiany jądrowe i zasady zachowania

W przemianach alfa i beta nie zmieniają się ani całkowita liczba nukleonów, ani całkowity ładunek elektryczny. Jest to ogólna zasada dotycząca wszystkich przemian jądrowych.

> Zasada zachowania liczby nukleonów:
> W reakcjach jądrowych nie zmienia się całkowita liczba nukleonów.

Niezmienność ładunku to prawo znane ci już z poprzednich części podręcznika.

> Zasada zachowania ładunku elektrycznego:
> Całkowity ładunek elektryczny w układzie nie ulega zmianie.

Chociaż powyższą zasadę znasz już od szkoły podstawowej, dopiero teraz możesz w pełni docenić jej znaczenie. W przypadku elektrostatyki czy prądu elektrycznego to prawo jest oczywiste. W tych zjawiskach nie zmienia się liczba protonów i elektronów, więc nie zmienia się również ich łączny ładunek.
Natomiast w przypadku jąder atomowych i cząstek elementarnych zasada zachowania ładunku nie jest już taka oczywista. Jednak mimo że jedne cząstki zmieniają się w inne, całkowity ładunek i tak się nie zmienia.

Rozpad beta plus (β^+)

Rozpadem w pewnym sensie symetrycznym do rozpadu beta minus jest rozpad beta plus. Tym razem z protonu powstaje neutron, antyelektron (pozyton) oraz neutrino elektronowe ν_e:

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

Przykładem rozpadu β^+ jest przemiana radioaktywnego sodu w neon:

$$^{22}_{11}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\mathrm{Ne} + {}^{0}_{1}\mathrm{e} + \nu_e$$

Oczywiście także w trakcie tego procesu są zachowane liczba nukleonów: $22 = 22 + 0$, oraz ładunek: $11 = 10 + 1$.

Ładunek jest zachowany: przed reakcją wynosi $+e$ oraz po reakcji $+e$ (taki ładunek ma pozyton, a neutron i neutrino są elektrycznie obojętne).

W reakcjach jądrowych możemy też spotkać zapis pozytonu jako β^+.

Równania reakcji jądrowych

Konkretne przykłady rozpadów alfa i beta podaliśmy powyżej, zapiszmy je teraz w bardziej ogólny sposób.

Rozpad alfa

liczba masowa przed rozpadem → n
liczba atomowa przed rozpadem → m

$$^{n}_{m}\square \rightarrow {}^{n-4}_{m-2}\square + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

$^4_2\mathrm{He}$ ← cząstka alfa

Rozpad beta minus

liczba masowa przed rozpadem → n
liczba atomowa przed rozpadem → m

$$^{n}_{m}\square \rightarrow {}^{n}_{m+1}\square + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}_e$$

$^0_{-1}\mathrm{e}$ ← elektron

Rozpad beta plus

liczba masowa przed rozpadem → n
liczba atomowa przed rozpadem → m

$$^{n}_{m}\square \rightarrow {}^{n}_{m-1}\square + {}^{0}_{1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\nu_e$$

$^0_1\mathrm{e}$ ← pozyton

Spośród omówionych rodzajów promieniowania praktyczne znaczenie mają przede wszystkim alfa i beta minus. Dlatego dalej o promieniowaniu beta minus będziemy mówili krótko: „promieniowanie beta".

Po tej lekcji powinieneś

- wyjaśniać różnice między reakcjami chemicznymi a jądrowymi;
- opisywać rozpady alfa, beta plus i beta minus;
- stosować zasadę zachowania liczby nukleonów oraz zasadę zachowania ładunku do opisu przemian jądrowych.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. W organizmie człowieka i innych zwierząt znajduje się promieniotwórczy izotop potasu $^{40}_{19}\mathrm{K}$. Większa część tego izotopu rozpada się w przemianie beta minus, a mniejsza – w przemianie beta plus. Zapisz równania obu tych przemian. Jakie pierwiastki powstają w ich wyniku?

2. Przeczytaj poniższy tekst i odpowiedz na pytania.

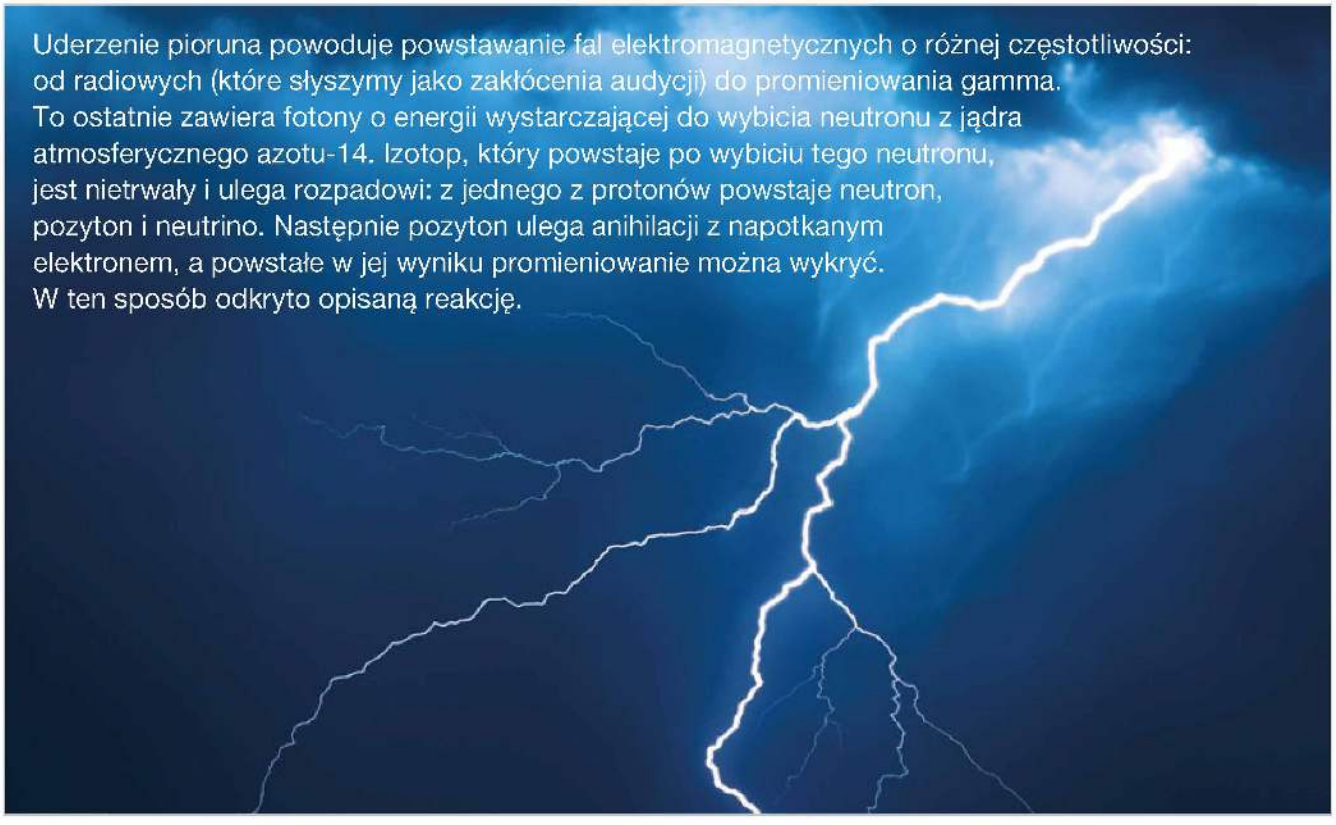
a) Jaki izotop powstaje z azotu-14 po wybiciu neutronu?

b) Jakiemu rozpadowi ulega ten powstały izotop?

c) Jaki izotop powstaje w wyniku tego rozpadu?

3. W wyniki rozpadu alfa pewnego izotopu powstaje tor $^{225}_{90}\mathrm{Th}$. Z jakiego izotopu powstaje tor-225?

4. Jak zmienia się liczba atomowa i liczba masowa w rozpadzie alfa, a jak w rozpadzie beta minus?



Uderzenie pioruna powoduje powstawanie fal elektromagnetycznych o różnej częstotliwości: od radiowych (które słyszymy jako zakłócenia audycji) do promieniowania gamma. To ostatnie zawiera fotony o energii wystarczającej do wybicia neutronu z jądra atmosferycznego azotu-14. Izotop, który powstaje po wybiciu tego neutronu, jest nietrwały i ulega rozpadowi: z jednego z protonów powstaje neutron, pozyton i neutrino. Następnie pozyton ulega anihilacji z napotkanym elektronem, a powstałe w jej wyniku promieniowanie można wykryć. W ten sposób odkryto opisaną reakcję.

18.3. Promieniowanie jądrowe

Przypomnij sobie

- Jądra niektórych izotopów się rozpadają.
- W rozpadzie alfa powstają cząstki alfa, czyli jądra helu, w rozpadzie beta minus – elektrony, a w rozpadzie beta plus – antyelektrony (pozytony).

Powstawanie promieniowania gamma

O pochodzeniu promieniowania alfa i beta mówiliśmy już w poprzedniej lekcji. A jak powstaje promieniowanie gamma?
Otóż jądra powstające w wyniku rozpadu alfa lub beta często mają dużą energię wewnętrzną – są **wzbudzone**. Tej energii pozbywają się w postaci emisji promieniowania gamma.
Sytuacja jest więc podobna jak w przypadku wzbudzonych atomów, które pozbywają się energii poprzez emisję fotonu. Jednak w przypadku promieniowania jądrowego energia jest nawet miliony razy większa.
Istnieje jeszcze wiele innych rodzajów promieniowania oprócz alfa, beta i gamma, ponieważ każdy strumień cząstek (np. protonów czy neutronów) można określić jako promieniowanie. Mówimy więc na przykład o promieniowaniu neutronowym.

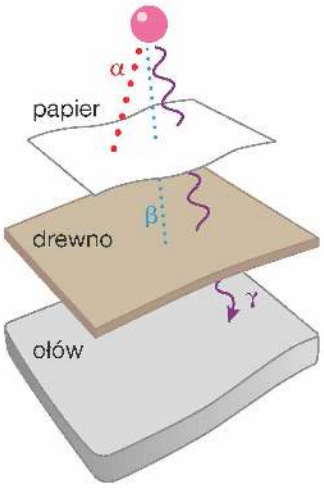
Przenikliwość promieniowania jądrowego

Przez przenikliwość rozumiemy zdolność do przenikania danego promieniowania przez materię. Można powiedzieć, że przenikliwość promieniowań alfa, beta, gamma rośnie w kolejności alfabetycznej:

- aby osłonić się przed promieniowaniem alfa, wystarczy kartka papieru, a w przypadku organizmu – komórki naskórka,
- przed promieniowaniem beta chroni cienka blaszka albo drewniana deska, a w tkankach organizmu przebywa ono kilka milimetrów,
- promieniowanie gamma daje się zatrzymać tylko grubą ołowianą lub betonową tarczą, natomiast przez nasze organizmy przenika bez problemu.

Schematycznie przedstawia to rysunek 18.4.

Fakt, że promieniowanie alfa jest mało przenikliwe, nie oznacza, że jest nieszkodliwe. Cząstki alfa bardzo silnie jonizują ośrodek, przez który się poruszają, więc mogą powodować w organizmie duże szkody.



Rys. 18.4. Przenikliwość poszczególnych rodzajów promieniowania

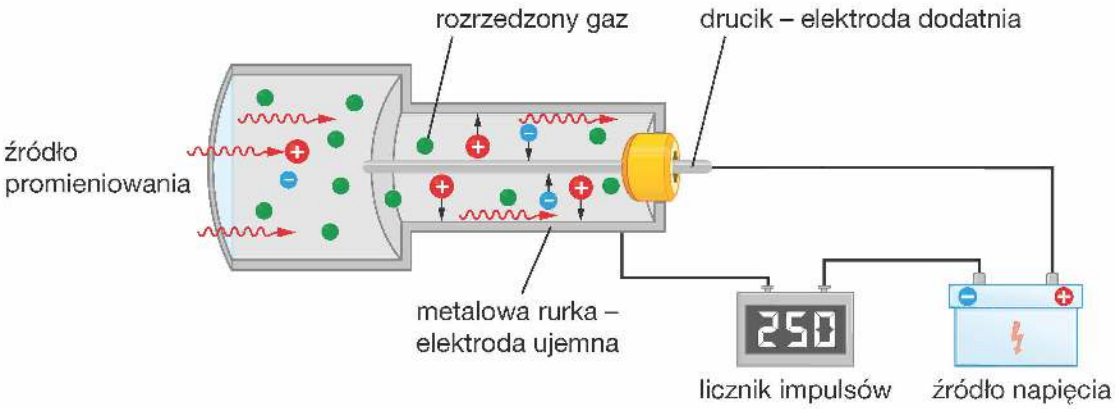
Szczególnie groźne są wtedy, gdy ich źródło znajdzie się wewnątrz organizmu. Jednym z takich źródeł jest polon wdychany z dymem papierosowym.

Promieniowanie jonizujące i niejonizujące

Promieniowanie jądrowe jest rodzajem **promieniowania jonizującego**, czyli takiego, które ma wystarczającą energię, aby powodować wybijanie elektronów z atomów. Do tego rodzaju zaliczamy też między innymi promieniowanie rentgenowskie.
Jeżeli promieniowanie ma za małą energię, aby powodować jonizację materii, mówimy o **promieniowaniu niejonizującym**. Zaliczamy do niego na przykład fale radiowe czy światło.

Wykrywanie promieniowania jądrowego

Do wykrywania promieniowania i pomiaru jego intensywności służy **licznik Geigera–Müllera** (często w skrócie nazywany licznikiem Geigera). Schemat licznika przedstawia rysunek 18.5. Urządzenie jest zbudowane z bańki wypełnionej rozrzedzonym gazem oraz dwóch elektrod: ujemnej w postaci metalowej rurki i dodatniej w postaci umieszczonego w niej cienkiego drutu. Do elektrod jest stale przyłożone napięcie.
W przypadku braku promieniowania prąd przez gaz nie płynie. Gdy jednak do bańki wleci cząstka alfa lub beta, następuje jonizacja cząsteczek gazu. Również foton promieniowania gamma może wyrwać elektron z atomu. Ponieważ między okładkami jest wysokie napięcie, elektrony rozpędzają się i jonizują kolejne atomy. W ten sposób powstaje wyładowanie elektryczne, które obserwujemy jako przepływ prądu.

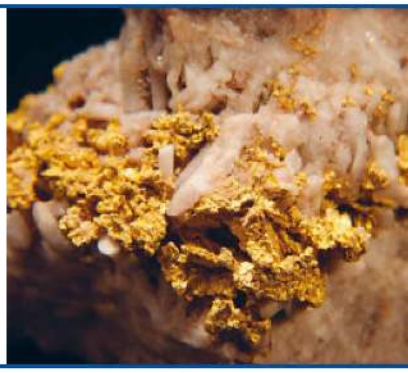


Rys. **18.5.** Licznik Geigera–Müllera

Nazwa *licznik* pochodzi od pierwszych modeli, które rzeczywiście zliczały nadlatujące cząstki gamma albo były podłączone do słuchawek, w których przy każdym nadlatującym fotonie było słychać trzask.

A to ciekawe

Gdy naturalnie występujący izotop złota Au-197 wystawiamy na działanie neutronów, niektóre z nich przyłączają się do jąder tego metalu. Powstaje przy tym izotop Au-198, a przy jego rozpadzie – promieniowanie gamma o charakterystycznej energii 412 keV. Ten fakt wykorzystuje się przy poszukiwaniu złóż złota. Gdy w głąb ziemi skierujemy wiązkę neutronów i wykryjemy promieniowanie 412 keV, to znaczy, że natrafiliśmy na złoto. Nie musimy kopać, wiercić w skale ani pobierać próbek.



Wyznaczanie energii kwantów gamma

Liczniki Geigera–Müllera, przez lata udoskonalone technicznie, nadal są w użyciu. Mają jednak zasadniczą wadę: nie pozwalają na określenie energii pojedynczego fotonu gamma. Taką możliwość dają nowsze typy mierników. Po co jest nam potrzebna wiedza o tej energii?

> Poszczególnym reakcjom jądrowym, na przykład rozpadowi konkretnych izotopów, towarzyszy wysyłanie fotonów gamma o ściśle określonej energii.

Pomiar energii fotonu pozwala więc stwierdzić, z jakimi izotopami mamy do czynienia.
Sytuacja jest analogiczna do widma atomów, tak samo składającego się z linii odpowiadających ściśle określonym długościom fal, a więc także ściśle określonym energiom fotonów. W obu przypadkach pomiar energii fotonu pozwala określić, z jaką substancją mamy do czynienia. Różnica polega na tym, że widmo atomu, związane z poziomami energetycznymi elektronu, składa się z fotonów o niewielkiej energii, należących do światła widzialnego albo podczerwieni i nadfioletu, tymczasem fotony emitowane przez jądro atomowe mają wysoką energię i należą do promieniowania gamma.

Naturalne źródła promieniowania

Zbadajmy, czy w pracowni szkolnej także jesteśmy narażeni na promieniowanie.

Doświadczenie 20

1. Jeżeli na wyposażeniu szkolnej pracowni fizycznej jest licznik Geigera–Müllera, zbadaj, jak reaguje on na różne substancje znajdujące się w pracowni.
2. Po włączeniu licznika ustaw jego zakres tak, aby reagował nawet nieprzyłożony do żadnych próbek.
3. Sprawdź, jak zachowuje się taki licznik zbliżony do różnych substancji, np. skał, soli, warzyw, suszonych grzybów, orzeszków brazylijskich, wody, ścian i… ciała człowieka.





Rys. 18.6. Ciężarówka bananów na przejściu granicznym może uruchomić alarm służący do wykrywania przemytu materiałów radioaktywnych, ponieważ banany zawierają dużo potasu ^{40}K

Promieniowanie powstaje wokół nas w sposób naturalny, ponieważ jesteśmy otoczeni niestabilnymi izotopami różnych pierwiastków. Promieniują skały, z których produkuje się materiały budowlane i wznosi budynki. Promieniują także nasze ciała, więc gdy zbliżamy się do innej osoby, zbliżamy się jednocześnie do źródła promieniowania.
W ciele człowieka promieniuje przede wszystkim potas, którego część stanowi izotop ^{40}K.

Radon

Jednym z promieniotwórczych pierwiastków zawartych w skałach i w glebie, a zatem także w ścianach naszych domów, jest rad.
Jednak od samego promieniowania radu istotniejszy jest powstający przy okazji promieniotwórczy gaz **radon**. Tworzy się on z radu w przemianie alfa:

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

Radon przenika przez skały i rozpuszcza się w wodzie. Dlatego jest go stosunkowo dużo w piwnicach, łazienkach i niewietrzonych pomieszczeniach. Prostą, ale skuteczną metodą pozbywania się nadmiaru radonu jest wietrzenie pomieszczeń.



Rys. **18.7.** Promieniowanie kosmiczne odkryto w 1912 r. dzięki pomiarom wykonywanym z balonu

Promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie dociera do nas także z kosmosu. W znacznej części pochodzi ono ze Słońca – to wiatr słoneczny, złożony głównie z protonów. O tym zjawisku mówiliśmy w poprzedniej części podręcznika. Jak już wiesz, pole magnetyczne kieruje znaczną jego część w okolice podbiegunowe (co powoduje powstawanie zorzy polarnej), część jednak dociera też do nas. Promieniowanie kosmiczne zawiera także cząstki pochodzące z odległych okolic kosmosu.
Promieniowanie to jest częściowo pochłaniane przez atmosferę, dlatego jego intensywność rośnie z wysokością (rys. 18.7).



A to ciekawe

Zbudowana ok. 2500 r. p.n.e. piramida Cheopsa to najstarsza, największa i najsłynniejsza z egipskich piramid. Mimo intensywnych prac archeologicznych ciągle może kryć przed nami wiele tajemnic. W 2017 r. fizycy prześwietlili ją za pomocą promieniowania kosmicznego, a dokładniej – za pomocą występujących w nim cząstek elementarnych zwanych mionami. Ponieważ miony są częściowo pochłaniane przez skały, z których zbudowano piramidę, detektory cząstek umieszczone wewnątrz i na zewnątrz piramidy pokazują jej wewnętrzną strukturę. W ten sposób odkryto nieznaną wcześniej komorę.
Więcej na stronie *ScanPyramids* (adres strony jest pod kodem QR i na s. 309).

Promieniowanie a organizmy żywe

Niewielka ilość promieniowania docierająca do nas na co dzień nie ma wpływu na nasze zdrowie. Nie obserwuje się na przykład chorób związanych z promieniowaniem u osób mieszkających w rejonach, w których skały są bardziej radioaktywne (w Polsce są to Sudety).
Niektóre badania wskazują nawet, że niewielka dawka promieniowania jest korzystna dla organizmu. Nie jest to jednak całkowicie potwierdzona hipoteza.
Natomiast kontakt z silnym promieniowaniem może być bardzo szkodliwy. Pierwszym objawem są nudności i zawroty głowy, przy większej dawce – krwotoki wewnętrzne, a w końcu śmierć.



Rys. 18.8. W nieczynnych kopalniach uranu na Dolnym Śląsku powstały trasy turystyczne

> Duża dawka promieniowania może być szkodliwa dla zdrowia, a nawet życia.

Najbardziej niebezpieczna jest sytuacja, gdy promieniotwórczy izotop dostanie się do wnętrza organizmu.

Promieniowanie jonizujące a nowotwory

Promieniowanie może mieć także skutki odległe w czasie. Spowodowane nim uszkodzenie łańcuchów DNA komórka próbuje naprawić. Czasami się to udaje, a czasami nie. Jeśli komórka z uszkodzonym DNA przeżyje, może zacząć mnożyć się w sposób niekontrolowany, czyli wywołać nowotwór.

> Osoby narażone na silne promieniowanie częściej zapadają na nowotwory.

Warto podkreślić, że oprócz promieniowania jądrowego zagrożeniem dla zdrowia jest również nadfiolet (rys. 18.9), który także należy do promieniowania jonizującego. Nadmierne opalanie się zarówno naturalnym promieniowaniem słonecznym, jak i w solarium może być przyczyną raka skóry.



Rys. 18.9. Wygląd skóry twarzy, której część przez dłuższy czas pozostawała bez ochrony przed promieniowaniem UV w porównaniu ze skórą chronioną

Wpływ na szybko dzielące się komórki

Promieniowanie jest szczególnie szkodliwe dla komórek, które podlegają częstym podziałom. Dlatego na negatywne skutki promieniowania są narażone komórki rozrodcze i komórki płodu. Dotyczy to nie tylko promieniowania jądrowego, ale nawet rentgenowskiego.

> Pacjentka, która jest w ciąży lub tylko ją podejrzewa, powinna koniecznie poinformować o tym fakcie lekarza albo technika wykonującego prześwietlenie.

WPŁYW PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA ORGANIZM

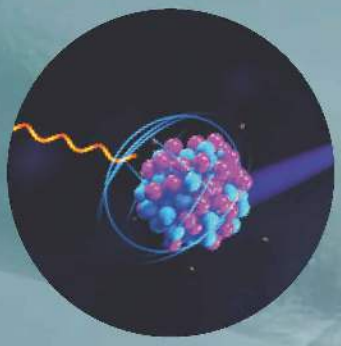
Promieniowanie, nawet w dawce śmiertelnej, jest dla człowieka nieodczuwalne – to dlatego jest ono tak niebezpieczne. Gdy zaczynamy obserwować skutki jego działania na organizm, z dużym prawdopodobieństwem choroba popromienna jest już silnie rozwinięta.

ETAPY ODDZIAŁYWANIA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA ORGANIZM

Gdy promieniowanie jonizujące napotyka ciało człowieka, wywołuje w nim wiele następujących po sobie procesów, które można podzielić na kilka faz: fizyczną, chemiczną, biologiczną i objawów klinicznych.

FAZA FIZYCZNA

od 10^{-16} s do 10^{-12} s



Promieniowanie wzbudza i jonizuje atomy napromieniowanej materii i powoduje zmiany w budowie cząsteczek.



FAZA CHEMICZNA

od 10^{-12} s do 10^{-3} s



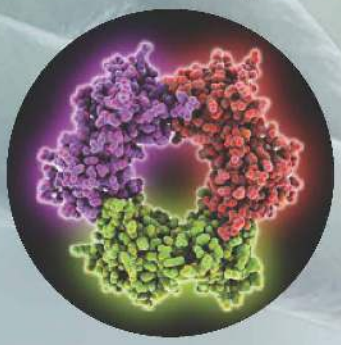
Wzbudzone i zjonizowane atomy oraz cząsteczki wchodzą w reakcje chemiczne ze składnikami komórek, co powoduje ich destrukcję. Dochodzi m.in. do zniszczenia DNA w jądrze komórkowym.

Dawka skuteczna 0,1 Sv powoduje ok. 40 pęknięć podwójnoniciowych i 1000 pęknięć jednoniciowych podwójnej helisy DNA.

Każdego dnia na skutek wewnątrzkomórkowych procesów metabolicznych oraz czynników środowiskowych w komórce dochodzi do ok. 120 tys. pojedynczych uszkodzeń nici DNA.

FAZA BIOLOGICZNA

od kilku sekund do kilkudziesięciu godzin



Komórkowe mechanizmy obronne naprawiają uszkodzenia. Jednak zdolności naprawcze komórki są ograniczone i przy zbyt dużej ilości uszkodzeń dochodzi do mutacji komórki lub jej śmierci.

SKUTKI ODDZIAŁYWANIA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA ORGANIZM

O tym, jakie skutki wywoła promieniowanie i po jakim czasie one wystąpią, decyduje wiele czynników, m.in. rodzaj i energia promieniowania, wielkość dawki i jej rozkład w czasie, wrażliwość tkanek i narządów na promieniowanie, wiek i płeć osoby narażonej.

Średnia wartość dawki promieniowania naturalnego na Ziemi wynosi **2,4 mSv/rok** (patrz s. 209) – tyle też jest równa w Polsce.
Przy czym poziom promieniowania tła waha się zarówno w obrębie kraju (np. w Polsce jest podwyższony w Sudetach i Tatrach), jak i pomiędzy państwami. Maksymalną wartość **260 mSv/rok** osiąga w mieście Ramsar w Iranie. Co ciekawe, w krajach, gdzie promieniowanie tła jest wysokie, nie tylko nie obserwuje się zwiększonej liczby zachorowań na nowotwory, ale często jest ona niższa. Promieniowanie stymuluje bowiem biologiczne mechanizmy obronne chroniące DNA przed uszkodzeniem.

Na promieniowanie z różnych źródeł jesteśmy narażeni cały czas:

0,0001 mSv – jeden banan

0,005 mSv – rentgenowskie zdjęcie dentystyczne

0,05 mSv – lot samolotem Warszawa–Chicago

0,13 mSv – tomografia komputerowa klatki piersiowej

0,26 mSv/rok – promieniowanie z ciała człowieka

Dopuszczalna dawka promieniowania ponad tło dla mieszkańca Polski to **1 mSv/rok.**

Dla dawki do **250 mSv** (jednorazowego napromieniowania) nie obserwuje się objawów klinicznych.



FAZA OBJAWÓW KLINICZNYCH

od kilkunastu godzin do kilkunastu lat

Choroba popromienna może mieć różny stopień nasilenia. W zależności od wielkości pochłoniętej dawki po nudnościach i wymiotach występują:

- **destrukcja szpiku kostnego** (krwotoki wewnętrzne, załamanie odporności organizmu) – śmierć w ciągu kilku tygodni (1–10 Sv),
- **zespół jelitowy** (zapalenie śluzówki jelit, biegunka prowadząca do odwodnienia organizmu) – śmierć w ciągu kilku dni (10–100 Sv),
- **zespół mózgowo-naczyniowy** (zaburzenia neurologiczne, drgawki, utrata przytomności, obrzęk mózgu, wzrost ciśnienia wewnątrzczaszkowego) – śmierć w ciągu kilku godzin (powyżej 100 Sv).

inne skutki:

- oparzenia popromienne,
- niedoczynność tarczycy,
- utrata włosów,
- zaćma,
- trwała bezpłodność,
- nowotwory popromienne,
- działanie toksyczne substancji na zarodek lub płód, np. przedwczesne urodzenie, opóźnienie rozwoju, zaburzenia czynnościowe, śmierć zarodka.

O skutkach pochłonięcia dużych dawek wiemy na podstawie badań prowadzonych m.in. po wypadkach radiacyjnych, a także na podstawie badań ludności po zrzuceniu bomb atomowych w Japonii.

Zastosowania promieniowania w medycynie

Najważniejsze zastosowania promieniowania jądrowego dotyczą medycyny. Promieniowanie stosuje się zarówno w diagnostyce (badaniach), jak i w leczeniu (rys. 18.10).

a) b) c)



Rys. **18.10.** Izotopy promieniotwórcze w medycynie: a) podawanie pacjentce izotopu promieniotwórczego. Pielęgniarka ma ołowiany fartuch ochronny, a strzykawka jest w specjalnej osłonie, b) badanie za pomocą gamma-kamery – urządzenia rejestrującego promieniowanie jądrowe, c) obraz uzyskany z gamma-kamery. Ciemne plamy to obszary, w których zgromadził się izotop, a więc potencjalne ogniska chorobowe

Ponieważ izotopy tego samego pierwiastka mają identyczne właściwości chemiczne, są także w taki sam sposób rozprowadzane w organizmie. Komórki nowotworowe bardzo szybko się dzielą, więc dociera do nich więcej podawanego izotopu niż do zdrowych komórek organizmu. Dzięki promieniowaniu emitowanemu przez izotop można wykryć, gdzie znajdują się ogniska chorobowe.

diagnostyka – badania, terapia – leczenie

Większe dawki izotopów promieniotwórczych stosuje się w **radioterapii**. Również w tym przypadku izotop wbudowuje się w komórki nowotworowe, jednak tym razem silne promieniowanie je zabija. Niestety, radioterapia stanowi duże obciążenie dla organizmu, ponieważ szkodzi także zdrowym komórkom. Mimo to często stanowi jedyną szansę na uratowanie życia pacjenta.



Rys. **18.11.** Symbol Radura na opakowaniu żywności oznacza, że jej przydatność do spożycia została przedłużona dzięki napromieniowaniu. Najczęściej stosowany jest kobalt-60 lub cez-137

Sterylizacja za pomocą promieniowania

Promieniowanie zabija bakterie i wirusy, więc jest wykorzystywane do sterylizacji żywności (rys. 18.11). Ponieważ przechodzi ono przez opakowanie, żywność można najpierw hermetycznie zapakować, a następnie poddać działaniu promieniowania – w ten sposób nowe drobnoustroje już się do niej nie dostaną.

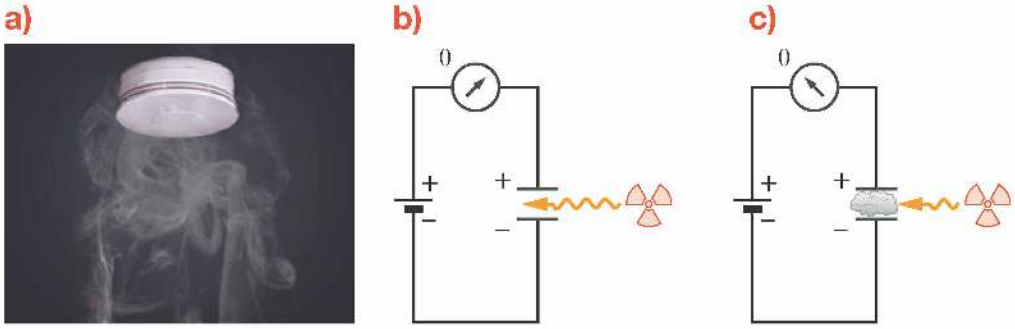
Oczywiście dawki promieniowania nie są tak duże, aby mogły spowodować, że sama żywność stanie się promieniotwórcza.

W podobny sposób sterylizuje się strzykawki i inne przyrządy wykorzystywane w medycynie.

W Stanach Zjednoczonych po incydentach przesyłania politykom listów zakażonych szkodliwymi mikroorganizmami korespondencja w instytucjach rządowych także jest sterylizowana za pomocą promieniowania.

Czujniki dymu

Innym często spotykanym zastosowaniem promieniowania jądrowego jest wykorzystanie izotopów promieniotwórczych w czujnikach dymu (rys. 18.12). Budową przypominają one licznik Geigera–Müllera: mają dwie elektrody, rozdzielone częściowo zjonizowanym powietrzem, przez które płynie niewielki prąd. Różnica polega na tym, że w przypadku czujnika dymu źródło promieniowania powodujące jonizację znajduje się w samym urządzeniu, które uruchamia się wtedy, gdy promieniowanie zostanie częściowo pochłonięte przez dym, a tym samym zmniejszy się prąd płynący między elektrodami.



Rys. **18.12.** Izotopowy czujnik dymu: a) zdjęcie, b) nie ma dymu – prąd płynie, c) jest dym – natężenie prądu maleje, włącza się alarm

Wielkości i jednostki miar opisujące promieniowanie

Oto kilka wielkości związanych z promieniowaniem oraz ich jednostek w układzie SI.

Wielkość fizyczna	Opis wielkości	Jednostka	Symbol	Definicja
Aktywność promieniowania	Jak intensywne jest promieniowanie (jak szybko rozpada się izotop)	bekerel	Bq	1 Bq to jeden rozpad na sekundę
Dawka pochłonięta	Energia pochłoniętego promieniowania na jednostkę masy substancji pochłaniającej	grej	Gy	1 Gy = 1 $\frac{J}{kg}$
Równoważnik biologiczny dawki pochłoniętej	Dawka z uwzględnieniem skutków dla organizmu człowieka	siwert	Sv	1 Sv to dawka mająca skutek taki sam jak 1 Gy promieniowania beta



Rys. **18.13.** Dawki promieniowania

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać różne rodzaje promieniowania i jego własności;
- znać różne zastosowania promieniowania;
- wyjaśniać, dlaczego promieniowanie w dużych dawkach jest niebezpieczne dla zdrowia.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Odpowiedz na pytania:

a) Ile razy większą dawkę otrzymuje osoba lecąca samolotem przez Atlantyk od osoby spędzającej rok w okolicy elektrowni jądrowej?

b) Co mógłbyś powiedzieć przeciwnikowi budowy elektrowni jądrowych, który korzysta z solariów? Uzasadnij odpowiedź.

2. Aktywność jednego grama radu wynosi $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq. Jaka część jąder tego pierwiastka rozpada się w czasie 1 s?

3. Aktywność kilograma granitu wynosi 1 kBq. Wynika ona z zawartości w tym minerale potasu-40, uranu-238 oraz toru-232. Gęstość granitu to $2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Plac o powierzchni 2000 m^2 wyłożono granitowymi kostkami o grubości 10 cm. Jaka liczba jąder atomowych rozpada się w tej ilości granitu w ciągu godziny?

4. Papierosy zawierają ołów-210, który podlega rozpadowi beta minus, a z kolei produkt tego rozpadu sam także ulega rozpadowi beta minus, aż wreszcie w wyniku rozpadu alfa powstaje stabilny izotop ołowiu.

a) Zapisz równania tych reakcji.

b) W którym etapie powstaje polon-210?

c) Dlaczego wprowadzony do wnętrza organizmu polon-210 jest bardzo szkodliwy?

d) Dlaczego przeniesienie polonu-210 przez bramki wykrywające promieniowanie na lotnisku nie spowoduje ich włączenia?

18.4. Czas połowicznego rozpadu

Przypomnij sobie

- Jądra niektórych izotopów rozpadają się na inne jądra i emitują przy tym promieniowanie.
- Podstawowe typy rozpadów to alfa, beta plus, beta minus.

Rozpad promieniotwórczy jako zjawisko losowe

Jądra izotopów niestabilnych rozpadają się samorzutnie. Od czego zależy, kiedy nastąpi taka reakcja? Okazuje się, że jest to zjawisko losowe.

> Nie da się przewidzieć, kiedy rozpadnie się dane jądro izotopu niestabilnego.

W przypadku dużej liczby jąder izotopu (a nawet ułamek grama oznacza ich dużą liczbę) możemy przewidzieć jedynie, **ile** w przybliżeniu jąder ulegnie rozpadowi w określonym czasie. Nie jesteśmy natomiast w stanie przewidzieć, **które** dokładnie to będą jądra.
Możemy tę sytuację przyrównać do gry w kości. Nie wiemy, ile wypadnie oczek, zanim nie rzucimy kostką (rys. 18.14). Gdy rzucimy 1200 sześciennymi kostkami, możemy jedynie przewidywać, że na ok. 200 z nich wypadnie jedno oczko, chociaż przed rzutem nie wskażemy, które to będą kostki.



Rys. 18.14. Nie wiemy, co dokładnie wypadnie na kostkach, zanim ich nie rzucimy

Warto jednak zwrócić uwagę, że w przypadku rzutu kostką losowość jest wyłącznie skutkiem naszej niewiedzy. Gdybyśmy znali dokładnie położenie, prędkość i moment pędu podrzuconej kostki oraz własności mechaniczne podłoża, moglibyśmy na podstawie praw rządzących ruchem bryły sztywnej opisać jej dalszy ruch. Natomiast w przypadku jąder atomowych losowość wynika z samych praw przyrody.

Determinizm i indeterminizm

Z przypadkami zjawisk nieprzewidywalnych spotykałeś się już w poprzednim rozdziale. Na przykład podczas badania interferencji nie możemy przewidzieć, w które miejsce ekranu uderzy foton. Natomiast w fizyce klasycznej nie ma przypadkowości – losowość wynika albo z braku danych, albo z ich nadmiaru w stosunku do możliwości obliczeniowych.
Losowość zjawisk to ważna różnica między fizyką klasyczną a kwantową i ma ona swoje dalsze konsekwencje. Zgodnie z fizyką klasyczną na podstawie znajomości stanu układu w danej chwili można przewidzieć jego stan w każdej następnej chwili, a także odtworzyć całą jego przeszłość.

Mówimy, że fizyka klasyczna jest **deterministyczna**, gdyż cała przyszłość układu jest zdeterminowana. Natomiast fizyka kwantowa jest **indeterministyczna**. Według niej nie możemy dokładnie poznać stanu układu, a nawet gdybyśmy taką informację posiadali, nie wystarczyłaby ona do przewidzenia jego przyszłości.
Skoro zjawisk zachodzących w skali atomów nie da się przewidzieć, to dlaczego ciała zbudowane z tych atomów zachowują się zgodnie z deterministyczną fizyką klasyczną? Otóż w przypadku układów bardzo wielu atomów prawdopodobieństwo zajścia zjawiska zgodnie z zasadami fizyki klasycznej nie jest wprawdzie dokładnie równe 1, ale jest tak bardzo zbliżone do jedności, że odstępstwa praktycznie się nie zdarzają.

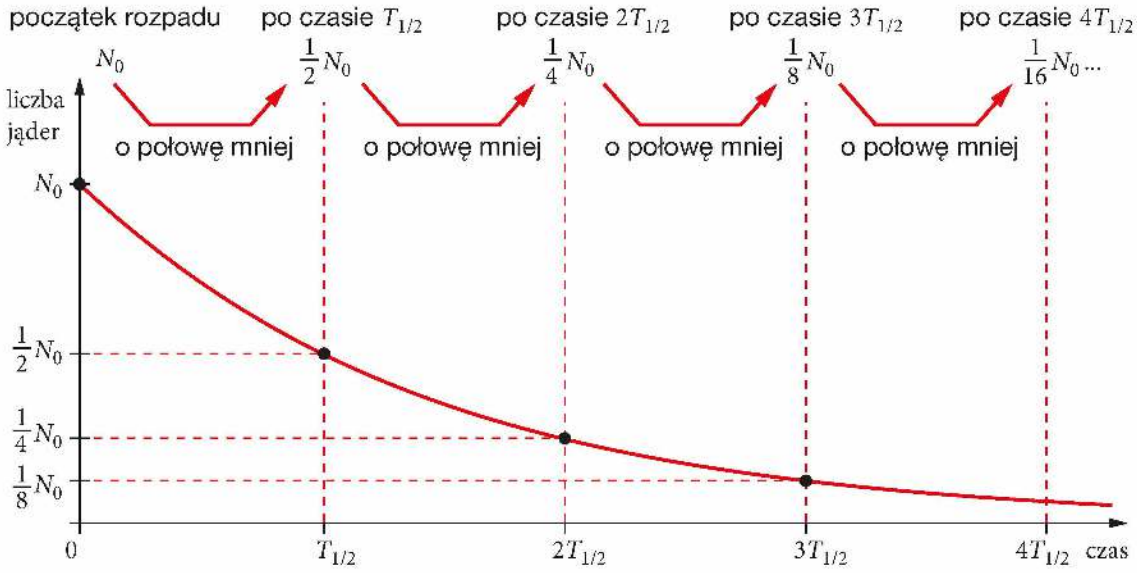
Czas połowicznego rozpadu

Podstawową wielkością fizyczną służącą do opisu rozpadu promieniotwórczego jest **czas połowicznego rozpadu** (zwany także okresem połowicznego rozpadu).

> Czasem połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ nazywamy czas, w którym w próbce danego izotopu rozpadnie się średnio połowa jąder.

Czas połowicznego rozpadu różnych izotopów jest bardzo różny. Np. dla wodoru-7 jest to $2 \cdot 10^{-23}$ s – czas, w jakim światło pokonuje odległość równą średnicy jądra atomowego, a dla ksenonu-134 jest to $6 \cdot 10^{22}$ lat, czyli o wiele dłużej niż istnieje Wszechświat.

Na przykład dla izotopu jodu ^{131}I okres połowicznego rozpadu wynosi 8 dni. To oznacza, że jeśli mamy 1000 jąder tego izotopu, to po 8 dniach rozpadnie się mniej więcej połowa z nich, a druga połowa – czyli ok. 500 – zostanie. Po kolejnych 8 dniach rozpadnie się połowa z tego, co zostało, a więc pozostanie ok. 250 jąder itd.
Okres połowicznego rozpadu nie zależy od wielkości próbki. Po 8 dniach ze 100 jąder jodu-131 pozostanie ok. 50, a z 30 jąder – ok. 15 (patrz rys. 18.15).



Rys. **18.15.** Wykres zależności liczby jąder materiału promieniotwórczego od czasu

Prawo rozpadu promieniotwórczego

Z rozważań na poprzedniej stronie widzimy, że:

- po czasie $t = 1 \cdot T_{1/2}$ pozostaje $\frac{1}{2}$ początkowej liczby jąder,
- po czasie $t = 2 \cdot T_{1/2}$ zostaje ich $\frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^2$,
- po czasie $t = 3 \cdot T_{1/2}$ już tylko $\frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^3$.

$\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \ldots$ to kolejne potęgi $\frac{1}{2}$

Ogólnie:

- po czasie $t = n \cdot T_{1/2}$ pozostaje $\left(\frac{1}{2}\right)^n$ początkowej liczby, czyli $\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$ tej liczby.

Możemy więc zapisać równanie:

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

$N(t)$ – liczba jąder promieniotwórczych pozostałych po czasie t

Okazuje się, że **prawo rozpadu promieniotwórczego** obowiązuje nie tylko dla t będących wielokrotnością $T_{1/2}$, ale dla dowolnego t, tyle że wówczas musimy korzystać z potęg o wykładniku niecałkowitym. Ponieważ jądra danego izotopu mają jednakową masę, analogiczny wzór możemy zapisać dla masy pozostałej części izotopu:

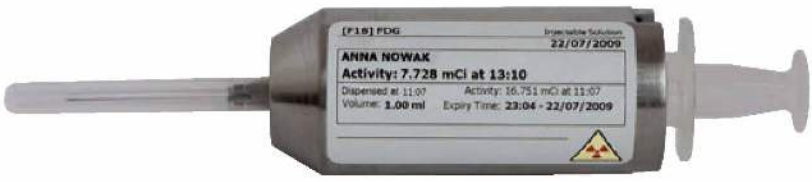
$$m(t) = m_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

W praktyce częściej korzystamy z tego drugiego wzoru, ponieważ częściej umiemy określić masę próbki niż liczbę zawartych w niej jąder. Zwróćmy jednak uwagę, że również określenie masy próbki izotopu nie zawsze jest proste. Za pomocą wagi można ją zmierzyć tylko wtedy, gdy mamy do czynienia z czystym izotopem, co zdarza się rzadko. A jeśli nawet się zdarzy, to na skutek samego rozpadu promieniotwórczego próbka przestaje być czysta – pozostają w niej produkty rozpadu. Ponieważ jednak aktywność (liczba rozpadów na sekundę) jest proporcjonalna do liczby jąder, możemy zapisać równanie dla aktywności:

Promieniowanie interesującego nas izotopu możemy odróżnić od promieniowania innych źródeł dzięki pomiarowi częstotliwości (energii fotonu) – patrz s. 203.

$$A(t) = A_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Na rysunku 18.16 widzisz próbkę fluoru-18 w strzykawce z podaną aktywnością izotopu (16,751 mCi) o określonej godzinie.



Kiur (Ci) to dawna jednostka aktywności, równa 37 mld bekereli, mCi to milikiur, czyli 37 mln Bq.

Rys. **18.16.** Aby dawka podana pacjentowi była odpowiednia, na strzykawce z fluorem F-18 o czasie połowicznego rozpadu 2 h podano m.in. godzinę, do której preparat powinien być podany pacjentowi



Rys. 18.17. Dzięki datowaniu za pomocą węgla-14 wiemy, że łódź z Gokstad (czyt. goksta) w Norwegii, znaleziona w 1880 r., została zbudowana w IX w.

Zastosowania czasu połowicznego rozpadu

Znajomość czasu połowicznego rozpadu pozwala obliczyć, ile jąder ulegnie rozpadowi w określonym czasie, a co za tym idzie – jak intensywne będzie promieniowanie emitowane przez rozpadające się jądra.

Innym ważnym zastosowaniem znajomości czasu połowicznego rozpadu izotopu jest **datowanie radiowęglowe**.
W dwutlenku węgla zawartym w atmosferze ziemskiej oprócz najczęściej występującego węgla ^{12}C występuje także pewna ilość izotopu ^{14}C. Jego okres połowicznego rozpadu wynosi 5730 lat. Ponieważ pod wpływem promieniowania kosmicznego w atmosferze cały czas tworzy się nowy ^{14}C, ustaliła się równowaga: izotopu przybywa tyle, ile go ubywa, a zatem jego stężenie jest stałe.
W procesie fotosyntezy rośliny pochłaniają dwutlenek węgla, a ponieważ izotopy węgla mają takie same właściwości chemiczne, oba są wykorzystywane do syntezy związków organicznych. Oba też podróżują wzdłuż łańcucha pokarmowego.

Dodatek matematyczny

Obliczanie logarytmu o podstawie 2

W obliczeniach związanych z czasem połowicznego rozpadu często używamy logarytmu o podstawie 2. Czasami jego wartość można po prostu odgadnąć na podstawie definicji logarytmu:

$$\log_2 16 = 4, \quad \text{bo} \quad 2^4 = 16$$

$$\log_2 0{,}25 = -2, \quad \text{bo} \quad 2^{-2} = \frac{1}{2^2} = \frac{1}{4} = 0{,}25$$

W innych przypadkach musimy skorzystać z tablic albo kalkulatora. Na ogół nie pozwala on bezpośrednio obliczyć logarytmu o podstawie 2, ale właśnie w takich sytuacjach należy wykorzystać wzór na zamianę podstawy logarytmu:

$$\log_a b = \frac{\log_c b}{\log_c a}$$

Logarytm o podstawie 2 możemy zamienić więc na logarytmy o podstawie 10 ($c = 10$), która zwykle jest pomijana w zapisie:

$$\log_a b = \frac{\log_{10} b}{\log_{10} a} = \frac{\log b}{\log a}$$

Wynikiem jest na ogół liczba niewymierna, która już na wyświetlaczu pojawia się w przybliżeniu, a my zwykle zaokrąglamy ją jeszcze bardziej. Na przykład:

$$\log_2 0{,}8 = \frac{\log 0{,}8}{\log 2} \approx -\frac{0{,}096}{0{,}301} \approx -0{,}32$$

Sprawdzenie:

$$2^{-0{,}32} \approx 0{,}801 \approx 0{,}8$$

Dopóki organizm żyje, izotop ^{14}C jest do niego na bieżąco dostarczany, co równoważy jego rozpad. Po śmierci wymiana substancji ustaje, a zawarty w organizmie ^{14}C jedynie się rozpada. Dlatego dzięki badaniu zawartości ^{14}C w szczątkach organizmów można określić czas ich śmierci. Tą samą metodą określa się wiek przedmiotów wykonanych z substancji organicznych, np. drewna, rogów lub skóry (patrz przykład na końcu lekcji).

Dzięki zjawisku rozpadu promieniotwórczego możemy także badać wiek skał, a nawet ustalić wiek Układu Słonecznego. Do tych zastosowań węgiel-14 się nie nadaje, ponieważ rozpada się zbyt szybko. Dlatego wykorzystujemy uran-238, który w kilkunastu kolejnych przemianach zamienia się w ołów-206. Czas połowicznego rozpadu U-238 wynosi 4,5 mld lat, więc w przybliżeniu tyle, ile istnieje nasza planeta.

Po tej lekcji powinieneś

- stosować prawo rozpadu promieniotwórczego do rozwiązywania zadań;
- wyjaśniać losowy charakter rozpadu promieniotwórczego.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

W 1942 r. w himalajskim jeziorze Roopkund (czyt. rupkund) na terenie Indii odnaleziono szczątki kilkuset osób. Zbadana w 2004 r. zawartość ^{14}C była w nich na poziomie 87% wartości typowych dla żywych ludzi. Kiedy zmarli tajemniczy ludzie z jeziora?

Rozwiązanie

Korzystamy z wzoru: $m = m_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$. Podstawiamy do niego $m = 0{,}87m_0$, upraszczamy i otrzymujemy:

$$0{,}87m_0 = m_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \rightarrow 0{,}87 = 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \qquad (1)$$

Dalsze obliczenia możemy przeprowadzić dwoma sposobami.

Sposób I

Kiedy znamy wartość potęgi, a chcemy znaleźć jej wykładnik, posługujemy się logarytmowaniem, ze wzoru (1) otrzymujemy:

$$\log_2 0{,}87 = -\frac{t}{T_{1/2}} \rightarrow t = -\log_2 0{,}87 \cdot T_{1/2}$$

Zamieniamy podstawę logarytmu (patrz „Dodatek matematyczny" s. 214):

$$\log_2 0{,}87 = \frac{\log 0{,}87}{\log 2} \approx -\frac{0{,}0605}{0{,}301} \approx -0{,}2$$

Tak więc:

$$t = -(-0{,}2)T_{1/2} = 0{,}2T_{1/2} = 0{,}2 \cdot 5730 \text{ lat} \approx 1146 \text{ lat}$$

Sposób II

Obliczamy logarytm dziesiętny obu stron równania (1), a potęgę liczby logarytmowanej wyciągamy przed logarytm (posługujemy się wzorem $\log a^b = b\log a$):

$$\log 0{,}87 = -\frac{t}{T_{1/2}}\log 2$$

Stąd:

$$t = -\frac{\log 0{,}87}{\log 2}\,T_{1/2}$$

Dalsze obliczenia i wynik są takie same jak w sposobie I.

Odpowiedź: Ludzie z jeziora żyli ok. 1150 lat przed 1942 r., czyli pod koniec ósmego wieku n.e.

Uwaga. Skorzystaj z tablicy czasów połowicznego rozpadu na s. 307.

1. W piramidzie faraona Dżesera znaleziono przedmioty wykonane z drewna akacji. W 1950 r. zawierały one tylko 57% ilości węgla ^{14}C, jaka jest obecna w żywych drzewach. Oblicz przybliżoną datę śmierci faraona. Załóż, że akacja została ścięta niedługo przed jego śmiercią.



2. W 1835 r. w Haraldskaer w Danii odkryto zmumifikowane ciało kobiety. Wydawało się, że pochodzi ono z niezwykle dawnych czasów. W 1977 r. do ustalenia daty jej śmierci wykorzystano technikę datowania węglem ^{14}C. Zawartość węgla ^{14}C w próbce jej ciała ustalono na 74% wartości początkowej. Jak dawno temu zmarła kobieta?

3. Do zbadania 16 pacjentów przygotowano pewną ilość technetu ^{99}Tc. Jednak w danym dniu badania nie mogły być wykonane z powodu awarii urządzeń diagnostycznych. Ich naprawa miała potrwać 24 godziny.

Ilu pacjentów można by przebadać po usunięciu usterki pozostałą ilością technetu?

4. Próbka zawiera trwały izotop jodu ^{127}I oraz promieniotwórczy ^{131}I w stosunku wagowym 9:1. Jakie izotopy jodu i w jakich proporcjach będzie zawierała ta próbka po 24 dniach?

Uwaga. Przy rozpadzie ^{131}I nie powstaje dodatkowy izotop ^{127}I.

5. Po 4 h aktywność próbki izotopu zmniejszyła się o 40%. Jaki jest czas połowicznego rozpadu tego izotopu?

18.5. Masa a energia

Przypomnij sobie

- Prędkość światła w próżni wynosi $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.
- Energia kinetyczna ciała zależy od jego masy i prędkości.

Zmiana energii to zmiana masy

W 1905 r. Albert Einstein opublikował pięć prac, z których każda z osobna zapewniłaby mu miejsce wśród najwybitniejszych fizyków. W ostatniej z nich dowodził słynnego wzoru $E = mc^2$. Wzór ten zapisany w używanej współcześnie notacji ma postać:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

Oznacza on, że:

> Gdy ciało zyskuje lub traci energię wewnętrzną, odpowiednio zmienia się jego masa. Zmiana masy Δm i zmiana energii ΔE są proporcjonalne, a współczynnikiem proporcjonalności jest kwadrat prędkości światła.

„Masa ciała jest miarą zawartej w nim energii" – wyjaśnił to Einstein. Dzieje się tak w każdym zjawisku, w którym ciało zyskuje lub traci energię wewnętrzną. Na co dzień nie zauważamy tych zmian, ponieważ współczynnik c^2 wyrażony w jednostkach SI jest ogromny, a jego odwrotność – bardzo mała.

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$\text{więc } c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Tę ostatnią jednostkę można zapisać także w innej postaci:

$$[c^2] = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{\text{kg}} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Zatem $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{J}}{\text{kg}}$, czyli zmianie masy o 1 kg odpowiada zmiana energii o $9 \cdot 10^{16}$ J, a zmianie energii o 1 J odpowiada zmiana masy o $\frac{1}{9 \cdot 10^{16}}$ kg $\approx 1{,}1 \cdot 10^{-17}$ kg, co jest równe masie małego wirusa.

Nawet w reakcjach chemicznych związanych z uzyskaniem dużej energii zmiana masy jest minimalna. Na przykład przy spaleniu litra benzyny wydziela się energia 35 MJ. Oznacza to, że powstałe spaliny mają masę mniejszą od benzyny i zużytego tlenu zaledwie o 0,4 μg. Tak niewielką różnicę niezwykle trudno byłoby zmierzyć.
Dopiero w przemianach jądrowych zmiana masy jest zauważalna.

Pozostałe prace dotyczyły:
- nowego sposobu wyznaczania rozmiarów cząsteczek,
- wyjaśnienia ruchów Browna,
- podstaw szczególnej teorii względności,
- kwantowej natury światła.



Rys. 18.18. Masie 1 kg odpowiada energia $9 \cdot 10^{16}$ J, czyli 25 TWh. Tyle energii elektrycznej zużywa cała Polska przez prawie 2 miesiące

Masa a energia spoczynkowa

Wniosek Einsteina, że „masa ciała jest miarą zawartej w niej energii", sugeruje nagromadzenie w każdym ciele ogromnej energii, którą można wyzwolić, jednocześnie zmniejszając masę ciała do zera, czyli doprowadzając do jego zniknięcia.
Okazuje się, że tak rzeczywiście jest. Zjawiskiem, w którym możemy to zaobserwować, jest anihilacja materii i antymaterii, omówiona w pierwszym temacie tego rozdziału.

> Energię E odpowiadającą masie m ciała zgodnie ze wzorem $E = mc^2$ nazywamy energią spoczynkową tego ciała.

Nawet w przemianach jądrowych, w których wyzwala się ogromna energia, wykorzystujemy tylko ułamek energii spoczynkowej.



Rys. 18.19. Aby stopić 1 kg śniegu, potrzeba 334 kJ energii. Tak więc powstała z tego śniegu woda ma masę 1,000000000004 kg. Różnica jest zbliżona do masy jednej komórki organizmu człowieka

Energia spoczynkowa a inne formy energii

Z wcześniejszej nauki znasz różne formy energii. Jaki jest związek między nimi a nowym pojęciem *energia spoczynkowa*?
Otóż do energii spoczynkowej wlicza się cała energia zgromadzona wewnątrz ciała:

- energia spoczynkowa cząstek, z których zbudowane są atomy (związana z masą tych cząstek),
- energia oddziaływań tych cząstek w atomie i oddziaływań między atomami, a także ruchu atomów i cząstek.

Natomiast energia kinetyczna ciała jako całości **nie wlicza** się do energii spoczynkowej. Oznacza to także, że zmiana prędkości ciała nie powoduje zmiany jego masy (patrz też uwaga na dole s. 296).
Bardziej skomplikowana jest kwestia energii potencjalnej. Zwykle mówimy w uproszczeniu, że jest to energia jakiegoś ciała (np. jabłka na drzewie przyciąganego przez Ziemię albo magnesu przyciąganego przez inny magnes). Faktycznie jednak jest to energia układu ciał: Ziemi i jabłka albo obu magnesów traktowanych jako jeden układ.
Jeśli każdy z połączonych magnesów ma masę 100 g, to domowa waga pokaże nam, że taki układ ma masę 200 g. Gdybyśmy mieli jednak wagę o olbrzymiej dokładności, pokazałaby nieco mniej.
Jeśli rozczepienie magnesów wymaga wykonania pracy 9 J, to znaczy, że ich energia potencjalna po złączeniu wynosi –9 J (względem sytuacji, gdy znajdują się w dużej odległości). Odpowiada to ubytkowi masy:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{9\ \mathrm{J}}{9 \cdot 10^{16}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}} = 10^{-16}\ \mathrm{kg} = 10^{-13}\ \mathrm{g}$$

Tak więc idealnie dokładna waga pokazałaby nie 200 g, ale zaledwie 199,9999999999999 g.

Także w przypadku sił grawitacji i przyciągania elektrostatycznego energia potencjalna jest ujemna, jeśli przyjmiemy, że energii równej zeru odpowiada duża odległość ciał.

Wzór $E = mc^2$ a zasada zachowania energii

Czasami się mówi, że zgodnie ze wzorem $E = mc^2$ masę można zamieniać w energię. Takie sformułowanie bywa jednak mylące. Sugeruje, że zasada zachowania energii nie obowiązuje: skoro wytwarzamy energię z masy (z czegoś, co nie jest energią), to całkowita energia układu się zwiększa. To jednak błędny wniosek. Tak naprawdę przy zamianie „masy w energię" mamy do czynienia po prostu z przemianą różnych form energii. **Energia spoczynkowa** ciała zmienia się w inne formy, np. energię promieniowania. A ponieważ masa jest wielkością proporcjonalną do energii spoczynkowej, więc także ona ulega zmianie.



Rys. 18.20. Gorący kaloryfer ma większą masę niż zimny. Ale żadna waga nie pokaże tak małej zmiany

> Wzór $E = mc^2$ nie jest sprzeczny z zasadą zachowania energii. Trzeba tylko pamiętać, że również energia spoczynkowa jest jedną z form energii.

Natomiast masa nie jest wielkością zachowaną, ponieważ jest ona związana **tylko z energią spoczynkową**. W chemii mówimy o zasadzie zachowania masy, ponieważ zmiany tej wielkości w przemianach chemicznych są zbyt małe, aby je zmierzyć. Taka zasada jest jednak tylko przybliżeniem i wkrótce opiszemy zjawiska, do których tego przybliżenia nie da się zastosować.

Po tej lekcji powinieneś

- posługiwać się pojęciem energii spoczynkowej;
- posługiwać się zależnością $E = mc^2$ do rozwiązywania zadań.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Chemik zmieszał w temperaturze pokojowej 2 kg wodoru i 16 kg tlenu. Produktem gwałtownego spalenia tej mieszaniny była woda. Ile wyniosła masa wody powstałej po skropleniu pary i ochłodzeniu jej do temperatury pokojowej? Ciepło spalania wodoru wynosi 143 $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$.

Rozwiązanie

Przyjmijmy oznaczenia: $m_1 = 2$ kg – masa wodoru, $m_2 = 16$ kg – masa tlenu, $Q_s = 143 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ – ciepło spalania wodoru.

Mogłoby się wydawać, że odpowiedź to dokładnie 18 kg. Jednak nie uwzględnia ona utraty masy związanej z utratą energii. Tę zmianę masy obliczymy ze wzoru:

$$\Delta m = \frac{E}{c^2}$$

Wyzwolona energia jest równa: $E = m_1 Q_s$, a więc:

$$\Delta m = \frac{m_1 Q_s}{c^2}$$

Stąd po podstawieniu danych otrzymujemy,

$$\Delta m = \frac{2\,\text{kg} \cdot 143 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}}{(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} \approx 3{,}2 \cdot 10^{-9}\,\text{kg} = 3{,}2 \cdot 10^{-6}\,\text{g} = 3{,}2\,\mu\text{g}$$

Tak więc otrzymana woda będzie mieć masę:

$$m = m_1 + m_2 - \Delta m = 17{,}9999999968\,\text{kg}$$

Odpowiedź: Chemik otrzymał 17,9999999968 kg wody.

Uwaga. Mieszanina wodoru z tlenem w stosunku wagowym 1 : 8 ze względu na wybuchowe spalanie jest nazywana mieszaniną piorunującą (nigdy nie eksperymentuj z nią samodzielnie!). Mimo znacznej energii wyzwolonej podczas reakcji ubytek masy jest niezauważalny.

1. Stukilogramowa sztaba żelaza ostygła od 100°C do 20°C. Jak zmieniła się jej masa? Ciepło właściwe żelaza wynosi $450\,\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$.

2. Jaka energia powstaje, kiedy 1 kg antymaterii anihiluje z taką samą ilością materii? Całkowita moc maksymalna największej w Polsce elektrowni – w Bełchatowie – to 4400 MW. Ile czasu potrzebuje ona do wytworzenia takiej energii?

3. Ile antymaterii potrzeba, aby energia wyzwolona przy jej anihilacji była równa energii bomby atomowej zrzuconej na Hiroshimę, równej 50 TJ?

Wskazówka. Należy uwzględnić nie tylko energię spoczynkową antymaterii, lecz także energię spoczynkową materii, która weźmie udział w reakcji anihilacji.

4. Ciepło spalania metanu wynosi $56\,\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$. Zapisz odpowiednie równanie reakcji i oblicz, ile tlenu potrzeba do spalenia 1 kg metanu, głównego składnika gazu ziemnego. Oblicz masę powstałych produktów reakcji.

5. Słońce wypromieniowuje energię z mocą $4 \cdot 10^{26}$ W. Masa Słońca wynosi $2 \cdot 10^{30}$ kg.

a) O ile ton w ciągu jednej sekundy zmniejsza się masa Słońca z powodu jego promieniowana?

b) Słońce w obecnej postaci będzie istniało jeszcze ok. 5 mld lat. O ile procent zmieni się w tym czasie jego masa?

18.6. Energia jądrowa

Przypomnij sobie

- Energia spoczynkowa ciała jest proporcjonalna do jego masy zgodnie ze wzorem $E = mc^2$.
- Jeżeli ciało traci lub zyskuje energię, zmienia się jego masa.



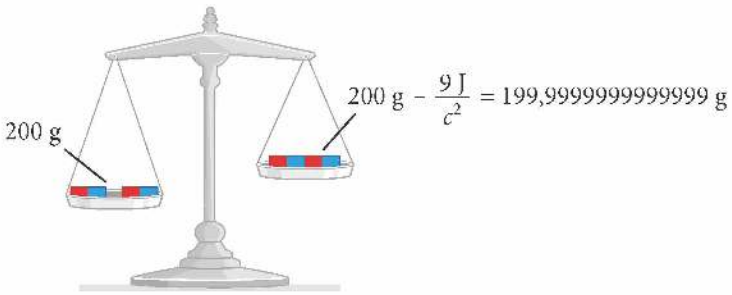
Rys. 18.21. W łodziach podwodnych wykorzystujących energię jądrową czas zanurzenia jest ograniczony tylko wytrzymałością załogi i ilością jedzenia

Oddziaływanie a zmiana masy

Przypomnij sobie z poprzedniej lekcji (s. 218) rozważania na temat zmiany masy magnesów, które łączą się ze sobą dzięki przyciąganiu (rys. 18.22). Gdy takie magnesy położymy na stole zwrócone do siebie przeciwnymi biegunami, to przesuną się one i połączą. Mogą przy tym wykonać pewną pracę, np. przesunąć przyczepione do nich przedmioty. Z kolei aby rozczepić magnesy, pracę trzeba wykonać nad nimi. Oznacza to, że energia złączonych magnesów jest mniejsza niż po ich rozczepieniu. A w takim razie także ich masa jest mniejsza po złączeniu niż przed nim (rys. 18.23).



Rys. 18.22. Przyciągające się magnesy



Rys. 18.23. Jeśli przy rozłączaniu magnesów wykonujemy pracę 9 J, to masa złączonych magnesów jest o 9 $\frac{\mathrm{J}}{c^2}$ = 10^{-13} g mniejsza niż rozłączonych

Podobnie jest z innymi oddziaływaniami przyciągającymi. Na przykład Ziemia i Księżyc przyciągają się siłami grawitacji. Aby zwiększyć odległość Księżyca od Ziemi, należałoby wykonać pracę, a więc dostarczyć energię do układu Ziemia–Księżyc. To znaczy, że podczas oddalania Księżyca od Ziemi zwiększyłaby się również masa tego układu (skoro energia pochodziłaby spoza niego, np. od przelatującej w pobliżu planetoidy).

Tak samo jest w przypadku oddziaływań jądrowych. Energia nukleonów połączonych w jądro jest mniejsza niż przed ich połączeniem.

Gdy wykonujemy pracę nad układem, zwiększamy jego energię. Gdy układ wykonuje pracę, jego energia się zmniejsza.

Deficyt masy

Powiedzieliśmy, że masa jądra jest mniejsza niż suma mas jego składników. Ta różnica mas jest już na tyle dużą częścią masy jądra, że można ją zmierzyć (patrz ramka na następnej stronie).

Deficyt masy w jądrze helu

łączna masa składników jądra helu:

$$2m_{\text{protonu}} + 2m_{\text{neutronu}} =$$
$$= 2 \cdot 1{,}6726 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} + 2 \cdot 1{,}6749 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} =$$
$$= 6{,}6950 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$$



masa jądra helu:

$6{,}6447 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$

Deficyt masy: $\Delta m = 6{,}6950 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} - 6{,}6447 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} = 0{,}0503 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} = 5{,}03 \cdot 10^{-29}\ \text{kg}$

W stosunku do łącznej masy cząstek przed połączeniem różnica ta wynosi:

$$\frac{\Delta m}{2m_{\text{protonu}} + 2m_{\text{neutronu}}} = \frac{0{,}050310^{-27}\ \text{kg}}{6{,}695010^{-27}\ \text{kg}} \approx 0{,}008 = 0{,}8\%$$

Deficyt (albo defekt) masy to różnica między sumą mas cząstek wchodzących w skład jądra atomowego a jego masą.

Jak widzimy w przykładzie opisanym w ramce, deficyt masy jest zauważalną częścią (prawie 1%) masy jądra.
Różnica masy między swobodnymi składnikami jądra a jądrem z nich złożonym oznacza, że aby rozbić jądro na pojedyncze składniki, musimy dołożyć tyle energii, ile odpowiadającej jej masy brakuje. Energię tę nazywamy **energią wiązania** E_w. Wiąże się ona z deficytem masy Δm wzorem $E_w = \Delta mc^2$.

Energia wiązania jądra E_w to energia potrzebna do rozbicia jądra na poszczególne składniki. Jej wartość wiąże się z deficytem masy Δm wzorem $E_w = \Delta mc^2$.



A to ciekawe

Energię rozpadu radioaktywnego wykorzystujemy w praktyce.
W niektórych typach baterii jądrowych korzystamy z ciepła powstającego w czasie rozpadu. Tak działają generatory termoelektryczne, stosowane m.in. w łazikach marsjańskich.
W innym typie urządzeń używa się ładunku elektronów emitowanych jako promienie beta. Elektrony trafiają w elektrodę i ładują ją ujemnie, natomiast izotop, z którego są emitowane elektrony, uzyskuje ładunek dodatni. W ten sposób powstaje różnica potencjałów.
Podstawową zaletą baterii jądrowych jest bardzo długi czas pracy bez konieczności wymiany. Ich wadą jest obecnie wysoka cena, chociaż trwają już prace nad doskonalszymi i tańszymi bateriami, które mogłyby służyć do zasilania samochodów elektrycznych.

Mimo że zwykle o energii wiązania mówimy w przypadku jąder atomowych, to można rozważać także energię wiązania elektronu w atomie (równą energii jonizacji) albo nawet energię wiązania Ziemi i leżącego na niej jabłka (równą energii potrzebnej do wystrzelenia jabłka w kosmos z drugą prędkością kosmiczną).

Energia rozpadu promieniotwórczego

Powiedzieliśmy, że przy rozpadzie alfa i beta wyzwala się energia. Jej część jest emitowana w postaci promieniowania, a reszta pozostaje energią kinetyczną jądra, co obserwujemy jako rozgrzewanie się izotopu. Teraz możemy wyjaśnić, skąd ta energia pochodzi.
Jako przykład rozważmy rozpad alfa radu do radonu:

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

Skoro masa jądra nie jest sumą mas tworzących je cząstek, więc nie ma powodu, aby masa powstających jąder radonu i helu była równa masie jądra radu. Możemy to sprawdzić na podstawie danych z tablic:

$$m_{\mathrm{Rn}} + m_{\mathrm{He}} = 368{,}5905 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg} + 6{,}6447 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg} = 375{,}2352 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$$

$$m_{\mathrm{Ra}} = 375{,}2438 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$$

Masa produktów jest mniejsza o $\Delta m = 0{,}00860 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg} = 8{,}60 \cdot 10^{-30}\,\mathrm{kg}$ od masy jądra radu.
Zatem w reakcji wyzwala się energia:

$$E = \Delta m c^2 = 7{,}74 \cdot 10^{-13}\,\mathrm{J} = 4{,}84\,\mathrm{MeV}$$

1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J
(patrz też s. 145)

Przeskoki elektronów między orbitami w atomie wodoru opisywaliśmy energiami od kilku do co najwyżej kilkunastu elektronowoltów. Również w innych atomach energia wiązania elektronów walencyjnych nie przekracza kilkudziesięciu eV. Wszystkie reakcje chemiczne polegają na oddziaływaniu elektronów walencyjnych, więc także w ich przypadku energia jest rzędu 10 eV. Natomiast w przemianach jądrowych energie są miliony razy większe.

> W przemianach chemicznych możemy uzyskać energię od kilku do kilkudziesięciu eV na jeden atom, a w przemianach jądrowych – wiele milionów eV na atom.

Przejdźmy teraz do bardziej zrozumiałej dla nas skali makroświata. Łatwo obliczymy, że masa atomu radu zmniejsza się o 0,00229%, a wobec tego o taki sam ułamek zmniejsza się masa dowolnej ilości radu. Przykładowo dla 1 grama wyzwala się energia:

$$E = 0{,}0000229\,\mathrm{g} \cdot (3 \cdot 10^{8}\,\tfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}})^2 = 2{,}29 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{kg} \cdot 9 \cdot 10^{16}\,\tfrac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} \approx 2{,}06 \cdot 10^{9}\,\mathrm{J}$$

$$E = 2060\,\mathrm{MJ} = 570\,\mathrm{kWh}$$

Dla porównania: spalenie 1 g węgla pozwoli otrzymać niecałe 3000 J, czyli ok. 0,001 kWh.

Rozszczepienie jądra uranu

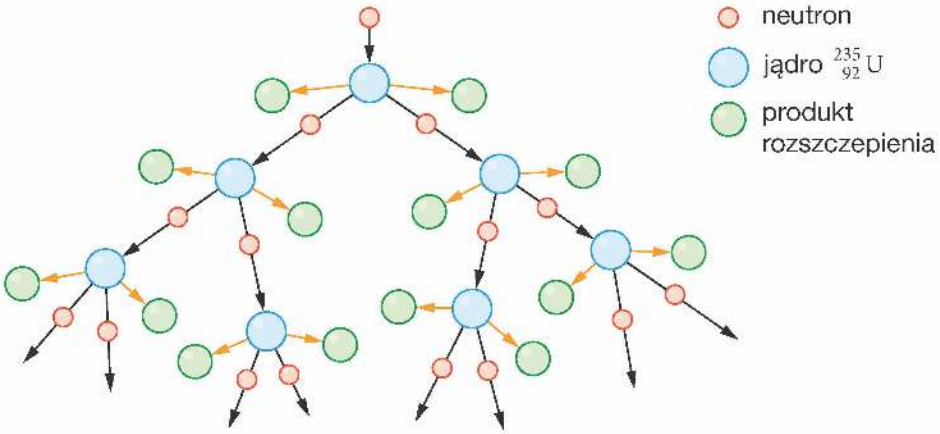
Elektrownie jądrowe nazywa się tradycyjnie także elektrowniami atomowymi.

Reakcją jądrową o wielkim znaczeniu praktycznym jest rozszczepienie jądra uranu lub plutonu. Na niej opiera się działanie elektrowni jądrowych.

Jak przebiega taka reakcja? Wyobraź sobie, że w jądro uranu ^{235}U uderza neutron. Jest on pochłaniany, a powstałe jądro ^{236}U natychmiast rozpada się na dwa mniejsze jądra, czemu towarzyszy wyemitowanie dwóch lub trzech neutronów. Oto jedna z możliwych reakcji:

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{94}_{38}Sr + 2{}^{1}_{0}n$$

Każdy z neutronów powstających w tej reakcji może spowodować rozpad kolejnego jądra uranu (rys. 18.24). Tego typu reakcję nazywamy **reakcją łańcuchową**.



Rys. **18.24.** Schemat reakcji łańcuchowej zachodzącej w bryle uranu $^{235}_{92}U$ (bez zachowania skali). Czarne strzałki przedstawiają tory ruchu neutronów, powodujących rozszczepienie kolejnych jąder uranu



Rys. **18.25.** W bombie jądrowej mamy do czynienia z niekontrolowaną reakcją jądrową. Na zdjęciu jeden z niewielu budynków w Hiroshimie częściowo ocalałych po wybuchu bomby jądrowej 6 sierpnia 1945 r.

Pierwszego neutronu, potrzebnego do zapoczątkowania reakcji, nie trzeba wytwarzać sztucznie. Niewielka liczba neutronów powstaje stale w wyniku naturalnego powolnego rozpadu uranu.

Zatem aby zaszła reakcja łańcuchowa, wystarczy zgromadzić w jednym miejscu wystarczającą jego ilość. Nazywa się ją **masą krytyczną**. Dla uranu ^{235}U uformowanego w kulę wynosi ona 52 kg.

Gdy uranu jest mniej, zbyt duża liczba neutronów ucieka z bryły na zewnątrz, zanim zdąży uderzyć w kolejne jądro i wywołać reakcję rozszczepienia.

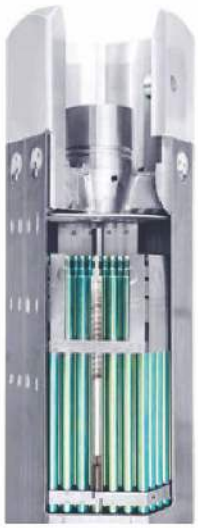
Elektrownia jądrowa

Niekontrolowana reakcja łańcuchowa zachodzi w bombie jądrowej. Jej wybuch trwa zaledwie 10^{-8} s, ale może zniszczyć całe miasto. W przypadku elektrowni jądrowej zależy nam na tym, aby reakcja zachodziła wolniej i aby dało się ją kontrolować.

Pręty paliwowe i kontrolne

W tym celu w reaktorze jądrowym oprócz **prętów paliwowych** (rys. 18.26), zawierających uran lub pluton, umieszcza się **pręty kontrolne**, zawierające substancję pochłaniającą neutrony. Położenie tych prętów można kontrolować, wsuwając i wysuwając je z reaktora. Jeżeli ustawiamy pręty paliwowe w takim położeniu, aby pochłanianie neutronów równoważyło ich przyrost wynikający z reakcji łańcuchowej, to reaktor pracuje ze stałą mocą.

Po całkowitym opuszczeniu prętów kontrolnych pochłanianie neutronów przeważa i reaktor zostaje wygaszony.



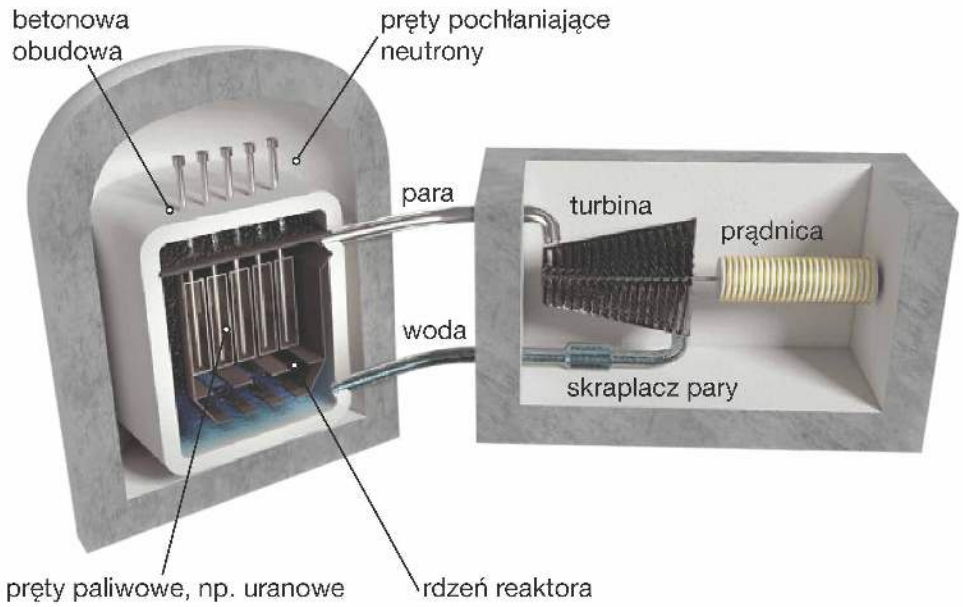
Rys. 18.26. Fragment pręta paliwowego

Moderator

Ważnym elementem reaktora jest także **moderator**, czyli substancja spowalniająca neutrony. Okazuje się bowiem, że neutrony powstające w reakcji łańcuchowej są na ogół zbyt szybkie, aby zostać pochłonięte przez jądra uranu.

Dopiero po zderzeniu z jądrem innej substancji, np. wodoru, tracą znaczną część energii kinetycznej, dzięki czemu zwiększa się prawdopodobieństwo pochłonięcia ich przez uran. Jako moderatora najczęściej używa się wody ze względu na zawarty w niej wodór.

Rozwiązanie zadania 1. pomoże ci zrozumieć, dlaczego w zderzeniu z jądrem wodoru neutron traci szczególnie dużo energii.



Rys. 18.27. Uproszczony schemat elektrowni jądrowej. Dziś stosuje się konstrukcje bardziej skomplikowane, ale dzięki temu bezpieczniejsze

Warto dodać, że elektrownia jądrowa jest elektrownią cieplną, podobnie jak węglowa. W obu przypadkach ciepło służy do otrzymania gorącej pary, która obraca turbinę napędzającą prądnicę. Różnicą jest natomiast sposób uzyskiwania ciepła: w elektrowni jądrowej paliwo się rozgrzewa, ponieważ produkty rozpadu mają dużą energię kinetyczną.

ROZSZCZEPIENIE JĄDRA ATOMOWEGO

Rozszczepienie jądra atomowego to reakcja jądrowa polegająca na przemianie jednego ciężkiego jądra atomu w dwa (rzadziej w więcej) mniejsze jądra o zbliżonych masach. Po przyłączeniu elektronów stają się one atomami lżejszych pierwiastków. Reakcja rozszczepienia może zajść samorzutnie lub w sposób wymuszony: na skutek uderzenia neutronu, protonu lub innej cząstki.

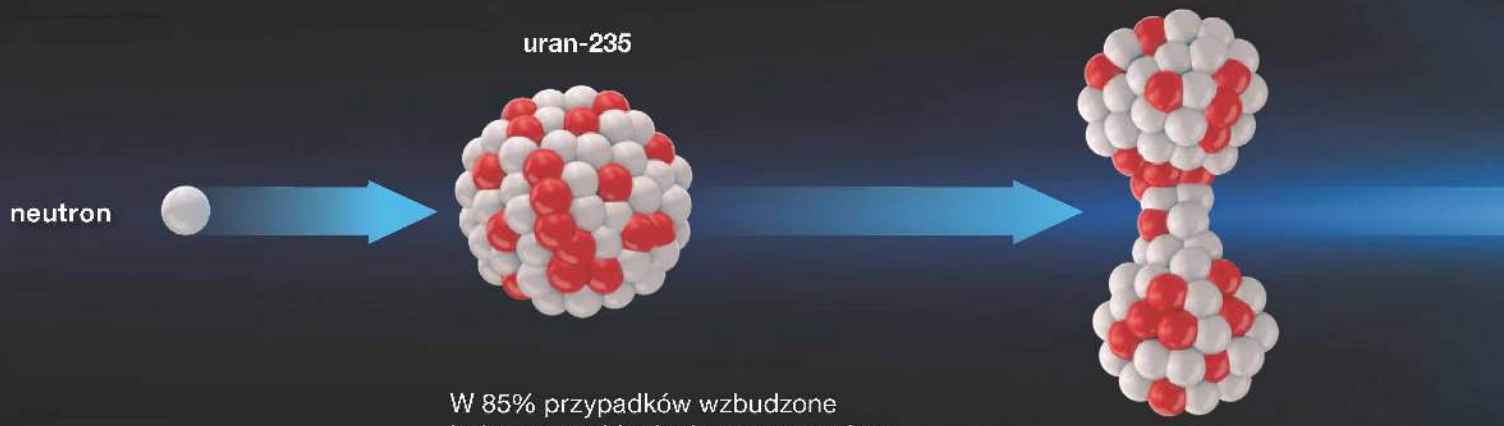
PRZEBIEG PRZYKŁADOWEJ WYMUSZONEJ REAKCJI ROZSZCZEPIENIA

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{92}_{36}Kr + {}^{142}_{56}Ba + 2\,{}^{1}_{0}n + \text{energia} $$

1 Neutron uderza w jądro atomowe ciężkiego pierwiastka, np. uranu-235.

2 Po wchłonięciu neutronu jądro przechodzi w stan wzbudzony i staje się niestabilne.

3 Jądro dzieli się na dwa mniejsze tak, jak dzieliłaby się kropla wody.



W 85% przypadków wzbudzone jądro po pochłonięciu neutronu ulega rozszczepieniu, a tylko w 15% wraca do stanu podstawowego, np. przez emisję neutronu lub promieniowania γ.

Reakcja łańcuchowa

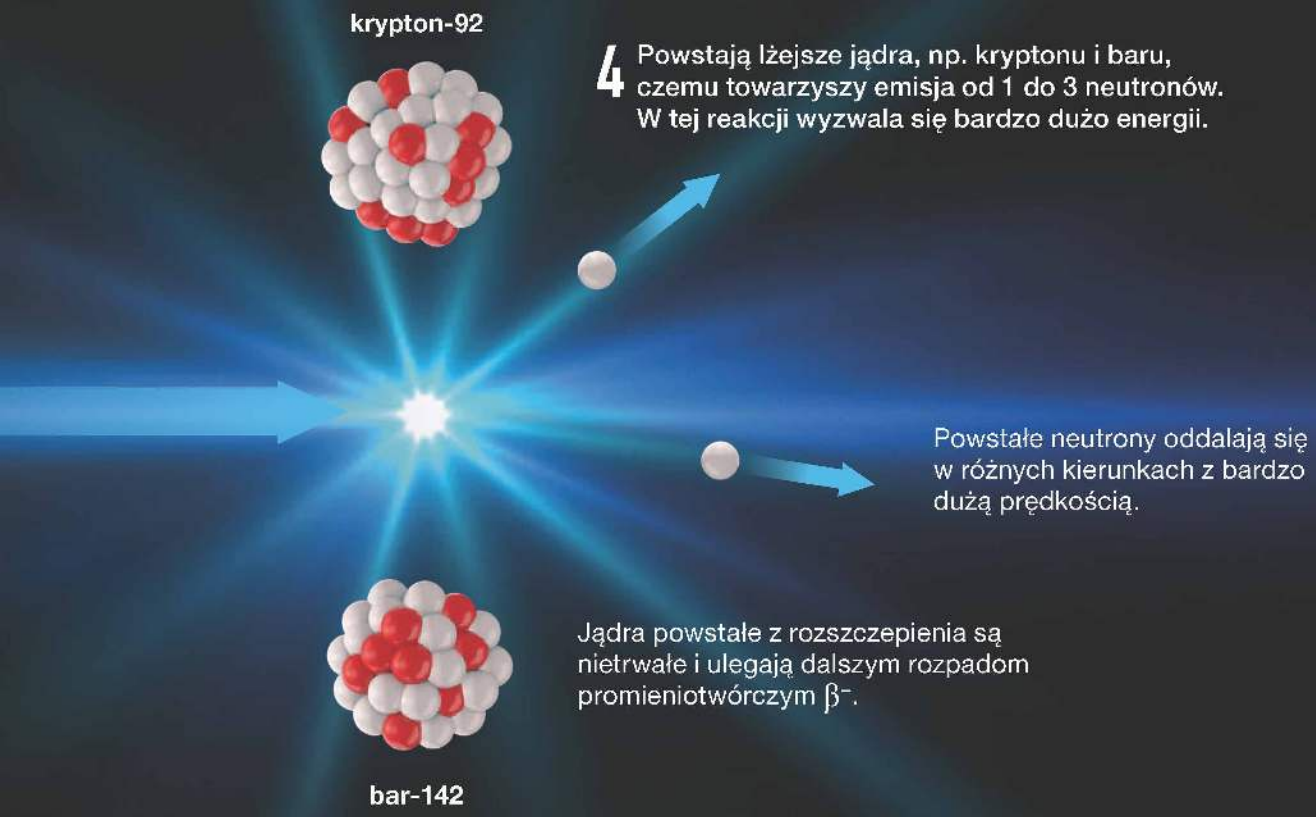
Neutrony emitowane przez rozszczepione jądro zderzają się z kolejnymi jądrami i w sprzyjających warunkach powodują kolejne rozszczepienia – takie zjawisko nazywamy reakcją łańcuchową. Wyemitowany neutron z większym prawdopodobieństwem spowoduje kolejne rozszczepienie, jeśli będzie miał odpowiednio małą prędkość: ok. 2,2 $\frac{km}{s}$. Tymczasem bezpośrednio po rozszczepieniu leci z prędkością rzędu 20 000 $\frac{km}{s}$. Jeśli próbka materiału rozszczepialnego będzie odpowiednio duża, zanim neutrony z niej uciekną, zdążą w trakcie zderzeń wytracić energię, a prawdopodobieństwo, że spowodują kolejne rozszczepienia, wzrośnie.



ENERGIA W ROZSZCZEPIENIU U-235

Z rozszczepienia jednego jądra uranu powstaje ok. 200 MeV energii. Energia ta pochodzi ze zmiany energii wiązania, zgodnie ze wzorem $E = \Delta mc^2$ (łączna masa produktów po rozszczepieniu jest mniejsza niż masa jądra przed rozszczepieniem). Dla porównania, ze spalenia 1 atomu węgla otrzymujemy energię 4 eV, czyli 50 mln razy mniej. Oznacza to, że w ciągu miesiąca do elektrowni węglowej o mocy 1000 MW należy dostarczyć 5000 wagonów węgla, a do elektrowni jądrowej o podobnej mocy – pół wagonu uranu na rok.

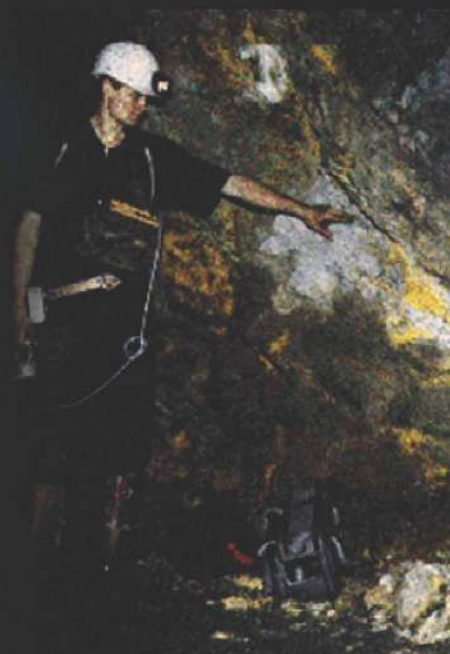




Masa krytyczna

Masa krytyczna to taka ilość materiału, przy której każde rozszczepienie inicjuje dokładnie jedno kolejne rozszczepienie, więc zachodzi samopodtrzymująca się reakcja łańcuchowa. Przy masie większej od masy krytycznej reakcja zachodzi lawinowo, a przy mniejszej – reakcje rozszczepienia ulegają wygaszeniu. Masa krytyczna zależy od rodzaju materiału rozszczepialnego, kształtu próbki i obecności innych substancji. Dlatego przebieg reakcji łańcuchowej, np. w reaktorach jądrowych, można kontrolować przez zastosowanie substancji spowalniającej neutrony, tzw. moderatora, i substancji je pochłaniającej. W bombach jądrowych reakcja łańcuchowa zachodzi w sposób niekontrolowany.

Pierwszy „reaktor jądrowy" powstał ok. 2 mld lat temu bez udziału człowieka w dzisiejszym Gabonie, w Afryce. W złożach uranu rozpoczęła się reakcja łańcuchowa, podtrzymywana przez ok. 150 mln lat w sposób samorzutny.





Rys. 18.28. Zarówno energia z wiatru, jak i ze Słońca zależą od warunków zewnętrznych, a zapotrzebowanie na energię jest ciągłe

Zalety i wady energetyki jądrowej

Elektrownie jądrowe mają wiele zalet. Najważniejszą jest brak emisji gazów cieplarnianych. W tej chwili energetyka jądrowa stanowi jedyną możliwość rozwiązania kryzysu klimatycznego, ponieważ same odnawialne źródła energii nie zaspokoją potrzeb ludzkości (rys. 18.28).
Ponadto dzięki elektrowniom jądrowym można uniknąć konieczności wydobywania węgla, która wiąże się z dużym obciążeniem dla środowiska: zapadliskami, szkodami górniczymi (m.in. pękające domy i jezdnie), hałdami itd. Uran także trzeba wydobywać spod ziemi, ale w znacznie mniejszych ilościach.
Ważnym problemem energetyki jądrowej jest składowanie odpadów promieniotwórczych, czyli zużytych prętów paliwowych. Początkowo przechowuje się je na terenie elektrowni, a po rozpadzie izotopów o krótkim okresie połowicznego rozpadu pozostałą część zabezpiecza się np. w tunelach wyżłobionych w górach.

Katastrofy jądrowe

Mimo licznych zalet energetyka jądrowa ma swoich przeciwników. Podstawowym źródłem niechęci do niej jest obawa przed możliwymi skutkami katastrofy w takiej elektrowni.
Do tej pory taka sytuacja miała miejsce dwa razy.

Czarnobyl



Rys. 18.29. Nowa osłona (sarkofag) czwartego reaktora w Czarnobylu

W 1986 r. w elektrowni w Czarnobylu w Związku Radzieckim (obecnie w Ukrainie) na skutek licznych przekroczeń zasad bezpieczeństwa nastąpił wybuch reaktora. Chociaż nie był to wybuch jądrowy, ale rozerwanie obudowy przez parę wodną pod ciśnieniem, jednak doszło do skażenia promieniotwórczego znacznej części Europy.
Władze radzieckie informowały oficjalnie o 31 ofiarach śmiertelnych, jednak niezależne źródła szacują ich liczbę na ok. 4000. Dokładne określenie tej liczby nie jest możliwe, ponieważ w większości przypadków przyczyną zgonów były nowotwory. Nie zawsze da się ocenić, czy wywołało je promieniowanie – możemy tylko stwierdzić, że liczba zgonów w populacji znacząco się zwiększyła.

Fukushima

Tsunami, cz. II s. 233

Inna katastrofa elektrowni jądrowej miała miejsce w Fukushimie w Japonii w 2011 r. Jej przyczyną była wyjątkowo wysoka fala tsunami, która zalała elektrownię. W efekcie katastrofy doszło do skażenia środowiska, a wiele osób musiało opuścić swoje domy.
Bezpośrednich ofiar śmiertelnych nie było, ale kilkadziesiąt osób zmarło na skutek problemów przy ewakuacji. Jednocześnie w wyniku samego tsunami i trzęsienia ziemi będącego jego przyczyną zginęło kilkadziesiąt tysięcy osób.

Po tej lekcji powinieneś

- posługiwać się pojęciami deficytu masy i energii wiązania;
- rozwiązywać zadania na temat energii wydzielającej się w przemianach jądrowych;
- rozumieć przebieg reakcji rozszczepienia;
- opisywać działanie elektrowni jądrowej, a także jej zalety i wady w porównaniu z innymi typami elektrowni.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Oblicz energię wyzwoloną w reakcji:

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

a) w elektronowoltach na jeden atom uranu,

b) w kilowatogodzinach na 1 g paliwa zawierającego 3% uranu-235.

Rozwiązanie

W tablicach znajdujemy masy poszczególnych substratów i produktów:

neutron	$1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ kg
$^{235}_{92}\mathrm{U}$	$390{,}2158 \cdot 10^{-27}$ kg
$^{140}_{54}\mathrm{Xe}$	$232{,}3441 \cdot 10^{-27}$ kg
$^{94}_{38}\mathrm{Sr}$	$155{,}9155 \cdot 10^{-27}$ kg

a) Zmiana masy w reakcji wynosi:

$$\Delta m = (1{,}6749 + 390{,}2158 - 232{,}3441 - 155{,}9155 - 2 \cdot 1{,}6749) \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} = 0{,}2813 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

$$\Delta m = 2{,}813 \cdot 10^{-28}\ \mathrm{kg}$$

Tej zmianie odpowiada energia:

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 2{,}813 \cdot 10^{-28}\ \mathrm{kg} \cdot (3 \cdot 10^{8}\ \tfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}})^2 \approx 2{,}5 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{J} \approx 1{,}6 \cdot 10^{8}\ \mathrm{eV} = 160\ \mathrm{MeV}$$

b) W gramie paliwa mamy 0,03 g uranu-235, czyli:

$$n = \frac{3 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{kg}}{390 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}} \approx 7{,}7 \cdot 10^{19}\ \text{atomów}$$

W takim razie energia, jaką można uzyskać z tego paliwa, wynosi:

$$E_c = nE = 7{,}7 \cdot 10^{19} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{J} = 1{,}9\ \mathrm{GJ} \approx 500\ \mathrm{kWh}$$

Odpowiedź: Energia wyzwolona w reakcji na jeden atom uranu wynosi ok. 160 MeV, a energia wyzwolona przez 1 g 3% paliwa to ok. 500 kWh.

Uwaga. Wyzwolenie 500 kWh energii w reaktorze elektrowni nie oznacza, że do sieci energetycznej trafi 500 kWh energii elektrycznej – na każdym z etapów przemian energii następują pewne straty. Ponadto uran rozpada się w wielu różnych reakcjach o różnej wydajności. Wynik daje jednak przynajmniej przybliżone wyobrażenie o wydajności reakcji jądrowych.

Zadania s. 230

Pytania i zadania

1. Aby wyobrazić sobie straty energii neutronu przy jego zderzeniu z jądrem wodoru lub węgla, oblicz, jaką część energii straci piłeczka o masie m w zderzeniu centralnym sprężystym ze spoczywającą początkowo piłeczką o masie M.

a) $M = 0{,}998m$

b) $M = 12m$

Uwaga. Przypomnijmy, że w zderzeniu sprężystym energia kinetyczna jest zachowana, a więc energia stracona przez jedną piłeczkę jest oddawana drugiej piłeczce.

2. Jedną z reakcji rozszczepienia uranu zachodzących w reaktorach jądrowych jest rozpad zgodnie z następującym równaniem, w którym znak zapytania zastąpiono pewnym izotopem:

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{93}_{36}\mathrm{Kr} + ? + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

a) Jaki izotop kryje się pod znakiem zapytania?

b) Oblicz energię powstającą w tej reakcji. Wyraź ją w elektronowoltach na jeden atom ^{235}U.

c) Jaką energię możemy uzyskać w tej reakcji z 1 g uranu ^{235}U? Wyraź ją w dżulach i w kilowatogodzinach.

3. Innym rodzajem paliwa jądrowego jest pluton $^{239}_{94}$Pu. W przyrodzie występuje tylko w śladowych ilościach, więc jest wytwarzany sztucznie z uranu $^{238}_{92}$U przez bombardowanie go neutronami. Po pochłonięciu neutronu przez uran powstaje cięższy izotop uranu, który następnie ulega rozpadowi beta, a produkt tego rozpadu znów ulega rozpadowi beta. Zapisz równania tych reakcji.

4. Pierwszy na świecie „reaktor jądrowy" powstał ok. 2 mld lat temu (patrz s. 227 na dole). Oczywiście nie zbudowali go ludzie, ponieważ nie było ich jeszcze na Ziemi. Reaktor ten zaczął działać samorzutnie, ponieważ w tamtych czasach w naturalnie występującym uranie było więcej izotopu ^{235}U. Ma on czas połowicznego rozpadu krótszy niż ^{238}U, dlatego jego zawartość w złożach uranu stopniowo się zmniejszała i obecnie wynosi 0,7%.

Wykaż, że przed 2 mld lat izotop ^{235}U stanowił ponad 3% masy uranu.

Wskazówka. Zwróć uwagę, że rozpadają się oba izotopy.

5. Oblicz deficyt masy układu Ziemia–Księżyc, czyli różnicę między łączną masą Ziemi wraz z Księżycem a masą, jaką miałyby te ciała niebieskie, gdyby spoczywały w bardzo dużej odległości od siebie. Pamiętaj, aby uwzględnić zarówno energię potencjalną, jak i kinetyczną. Następnie oblicz, jaką część masy układu Ziemia–Księżyc stanowi ten deficyt masy.

18.7. Energia syntezy termojądrowej

Przypomnij sobie

- Jądro atomowe ma mniejszą masę niż suma mas jego składników.
- Ta różnica odpowiada energii wiązania zgodnie ze wzorem $E = mc^2$.

Z ciężkich pierwiastków energię uzyskujemy w procesie rozpadu jąder. W przypadku pierwiastków lekkich jest odwrotnie – energia wydziela się, gdy jądra się łączą. Podstawowym przykładem takiej **syntezy** jest przemiana wodoru w hel, np.:

$$^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Jak widzisz, używamy do niej cięższych izotopów wodoru: ^{2}H, zwanego deuterem, oraz ^{3}H, zwanego trytem. Z jednego kilograma mieszanki deuteru i trytu można otrzymać 338 TJ energii, czyli ponad 94 GWh.

> Synteza termojądrowa jest jeszcze wydajniejszym źródłem energii niż rozpad pierwiastków ciężkich.

Niestety, choć umiemy wywołać ją w sposób niekontrolowany w bombie termojądrowej (wodorowej), to nie udało się jeszcze zbudować elektrowni termojądrowej mimo trwających od kilkudziesięciu lat prac.
Przemiana wodoru w hel zachodzi w ogromnej temperaturze. Jest ona niezbędna, aby dodatnio naładowane jądra wodoru przezwyciężyły odpychanie elektryczne i zbliżyły się do siebie na odległość, w której siły jądrowe przeważają nad elektrycznymi.



Rys. 18.30. Na atolu Enewetak 1 listopada 1952 r. przeprowadzono pierwszy test bomby termojądrowej. Jednym z jej twórców był polski matematyk Stanisław Ulam

Tabela 18.1. Porównanie elektrowni węglowej, jądrowej i termojądrowej

	Elektrownia węglowa	Elektrownia jądrowa	Elektrownia termojądrowa
Zasada działania	Spalanie węgla	Rozszczepianie jąder ciężkich pierwiastków (jak uran, pluton)	Łączenie się jąder pierwiastków lekkich (wodoru w hel)
Wydajność (energia elektryczna na kilogram paliwa)	3 kWh (węgiel kamienny) 1 kWh (węgiel brunatny)	40 000 kWh (na 1 kg naturalnego uranu)	> 1 mln kWh
Dostępność paliwa	Występuje w niektórych krajach. W Polsce tanie w eksploatacji pokłady węgla zostały wyczerpane	Tylko w niektórych krajach znajdują się rudy uranu. W Polsce występują, ale są trudno dostępne	Deuter można tanio uzyskiwać z wody morskiej, tryt wytwarzać z litu. Są one dostępne dla większości państw
Produkty reakcji	Duże ilości odpadów składowanych na hałdach	Wiele izotopów, także o długim czasie rozpadu	Stabilny izotop helu, nieszkodliwy dla środowiska
Liczba działających elektrowni na świecie	Ponad 2000	Ponad 400	0

Równoważnik trotylowy

Kiedyś jako jednostkę mocy wprowadzono konia mechanicznego, ponieważ nabywca maszyny parowej chciał wiedzieć, ile koni zostanie zastąpionych przez nowe urządzenie. Podobnie stało się z energią broni jądrowej: wojskowi chcieli wiedzieć, ile ton trotylu (trójnitrotoluenu, TNT) zastąpi nowa bomba, więc energię zaczęto wyrażać w tonach trotylu.

W przypadku bomb jądrowych opartych na rozszczepieniu zwykle jako jednostki używa się kiloton TNT (kt TNT), a w przypadku bomb termojądrowych (wodorowych) – megaton TNT (Mt TNT).

$$\mathbf{1\ t\ TNT = 1\ mln\ kcal = 4{,}2 \cdot 10^9\ J = 4{,}2\ GJ}$$

W wybuchu bomby jądrowej Little Boy, zrzuconej na Hiroshimę, została wyzwolona energia ok. 15 kt TNT. Największa bomba wodorowa, radziecka Car Bomba (nazwę *car* tradycyjnie dodawano do nazw różnych wielkich konstrukcji), eksplodowała z energią ok. 50 Mt TNT.

W przypadku bomby termojądrowej używa się zapalnika, którym jest… bomba jądrowa. W przypadku elektrowni nie jest to możliwe. Potrzebną energię można dostarczyć jądrom wodoru m.in. za pomocą lasera. Problemem jest jednak utrzymanie plazmy rozgrzanej do milionów stopni bez kontaktu ze ścianami reaktora, aby nie uległy one zniszczeniu.

Tokamak

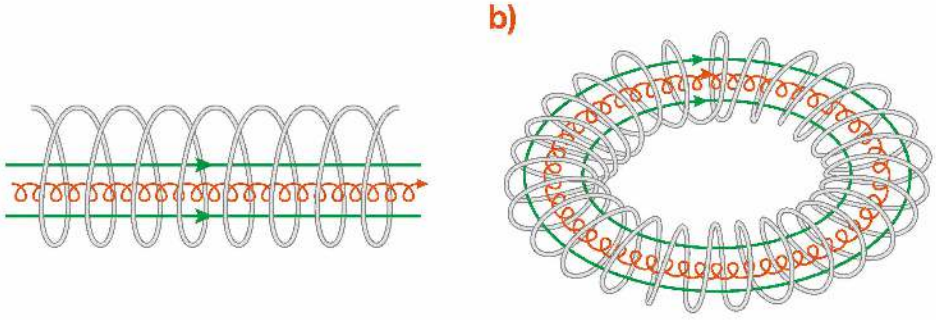
Proponowanym rozwiązaniem problemu izolacji plazmy od otoczenia jest umieszczenie jej w próżni w polu magnetycznym.

Jak pamiętasz z części 3. podręcznika, wewnątrz długiej cewki podłączonej do źródła napięcia występuje jednorodne pole magnetyczne o liniach równoległych do osi cewki. W takim polu cząstki naładowane poruszają się po liniach śrubowych, co zapobiega ich uderzeniu o ścianki (rys. 18.31a). Zjawisko jest podobne do ruchu naładowanych cząstek w polu magnetycznym Ziemi, powodującym znoszenie ich ku biegunom.

Ruch naładowanej cząstki w polu magnetycznym, cz. III s. 244

Opisany układ powodowałby jednak uderzanie cząstek plazmy w denka rury. Aby tego uniknąć, możemy zwinąć rurę w torus (obwarzanek), a wówczas plazma będzie w nim krążyć (rys. 18.31b). Problemem jest fakt, że zwoje po wewnętrznej stronie torusa będą ułożone w mniejszych odstępach niż po zewnętrznej, więc pole nie będzie jednorodne. Możemy jednak temu zaradzić przez zastosowanie dodatkowych magnesów. W ten sposób powstaje **tokamak**. Jego nazwa jest skrótem od rosyjskiego wyrażenia oznaczającego toroidalną komorę z cewkami magnetycznymi.

Toroidalny – w kształcie torusa (obwarzanka)



Rys. 18.31. Plazma w długiej zwojnicy (a) i w tokamaku (b). Zielone linie oznaczają linie pola, a czerwone – tor naładowanej cząstki

Niestety, choć tokamaki są budowane od lat 50. XX w., wciąż energia potrzebna do ich zasilania (zwłaszcza do podgrzewania plazmy) jest większa niż energia otrzymywana w reakcji. Urządzenie służy więc wyłącznie do badań i nie może być jeszcze zastosowane jako źródło energii.

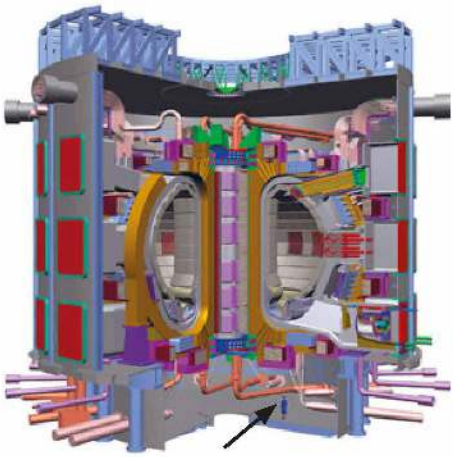
Tokamak ITER

Duże nadzieje wiąże się z ogromnym tokamakiem ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), budowanym na południu Francji (rys. 18.32). Ma on zacząć działać w 2035 r. i powinien produkować dziesięć razy więcej energii niż potrzeba do jego zasilania.
Będzie to jednak, jak sama nazwa wskazuje, dopiero reaktor eksperymentalny, który pozwoli wykonać doświadczenia niezbędne do budowy komercyjnie dostępnych reaktorów termojądrowych dla elektrowni.
Nie mamy więc dość czasu, aby czekać z transformacją energetyczną na budowę elektrowni termojądrowych.

Iter to jednocześnie łacińskie słowo oznaczające drogę, ścieżkę.

a) b)

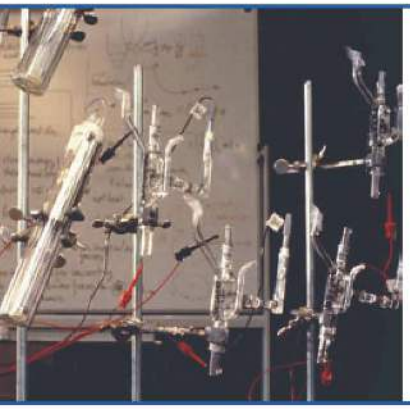




Rys. **18.32.** a) plac budowy ITER (zdjęcie z 2018 r.), b) rysunek tokamaka ITER – zwróć uwagę na niebieską sylwetkę człowieka, umieszczoną w celu pokazania skali

Dlaczego Słońce świeci

Na podstawie energii promieniowania dochodzącego od Słońca do Ziemi można obliczyć całkowitą moc Słońca (patrz zad. 2., s. 241). Podobne szacunki robiono już w XIX w., jednak ich wyniki był trudne do wyjaśnienia. Nie znano bowiem źródła energii tak wydajnego, aby mogło zasilać gwiazdę. Wiedziano jedynie, że gdyby na Słońcu spalał się węgiel, dawno zabrakłoby paliwa.
Znano co prawda zjawisko bardziej wydajne od przemian chemicznych: wyzwalanie energii uzyskanej kosztem grawitacyjnego zapadania się Słońca, czyli kosztem energii potencjalnej oddziaływań grawitacyjnych między jego fragmentami. Jednak i ono nie pozwalało wyjaśnić całej mocy promieniowania słonecznego.



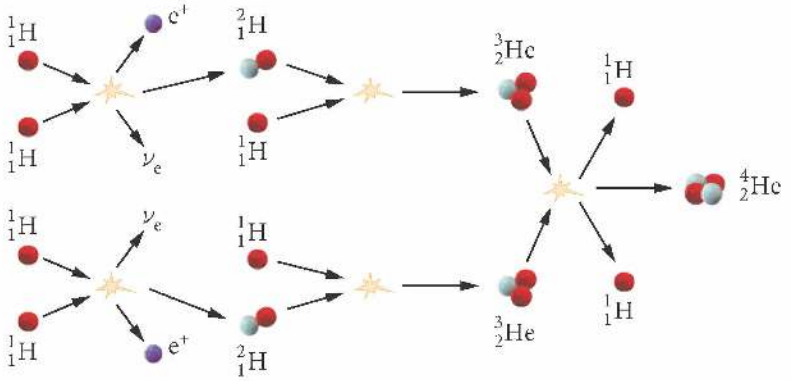
A to ciekawe

W 1989 r. wydawało się przez chwilę, że reakcję syntezy termojądrowej można przeprowadzić także w temperaturze pokojowej. Mieli tego dokonać dwaj amerykańscy chemicy. Niestety, gdy ich eksperyment próbowano powtórzyć w innych laboratoriach, nikomu się to nie udało.
Nie oznacza to, że niedoszli odkrywcy byli oszustami – prawdopodobnie błędnie zinterpretowali wyniki swoich doświadczeń. Właśnie dlatego w fizyce i innych naukach przyrodniczych zanim doniesienie o nowym odkryciu zostanie przyjęte, jest dokładnie sprawdzane przez innych uczonych.

Dopiero odkrycia z dziedziny fizyki jądrowej pozwoliły rozwiązać ten problem.

Słońce i inne gwiazdy świecą dzięki zachodzącym w nich przemianom termojądrowym.

Jedną z przemian termojądrowych jest łączenie się jąder wodoru w jądra helu, a więc reakcja podobna do reakcji zachodzącej w bombie termojądrowej (wodorowej) i w przyszłych elektrowniach termojądrowych. Jest to główne źródło energii większości gwiazd przez większość czasu ich istnienia. Jednak w miarę upływu czasu Słońce będzie się zmieniać. Dalszymi losami naszej i innych gwiazdy zajmiemy się w następnej lekcji.



Rys. **18.33.** Uproszczony schemat syntezy wodoru w hel

Rozpad beta plus: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$, gdzie e^+ to pozyton, czyli antyelektron, a ν_e to neutrino elektronowe

Schemat reakcji zachodzącej na Słońcu przedstawiono na rysunku 18.33. Zwróć uwagę, że w pierwszym jej etapie, gdy dwa protony łączą się w jądro deuteru, następuje zamiana jednego z nich w neutron. Taka zamiana przebiega analogicznie do rozpadu beta plus i również w tym przypadku oprócz neutronu powstaje pozyton oraz neutrino.

Po tej lekcji powinieneś

- opisywać reakcję syntezy termojądrowej;
- rozwiązywać zadania związane z tą reakcją;
- omawiać problemy związane z budową elektrowni termojądrowych i plany ich przezwyciężenia.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Moc promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez Słońce wynosi $P = 3{,}8 \cdot 10^{26}$ W. Jaka ilość wodoru ulega przemianie w hel w ciągu $t = 1$ s? Załóż, że na neutrina przypada 2% powstającej energii. Potrzebne masy odczytaj z tablic na końcu podręcznika.

Rozwiązanie

W pojedynczej reakcji cztery protony (czyli cztery jądra wodoru) zamieniają się w jądro helu. Powstaje wówczas energia:

$$E_1 = \Delta mc^2 = (4m_p - m_{He})c^2$$

$$E_1 = (4 \cdot 1{,}6726 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} - 6{,}6447 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}) \cdot (3 \cdot 10^8\ \tfrac{\text{m}}{\text{s}})^2 \approx 4{,}113 \cdot 10^{-12}\ \text{J}$$

Całkowita energia wydzielona przez Słońce w czasie 1 s to $E = P \cdot t = 3{,}8 \cdot 10^{26}$ J. Jest ona równa energii wydzielonej w N reakcjach po odjęciu energii przypadającej na neutrina:

$$E = N \cdot 0{,}98 \cdot E_1$$

Stąd mamy:

$$N = \frac{E}{0{,}98E_1} \approx 9{,}4 \cdot 10^{37}$$

W każdej z N reakcji biorą udział 4 jądra wodoru, a więc łączna masa wodoru wynosi:

$$m = 4 \cdot N \cdot m_H \approx 6{,}3 \cdot 10^{11}\ \text{kg}$$

Odpowiedź: Na Słońcu w ciągu 1 s przemianie w hel ulega ok. $6{,}3 \cdot 10^{11}$ kg (czyli 630 mln ton) wodoru.

Uwaga. Ta ilość wodoru, wielka z punktu widzenia człowieka, to zaledwie $3 \cdot 10^{-19}$ masy Słońca. Oznacza to, że przez 100 lat przemianie ulega miliardowa część masy naszej gwiazdy.

1. Oblicz, jaka masa zmieniła się w energię w wybuchu bomby Little Boy oraz Car Bomby. Potrzebne dane znajdziesz w ramce na s. 232.

2. Jednym z rodzajów syntezy termojądrowej, który wydaje się najłatwiejszy do zastosowania w przyszłych elektrowniach termojądrowych, jest reakcja:

$$^3_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$$

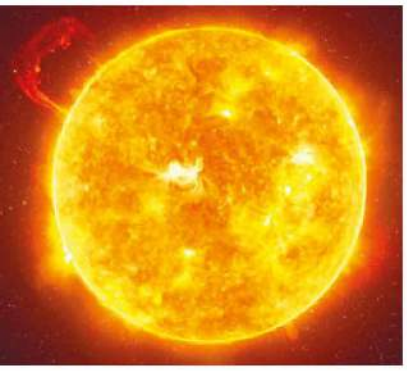
a) W jakim stosunku wagowym należy zmieszać tryt z deuterem, aby uzyskać paliwo do tej reakcji?

b) Oblicz energię, jaką można uzyskać z 1 g paliwa.

3. Oblicz całkowitą energię dostarczaną Ziemi przez Słońce w ciągu roku.

Wskazówka. Skorzystaj z informacji o mocy Słońca podanej w przykładzie.

18.8. Ewolucja Słońca i innych gwiazd



Rys. 18.34. Reakcje termojądrowe w Słońcu zachodzą w jego jądrze

Przypomnij sobie

- Gwiazdy świecą własnym światłem dzięki zachodzącym w nich przemianom jądrowym.
- W Słońcu zachodzi przemiana termojądrowa wodoru w hel.

W poprzednim temacie mówiliśmy, że w Słońcu zachodzi przemiana termojądrowa wodoru w hel. Jednak nie zawsze tak będzie. Słońce przejdzie w swoim życiu przez kilka faz – za kilka miliardów lat stanie się czerwonym olbrzymem i zakończy życie jako biały karzeł.

Życie gwiazd

Gwiazdy o masie podobnej do masy Słońca także przeżywają podobne etapy swojej ewolucji. Różny jest tylko czas ich trwania.
Wydawałoby się, że nieco większym gwiazdom zapasów wodoru wystarczy na dłużej. Tak jednak nie jest. Reakcje jądrowe zachodzą w nich szybciej – ich energia musi zrównoważyć większą siłę grawitacji, inaczej gwiazdy by się zapadły. Ostatecznie wcześniej zaczyna im brakować paliwa, mimo że początkowo miały go więcej.
Natomiast w przypadku gwiazd o masie znacznie różniącej się od masy Słońca poszczególne etapy ewolucji przebiegają inaczej.

> Cykl życia gwiazdy zależy od jej masy.

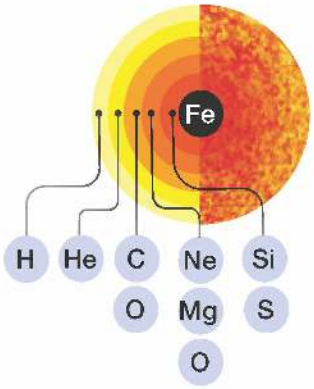
Podobny jest tylko początek każdej gwiazdy. Powstaje ona z obłoku pyłu i gazu, który kurczy się pod wpływem grawitacji. Cząstki pyłu i gazu rozpędzają się kosztem malejącej energii potencjalnej i zderzają się ze sobą. Obłok rozgrzewa się aż do temperatury, w której zachodzi przemiana wodoru w hel.

Lekkie gwiazdy

Najlżejsze gwiazdy po zakończeniu syntezy helu odrzucają zewnętrzne warstwy i od razu zmieniają się w białe karły, czyli supergęste, stygnące kule gazu. Po wypromieniowaniu energii stają się zimnymi kulami gazu – czarnymi karłami.
Czas potrzebny, aby z białego karła powstał czarny karzeł, jest bardzo długi, dlatego obecnie uważa się, że Wszechświat jest jeszcze za młody, aby takie gwiazdy powstały.

Ciężkie gwiazdy

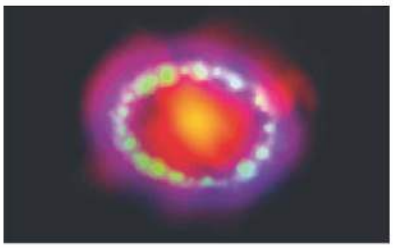
Ciekawiej przedstawia się los gwiazd znacznie cięższych od Słońca (patrz s. 238–239). Kiedy w jądrze skończy się wodór, termojądrowa przemiana wodoru w hel zaczyna zachodzić w otoczce jądra, a gwiazda zostaje czerwonym olbrzymem. Gdy także ten etap dobiegnie końca, przybiera ona postać przypominającą cebulę: gwiazda składa się z kolejnych, coraz głębszych i coraz gorętszych warstw. Bliżej powierzchni z helu tworzy się węgiel, a głębiej z niego powstają kolejne pierwiastki (rys. 18.35).



Rys. 18.35. Cięższe pierwiastki występują w gwieździe na większej głębokości

Wybuch supernowej

Gdy w gwiezdnym jądrze powstanie żelazo, dalsze pozyskiwanie energii z syntezy termojądrowej nie jest już możliwe. Grawitacja, której nie równoważy już promieniowanie, powoduje zapadanie się jądra gwiazdy. Jej zewnętrzne warstwy się zapadają, a następnie odbijają się od jądra. Jest to proces tak gwałtowny, że gwiazda wybucha jako **supernowa**. Jedna supernowa może być jaśniejsza niż cała galaktyka, złożona z miliardów gwiazd. Niektóre supernowe obserwowano z Ziemi gołym okiem (rys. 18.36).



Rys. 18.36. Ostatnia supernowa (do 2021 r.) była widoczna z Ziemi gołym okiem w 1987 r. Zdjęcie pozostałości po wybuchu (2017 r.)

Gwiazda neutronowa

Po wybuchu supernowej z jej zapadniętego jądra często pozostaje **gwiazda neutronowa**, rzeczywiście złożona głównie z neutronów. Ma ona niewyobrażalną gęstość: rzędu $10^{17}\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$, czyli 100 mln ton na cm^3. Niektóre gwiazdy neutronowe obracają się nawet kilkaset razy na sekundę. Z okolicy ich biegunów magnetycznych wybiegają wiązki promieniowania, więc obserwowane z daleka, emitują regularne błyski – na takiej samej zasadzie jak obracająca się głowica latarni morskiej. Takie gwiazdy nazywamy **pulsarami**.

Czarne dziury

W przypadku najmasywniejszych gwiazd z jądra powstaje **czarna dziura**. W ich pobliżu przyspieszenie grawitacyjne jest tak duże, że nie może z nich uciec nawet światło ani inne promieniowanie elektromagnetyczne. Czarne dziury możemy jednak obserwować pośrednio, badając ich wpływ na inne gwiazdy.

W 2015 r. po raz pierwszy zaobserwowano także fale grawitacyjne (zjawisko przewidziane przez ogólną teorię względności), powstałe w wyniku zderzenia dwóch czarnych dziur (patrz artykuł s. 299).



Rys. 18.37. Mgławica Krab to pozostałość po supernowej, zaobserwowanej na niebie w 1054 r. i widocznej gołym okiem przez ok. dwa lata

A to ciekawe

Kiedy w 1967 r. po raz pierwszy odebrano sygnał pochodzący od pulsara, podejrzewano, że regularne błyski są nadawane przez pozaziemską cywilizację. Z tego powodu ich źródło nazwano żartobliwie *Little Green Men* (ang. zielone ludziki), w skrócie LGM-1. Dopiero później astronomowie zrozumieli naturalne pochodzenie sygnału.

Na zdjęciu: Jocelyn Bell, która jako pierwsza zaobserwowała sygnały z pulsarów.



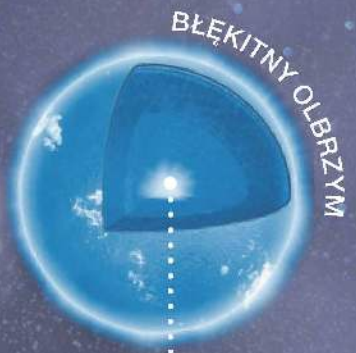
EWOLUCJA MASYWNEJ GWIAZDY

Nie wszystkie gwiazdy ewoluują w taki sam sposób. Przebieg ewolucji oraz czas życia gwiazdy zależy od jej masy. Małe gwiazdy, znacznie mniejsze od Słońca, mogą żyć setki miliardów, a nawet biliony lat, czyli o wiele dłużej niż liczy obecny wiek Wszechświata (13,8 mld lat). Z kolei najmasywniejsze – kończą swój żywot po ledwie kilkudziesięciu, czy nawet kilkunastu milionach lat.

1 Obłok gazowo-pyłowy i protogwiazda

0,5 mln lat

Początek życia wszystkich gwiazd, niezależnie od ich masy, jest taki sam – formują się z obłoku zawierającego głównie wodór, a także hel i śladowe ilości innych pierwiastków. Pod wpływem grawitacji obłok się zapada i powstaje protogwiazda. Wraz ze wzrostem jej gęstości rośnie też temperatura. Gdy osiągnie 10 milionów kelwinów, zaczyna się reakcja syntezy termojądrowej i rodzi się gwiazda.

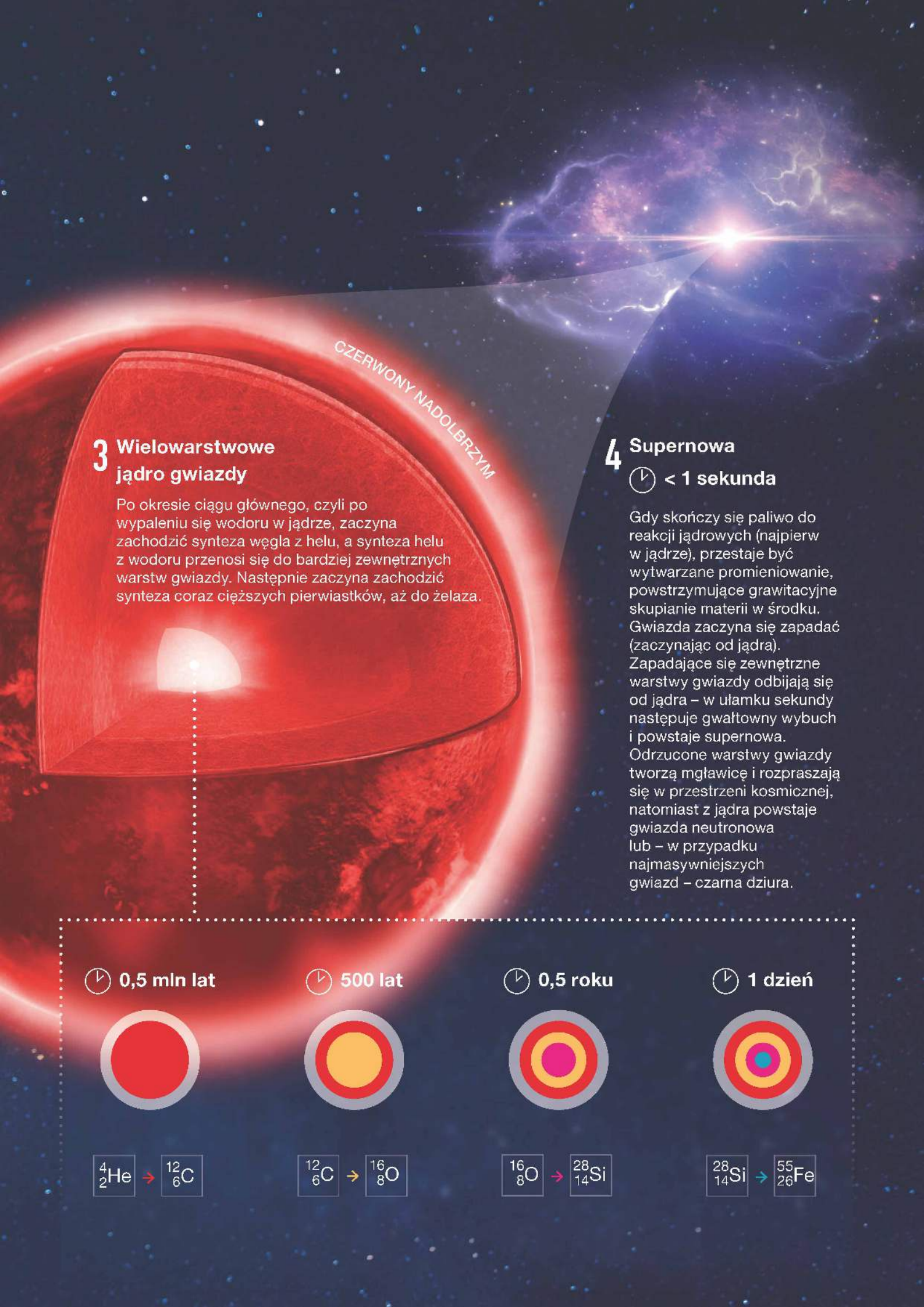


2 Ciąg główny

10 mln – 100 mln lat

To najstabilniejszy i najdłuższy okres, który zajmuje ok. 90% życia gwiazdy. W jądrze gwiazdy zachodzi synteza helu z wodoru. Energia wydzielona w tej reakcji równoważy działanie siły grawitacji, usiłującej skupić materię w środku gwiazdy.

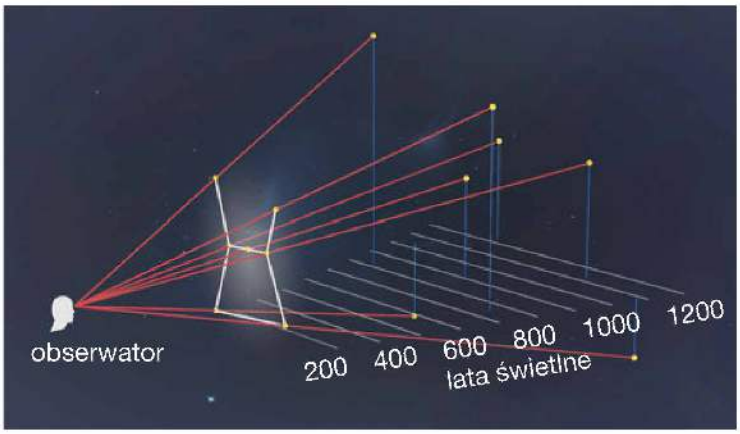
$$^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He$$


CZERWONY NADOLBRZYM
3 Wielowarstwowe jądro gwiazdy
Po okresie ciągu głównego, czyli po wypaleniu się wodoru w jądrze, zaczyna zachodzić synteza węgla z helu, a synteza helu z wodoru przenosi się do bardziej zewnętrznych warstw gwiazdy. Następnie zaczyna zachodzić synteza coraz cięższych pierwiastków, aż do żelaza.
4 Supernowa
< 1 sekunda
Gdy skończy się paliwo do reakcji jądrowych (najpierw w jądrze), przestaje być wytwarzane promieniowanie, powstrzymujące grawitacyjne skupianie materii w środku. Gwiazda zaczyna się zapadać (zaczynając od jądra). Zapadające się zewnętrzne warstwy gwiazdy odbijają się od jądra – w ułamku sekundy następuje gwałtowny wybuch i powstaje supernowa. Odrzucone warstwy gwiazdy tworzą mgławicę i rozpraszają się w przestrzeni kosmicznej, natomiast z jądra powstaje gwiazda neutronowa lub – w przypadku najmasywniejszych gwiazd – czarna dziura.
0,5 mln lat
500 lat
0,5 roku
1 dzień
$^{4}_{2}He \rightarrow {}^{12}_{6}C$
$^{12}_{6}C \rightarrow {}^{16}_{8}O$
$^{16}_{8}O \rightarrow {}^{28}_{14}Si$
$^{28}_{14}Si \rightarrow {}^{55}_{26}Fe$

Gwiazdozbiory

Niektóre układy gwiazd mogą się kojarzyć z rysunkami ludzi, zwierząt i przedmiotów. W ten sposób powstały gwiazdozbiory. Tradycyjne gwiazdozbiory w każdej kulturze są inne, jednak dziś astronomowie na całym świecie posługują się przede wszystkim gwiazdozbiorami nazwanymi przez starożytnych Greków.

Gwiazdy wchodzące w skład jednego gwiazdozbioru nie są na ogół fizycznie powiązane.



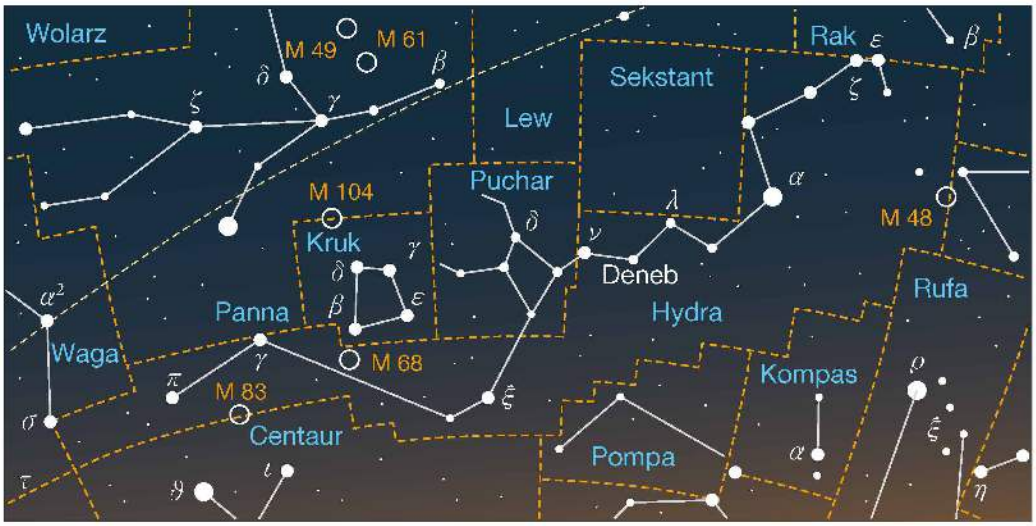
Gwiazdy, które widzimy na niebie jako bliskie, mogą znajdować się w kosmosie daleko od siebie

Gwiazdy w gwiazdozbiorach najczęściej znajdują się w zupełnie różnych miejscach we Wszechświecie i w różnych odległościach od Ziemi.
Jedynie z naszej planety widzimy je blisko siebie (patrz rysunek powyżej).

Obecnie w astronomii gwiazdozbiorem nazywa się nie tyle układ gwiazd, co obszar na niebie. Cała sfera niebieska została podzielona na 88 takich obszarów. Na mapach nieba są one oddzielone liniami przypominającymi granice państw na mapie.

Każdy nowy obiekt odkryty przez astronomów automatycznie trafia do jednego z gwiazdozbiorów, nawet jeśli nie pasuje do pierwotnego rysunku.

Na rysunku poniżej przedstawiono kilka gwiazdozbiorów widocznych okresowo na polskim niebie.



Przykładowo w kwietniu i na początku maja możemy w całości zobaczyć gwiazdozbiór Hydry – największy na niebie.

Powstawanie pierwiastków

W kilka minut po początku Wszechświata (o jego powstaniu powiemy dokładniej w następnej lekcji) znajdowały się w nim głównie wodór (ok. 76%), hel i nieznaczne ilości litu. Prawie wszystkie cięższe pierwiastki powstały we wnętrzach gwiazd. W niektórych z nich synteza kolejnych pierwiastków trwa aż do chwili, gdy powstanie żelazo. Z łączenia jego jąder nie da się już uzyskać energii.

Wodór ($_1$H), hel ($_2$He) i lit ($_3$Li) to pierwiastki o najmniejszych liczbach atomowych.

Jak zatem powstały pierwiastki cięższe od żelaza? Otóż tworzą się one podczas wybuchów supernowych i innych gwałtownych wydarzeń, takich jak zderzenia gwiazd neutronowych.
Niektóre izotopy tworzą się też w atmosferach starych i niezbyt masywnych gwiazd, gdy lżejsze jądra atomowe stopniowo dołączają swobodne neutrony.
W każdej z tych sytuacji przynajmniej część masy gwiazdy zostaje od razu lub z czasem odrzucona i staje się pyłem, z którego potem powstają kolejne gwiazdy.

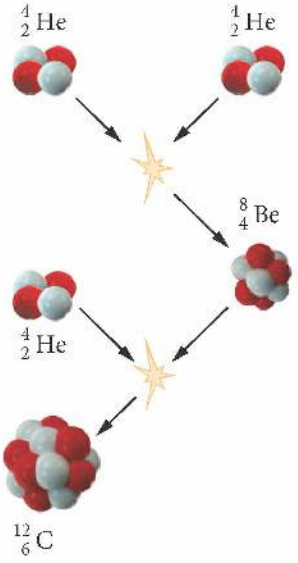
Po tej lekcji powinieneś

- opisywać ewolucję gwiazd;
- wyjaśniać pojęcia: *supernowa* i *czarna dziura*.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. W 1970 r. Joni Mitchell napisała piosenkę *Woodstock*, której refren zaczyna się słowami: „We are stardust" (jesteśmy gwiezdnym pyłem) . Czy to tylko poetycka metafora, czy też mają one uzasadnienie naukowe?
2. Dowiedz się, co to jest stała słoneczna i jaką ma wartość. Na tej podstawie oblicz moc Słońca (moc emitowanego przez nie promieniowania). Sprawdź, czy twój wynik zgadza się z danymi tablicowymi.
3. Gdy Słońce stanie się czerwonym olbrzymem, w jego jądrze będzie zachodzić przemiana helu w węgiel (patrz schemat). Obecnie taka przemiana zachodzi m.in. w Betelgezie, najjaśniejszej gwieździe widocznego w zimie gwiazdozbioru Oriona. Oblicz, ile energii wydziela się w takiej przemianie podczas powstawania:
   - **a)** jednego jądra węgla,
   - **b)** 1 kg węgla.



4. Promień Słońca wynosi w tej chwili ok. $7 \cdot 10^8$ m. Kiedy stanie się ono czerwonym olbrzymem, jego masa pozostanie niemal taka sama, ale promień zwiększy się do mniej więcej obecnej odległości Ziemi od Słońca ($1{,}5 \cdot 10^{11}$ m). Gdy z kolei zostanie ono białym karłem, jego promień skurczy się do rozmiarów tylko nieznacznie większych od promienia Ziemi (ok. 9000 km), podczas gdy masa zmniejszy się dwukrotnie i będzie wynosiła ok. 10^{30} kg. Oblicz średnią gęstość Słońca:

a) obecnie,

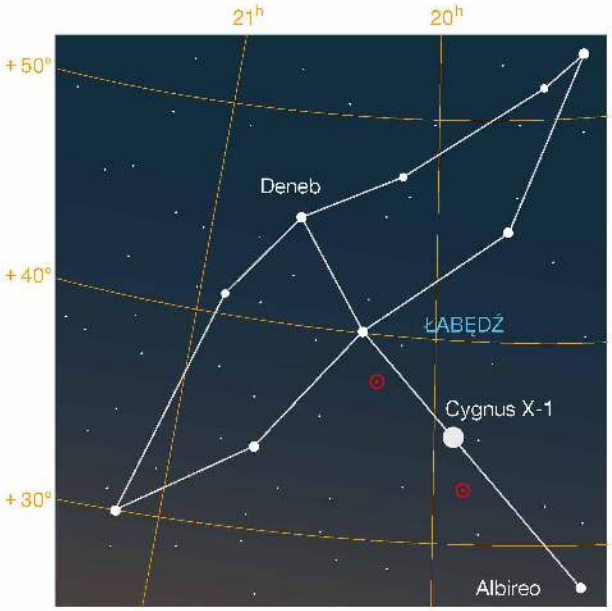
b) gdy będzie czerwonym olbrzymem,

c) gdy będzie białym karłem.

5. Czarnych dziur nie da się zaobserwować bezpośrednio, jednak możesz znaleźć na niebie miejsce, gdzie znajduje się jedna z nich.

a) Znajdź na niebie gwiazdozbiór Łabędzia pokazany na mapie (w Polsce jest to możliwe od wiosny do jesieni).

b) W połowie szyi łabędzia oznaczono punkt Cygnus X-1 – to miejsce, gdzie znajduje się czarna dziura, a dokładniej: układ podwójny, w którym czarnej dziurze towarzyszy gwiazda.



18.9. Galaktyki i Wszechświat

Przypomnij sobie

- Układ Słoneczny składa się ze Słońca, ośmiu planet, planet karłowatych i satelitów planet, a także z drobnych ciał, takich jak planetoidy i komety.
- Jednostka astronomiczna to jednostka długości równa średniej odległości Ziemi od Słońca: 1 au ≈ 149,6 mln km ≈ 150 mln km.

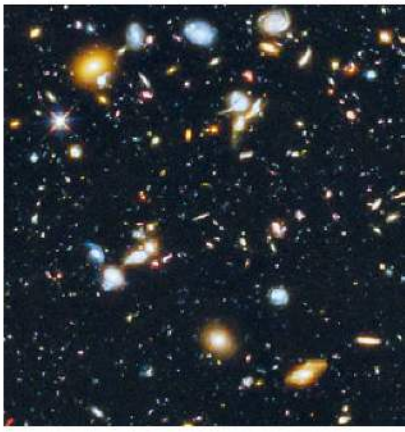
Galaktyka

W poprzedniej części podręcznika mówiliśmy o budowie Układu Słonecznego. Choć w ludzkiej skali wydaje się olbrzymi, z punktu widzenia odległości w kosmosie jest niewielki.

Z pewnością znasz słowo *galaktyka*. Określa ono grupę wielu (milionów lub nawet miliardów) gwiazd tworzących w kosmosie skupisko. Nasza galaktyka nazywa się po prostu Galaktyką (pisaną dużą literą, podobnie jak księżyc Ziemi nazywa się Księżycem) lub Drogą Mleczną.

Ta ostatnia nazwa pochodzi od widoku Galaktyki na ziemskim niebie (rys. 18.39a). W pogodną noc w miejscu oddalonym od świateł, np. w czasie górskiej wycieczki, możemy zobaczyć słabą jasną smugę na niebie, przypominającą strumyk rozlanego mleka. I tak też Drogę Mleczną postrzegali starożytni, którzy nadali jej tę poetycką nazwę.

Jednak za pomocą teleskopu, a nawet zwykłej lornetki możemy się łatwo przekonać, że Galaktyka składa się z ogromnej liczby gwiazd, które tylko gołym okiem wyglądają jak jednolita smuga.



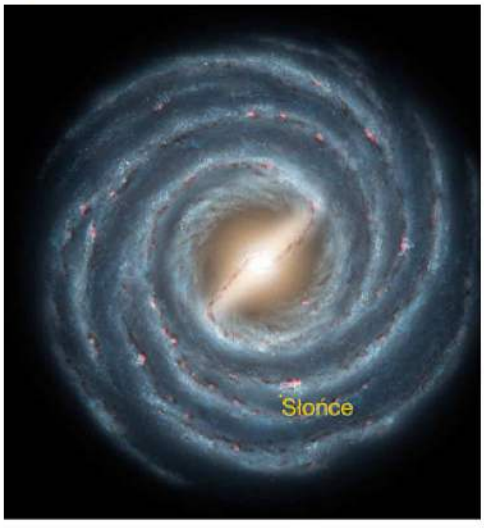
Rys. 18.38. Głębokie Pole Hubble'a, czyli zdjęcie niewielkiego obszaru z pozoru pustego nieba, które po naświetlaniu przez 10 dni ukazało bogactwo odległych, słabo widocznych galaktyk

Słowo *galaktyka* pochodzi od starogreckiego słowa *gala* – mleko.

a)



b)

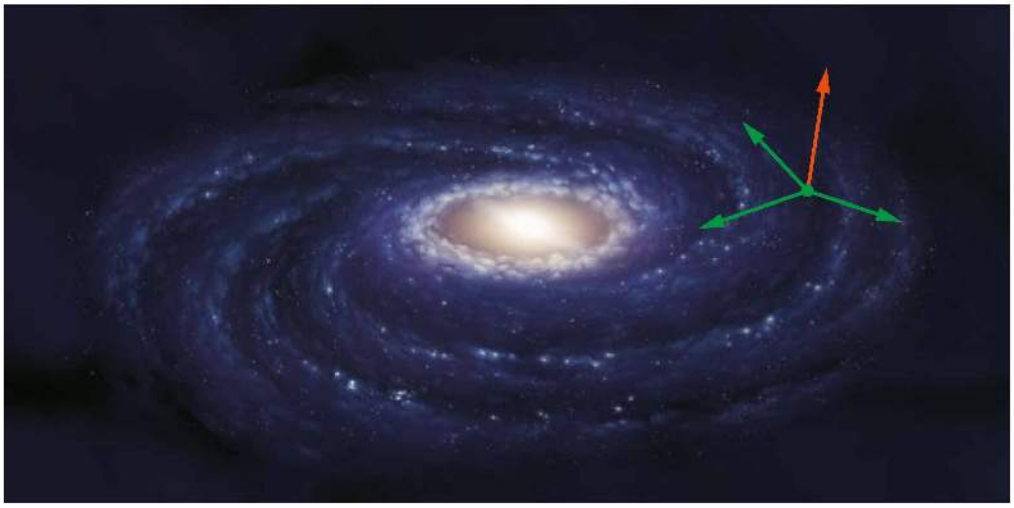


Rys. **18.39.** Galaktyka, czyli Droga Mleczna: a) widziana na ziemskim niebie, b) widok z zewnątrz

Kształt Galaktyki

Nasza Galaktyka ma w rzeczywistości kształt dysku (rys. 18.39b na poprzedniej stronie). Taką obserwują ją astronomowie z innych galaktyk, jeśli istnieją. My jednak patrzymy na nią od wewnątrz.

Na rysunku 18.40 zaznaczono różne kierunki, w które może spojrzeć osoba znajdująca się na Ziemi. Wzdłuż linii czerwonej widzi światło niewielu gwiazd. Natomiast gdy patrzy wzdłuż jednej z zielonych linii, dociera do niej światło bardzo wielu gwiazd widoczne jako świetlisty pas.



Rys. **18.40.** Jak powstaje obraz Galaktyki z jej wnętrza

Jednostka astronomiczna
1 au ≈ 150 mln km
to średnia odległość Ziemi od Słońca.

Jednostki odległości w astronomii

W opisie Układu Słonecznego najwygodniej posługiwać się jednostką astronomiczną. Jednak do podawania odległości między gwiazdami albo rozmiarów Galaktyki nawet ta jednostka jest zbyt mała, aby było to wygodne. Dlatego używamy większych jednostek: lat świetlnych (ly od *light year*) i parseków (pc).

Rok świetlny to odległość pokonywana przez światło w próżni w czasie jednego ziemskiego roku.

$$1\ \text{ly} \approx 9{,}46 \cdot 10^{12}\ \text{km} \approx 10^{16}\ \text{m}$$

Lata świetlne najczęściej spotykamy w publikacjach popularnonaukowych i podręcznikach. Natomiast w pracach naukowych używamy parseków i ich wielokrotności, np. megaparseków (Mpc).

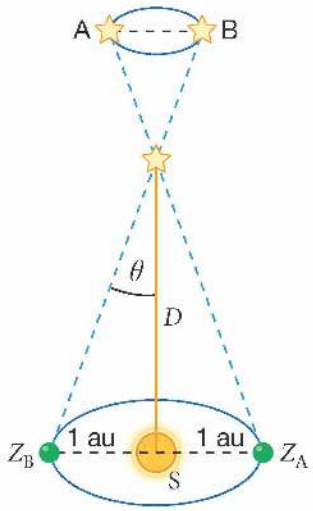
$$1\ \text{pc} = 3{,}26\ \text{ly} \approx 3{,}08 \cdot 10^{13}\ \text{km}$$

Nazwa parsek pochodzi od słów *paralaksa* i *sekunda* (patrz ramka na następnej stronie).

Paralaksa i parsek

Spójrz na zdjęcie. Gdy uczeń patrzy na ołówek tylko prawym okiem, widzi go na tle kubka zielonego, ale gdy patrzy lewym okiem – na tle niebieskiego. Możesz łatwo samodzielnie wykonać takie doświadczenie. Jest to przykład zjawiska **paralaksy**.

W znacznie większej skali paralaksę wykorzystujemy w astronomii. Kiedy patrzymy na gwiazdę w zimie, obserwujemy ją z punktu oddalonego o 2 au, czyli ok. 300 mln km, od miejsca, z którego obserwujemy ją w lecie. Zaznaczony na rysunku kąt θ nazywamy kątem paralaksy. Jest on bardzo mały, dlatego dla jakiejkolwiek gwiazdy udało się go zmierzyć dopiero w połowie XIX w.



Parsek to taka odległość D, dla której kąt θ jest równy jednej sekundzie kątowej ($1'' = \frac{1}{3600}$ stopnia).

Im mniejszy jest kąt paralaksy, tym większa jest odległość. W bardzo dobrym przybliżeniu jest to proporcjonalność odwrotna.

Kąt paralaksy zmierzony dla drugiej po Słońcu najbliższej Ziemi gwiazdy Proxima Centauri to $\theta = 0{,}77''$, a więc jej odległość od Ziemi $D = \frac{1}{0{,}77}$ pc $\approx 1{,}3$ pc.



Galaktyki we Wszechświecie

Droga Mleczna składa się z ponad 200 miliardów gwiazd. Wiele z nich ma swoje układy planetarne. Wciąż nie wiemy, czy w którymś z nich istnieje życie, a tym bardziej – życie inteligentne.

Średnica dysku naszej Galaktyki wynosi ponad 150 000 ly. W jej pobliżu – co oznacza odległość 2,5 mln ly – znajduje się galaktyka podobna do naszej, zwana Galaktyką Andromedy, gdyż z Ziemi jest widoczna w gwiazdozbiorze o takiej nazwie. Widać ją nawet gołym okiem, a przy dobrym wzroku i ciemnym niebie da się ją odróżnić od gwiazdy: jest widoczna jako rozmyta mgiełka, a nie punkt. Przez lornetkę można ją obejrzeć jeszcze dokładniej. Jej zdjęcia wykonane przez silne teleskopy (rys. 18.41) pomagają nam sobie wyobrazić, jak wygląda nasza własna Galaktyka.

Mimo swojego ogromu galaktyki łączą się w jeszcze większe twory – gromady galaktyk. Pomiędzy gromadami znajdują się galaktyki łączące je w ogromną pajęczynę.



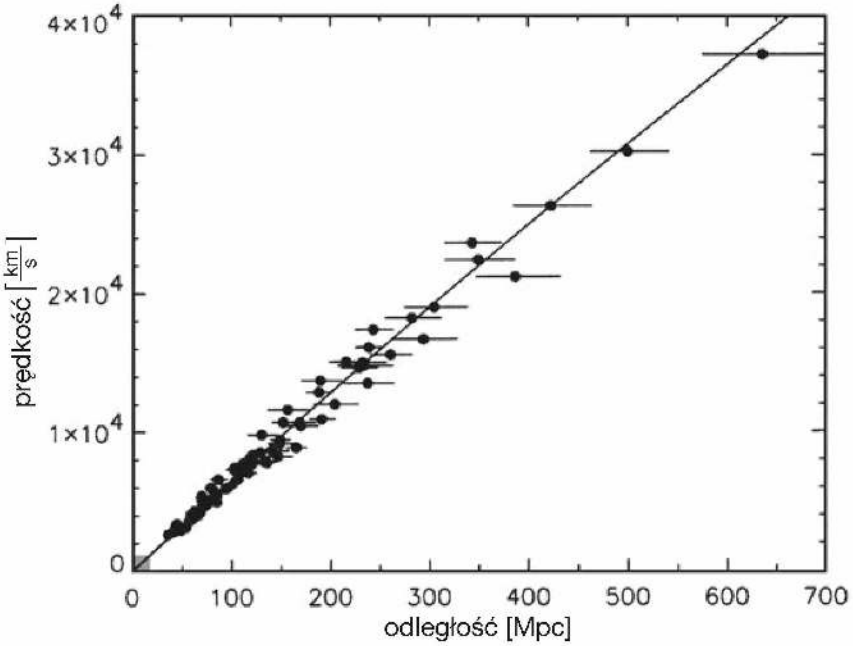
Rys. 18.41. Galaktyka Andromedy widziana z Ziemi. Podobnie wygląda nasza galaktyka, Droga Mleczna, widziana z zewnątrz

Przesunięcie ku czerwieni

Na początku XX w. astronomowie zaobserwowali, że widmo światła gwiazd z odległych galaktyk jest zbliżone do widma Słońca, ale poszczególne linie widmowe są w nim przesunięte w stronę większych długości fal. W obrębie światła widzialnego najdłuższe fale odpowiadają czerwieni, stąd mówimy o przesunięciu ku czerwieni. Takie widmo może powstać tylko w jeden sposób: dzięki efektowi Dopplera. Okazuje się więc, że odległe galaktyki się od nas oddalają.

Efekt Dopplera, cz. II s. 255

Odległość do galaktyk potrafimy mierzyć. Prędkość oddalania się (zwaną także prędkością ucieczki) wyznaczamy ze wzorów opisujących efekt Dopplera. Dzięki temu możemy zbadać zależność między prędkością ucieczki a odległością.



Copyright (2004) National Academy of Sciences, U.S.A.

Rys. **18.42.** Zależność między odległością do galaktyki a prędkością jej oddalania się od nas

Taką zależność przedstawia rysunek 18.42. Jak widzisz, punkty odpowiadające poszczególnym galaktykom układają się wzdłuż prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych. Oznacza to, że wielkości te są proporcjonalne. Powyższy wniosek nazywamy prawem Hubble'a (czyt. habla) albo Hubble'a–Lemaître'a (czyt. lemetra).

Mówimy o odległych galaktykach, ponieważ w przypadku bliższych galaktyk lokalne ruchy mogą zaburzać ogólną prawidłowość. Przykładowo Galaktyka Andromedy się do nas zbliża.

Prawo Hubble'a:
Prędkość ucieczki jest wprost proporcjonalna do odległości między galaktyką a obserwatorem.

Innymi słowy: im dalej od nas jest galaktyka, z tym większą prędkością się od nas oddala.

Tę proporcjonalność możemy opisać wzorem:

$$v = H \cdot d$$

gdzie v to prędkość ucieczki, d to odległość do galaktyki, natomiast stała proporcjonalności H została nazwana stałą Hubble'a. Według obserwacji:

$$H \approx \frac{70 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{\text{Mpc}}$$

1 Mpc = 10^6 pc (parseków) = $= 3 \cdot 10^{19}$ km – patrz s. 244

Rozszerzanie się Wszechświata

Ani Ziemia, ani Słońce, ani nawet Droga Mleczna nie znajdują się w środku Wszechświata. Co prawda wszystkie galaktyki się od nas oddalają, ale to samo mogą stwierdzić mieszkańcy innych galaktyk, jeśli ktoś je zamieszkuje. Po prostu wszystkie galaktyki się od siebie oddalają, ponieważ cały Wszechświat się rozszerza. Często do wyjaśnienia tego zjawiska używa się modelu nadmuchiwanego balonika (rys. 18.43).



Rys. 18.43. Kropki na baloniku symbolizują galaktyki. Jeżeli będziemy dalej nadmuchiwać balonik, każda kropka będzie się oddalać od każdej innej – tym szybciej, im większa dzieli je odległość

Wielki Wybuch

Skoro Wszechświat stale się rozszerza, to znaczy, że kiedyś był znacznie mniejszy niż obecnie. A być może jego istnienie zaczęło się od chwili, gdy cały był skupiony w jednym punkcie. Taką hipotezę postawił w latach trzydziestych XX w. belgijski astronom Georges Lemaître (czyt. żorż lemetr). Jej przeciwnicy nazwali ją prześmiewczo „teorią wielkiego bum" (ang. *Big Bang Theory*), co ostatecznie zostało uznane za pełnoprawny termin naukowy. Polska nazwa Wielki Wybuch nie nosi już znamion pierwotnej ironii.

Mikrofalowe promieniowanie tła

Lemaître nie ograniczył się do podania ogólnego pomysłu, ale przedstawił matematyczną teorię ewolucji Wszechświata, opisującą jego rozszerzanie od stanu maksymalnego zagęszczenia. Teoria ta, nazwana później Wielkim Wybuchem, została rozwinięta przez innych uczonych. Analiza pierwszych chwil Wszechświata doprowadziła do wniosku, że cały kosmos powinien być dziś wypełniony promieniowaniem mikrofalowym wyemitowanym wkrótce po powstaniu Wszechświata. Ponieważ takiego promieniowania badacze wcześniej nie zaobserwowali, zaczęto prowadzić próby jego wykrycia. Gdy to się stało (patrz ramka s. 250), teoria Wielkiego Wybuchu została powszechnie przyjęta.

Jak wiesz, najlepszym sprawdzianem dla każdej teorii fizycznej jest potwierdzenie nowego, nieznanego wcześniej zjawiska, którego występowanie zostało przewidziane na jej podstawie.

Sprawdzianem dla teorii Newtona była obserwacja nowych planet, dla elektrodynamiki Maxwella – istnienie fal elektromagnetycznych, a dla teorii Lemaître'a – mikrofalowe promieniowanie tła.

EWOLUCJA WSZECHŚWIATA

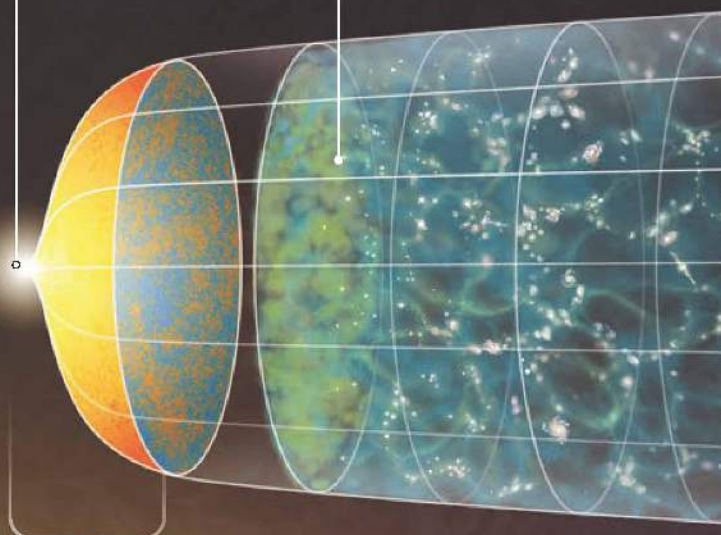
Ewolucja Wszechświata jest logarytmiczna – przez pierwszy ułamek sekundy jego istnienia wydarzyło się więcej niż przez kolejne 14 mld lat. Rozwój teorii fizycznych i wyniki przeprowadzanych eksperymentów pozwalają dziś precyzyjnie określić wiek, rozmiar i inne własności Wszechświata, a także poznać jego historię aż do bilionowej części (10^{-12}) sekundy od Wielkiego Wybuchu. O rozszerzaniu się Wszechświata wiemy dzięki Edwinowi Hubble'owi, który na początku XX w. odkrył, że galaktyki oddalają się od siebie tym szybciej, im dalej się od siebie znajdują. Jego odkrycia znacząco wpłynęły na postrzeganie ewolucji Wszechświata i doprowadziły do powstania teorii Wielkiego Wybuchu.

WIELKI WYBUCH

To nazwa chwili, od której rozpoczęło się rozszerzanie i stygnięcie Wszechświata, trwające do dziś. Wszechświat powstał z niezwykle gęstej i gorącej osobliwości: punktu skupiającego energię, mniejszego od atomu.

200 mln lat 30 K

Powstały pierwsze gwiazdy i galaktyki. Duże gwiazdy wybuchały w postaci supernowych. Z rozproszonej w ten sposób materii formowały się następne gwiazdy, w tym nasze Słońce.



EPOKA PLANCKA

Energia była tak duża, że nie ma teorii, która opisywałaby to, co działo się przed momentem w 10^{-43} s. Prawdopodobnie powstała wówczas czasoprzestrzeń.

10^{-43} s 10^{32} K

EPOKA INFLACJI

Wszechświat pod wpływem ogromnej siły rozprężającej zaczął się gwałtownie rozszerzać. W tym czasie powstały drobne niejednorodności, które dały początek galaktykom. Wszechświat zwiększył się 10^{30} razy i pod koniec tego okresu miał średnicę 3 m.

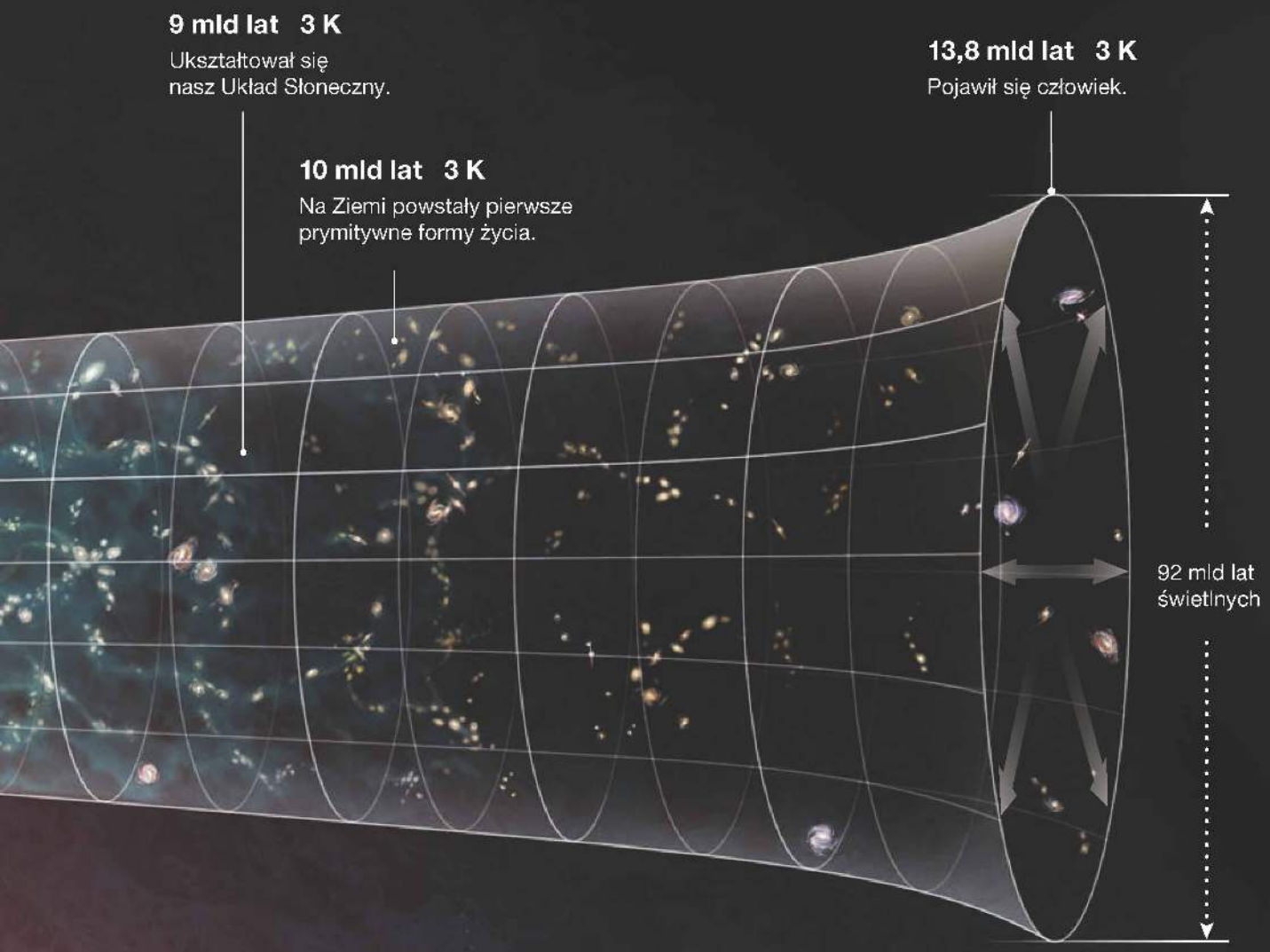
10^{-35} s 10^{27} K

EPOKA PLAZMY

Materia składała się z cząstek elementarnych, których temperatura była zbyt wysoka, aby mogły się połączyć. Dziś są to maksymalne temperatury, jakie człowiek potrafi uzyskać laboratoryjnie w Wielkim Zderzaczu Hadronów w Genewie.

10^{-14} s 10^{19} K





EPOKA HADRONÓW

Kwarki połączyły się i utworzyły hadrony (cząstki zbudowane z kwarków), m.in. protony i neutrony. W tym samym czasie ogromne ilości cząstek i antycząstek ulegały anihilacji, w której wyniku powstawały kolejne fotony. Po tym czasie na jeden nukleon (czyli proton lub neutron) przypadało ok. miliarda fotonów.

EPOKA NUKLEOSYNTEZY

Temperatura spadła na tyle, że możliwe stało się łączenie neutronów i protonów w jądra atomowe lekkich pierwiastków: wodoru i helu oraz w śladowych ilościach litu.

EPOKA FOTONÓW

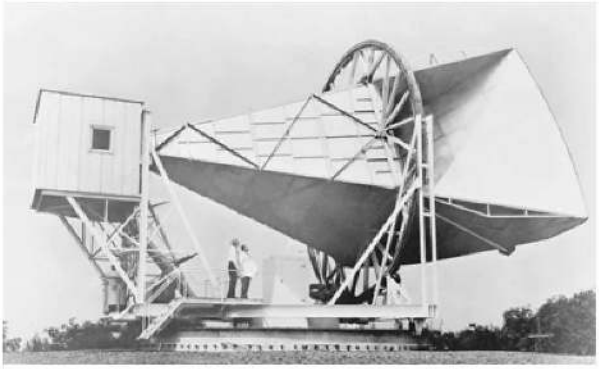
Temperatura obniżyła się do 3000 K. Utworzyły się atomy, dzięki czemu fotony przestały oddziaływać ze swobodnymi elektronami i zaczęły się swobodnie rozprzestrzeniać. Uwolnione wtedy fotony dziś rejestrujemy jako tzw. promieniowanie reliktowe (promieniowanie tła).

10^{-3} s 10^{11} K — 3 minuty 10^{5} K — 380 tys. lat 3000 K



Mikrofalowe promieniowanie tła

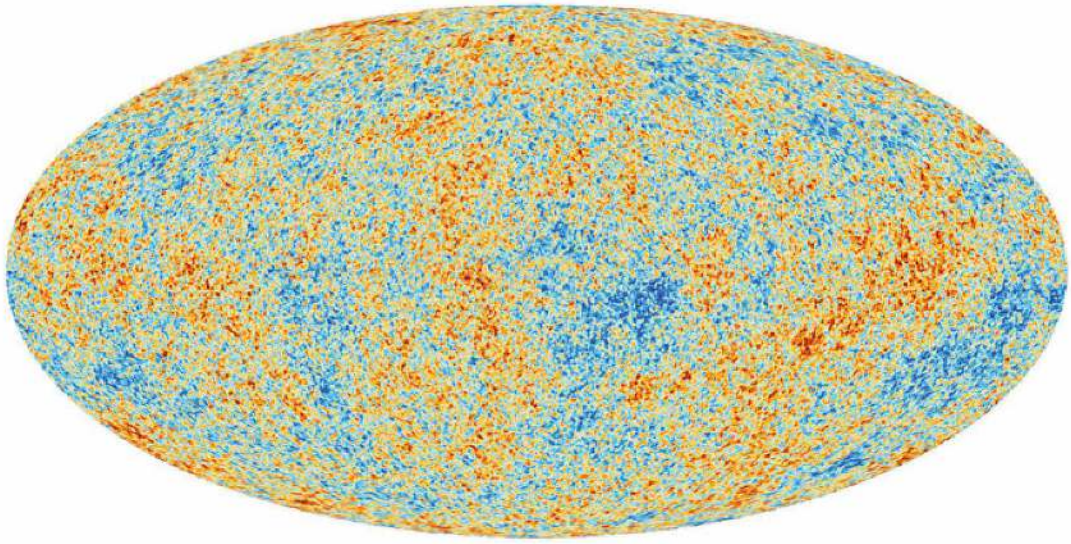
Zgodnie z teorią Wielkiego Wybuchu cały Wszechświat wypełnia promieniowanie wyemitowane niecałe 400 tys. lat po jego powstaniu. Na skutek rozszerzania się Wszechświata fale tego promieniowania uległy wydłużeniu na tyle, że dziś należy ono już do zakresu mikrofal i jest zbliżone do promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze 2,7 K.



Astronomowie przez dłuższy czas bezskutecznie próbowali wykryć takie promieniowanie. Pomoc przyszła z niespodziewanej strony.

Promieniowanie tła odkryli w latach 60. XX w. dwaj młodzi pracownicy Bell Labs: Arno Penzias i Robert Wilson. Prowadzili radiowe obserwacje za pomocą anteny zbudowanej pierwotnie w celu utrzymywania łączności poprzez sztuczne satelity (patrz zdjęcie). Jednak badania utrudniał im radiowy szum. Dopiero gdy naukowcy przypadkiem dowiedzieli się, że taki szum jest już od ponad roku bezskutecznie poszukiwany przez astronomów, zrozumieli jego istotę.

Dziś promieniowanie tła nadal dostarcza nam wielu informacji o Wszechświecie. Poniżej przedstawiamy jego mapę, na której poszczególnymi kolorami zaznaczono odchylenia od średniej temperatury. Mapa została opracowana dzięki pomiarom wykonanym przez kosmiczny teleskop Plancka. Urządzenie umieszczono na orbicie wokółsłonecznej, więc jego pracy nie zakłóca ziemska atmosfera.



Przyczynę przyspieszonego rozszerzania Wszechświata nazywa się ciemną energią. To jednak tylko nazwa, a nie wyjaśnienie zjawiska, ponieważ nie wiemy, czym jest ta energia.

Dalsze rozszerzanie się Wszechświata i jego wiek

Jeszcze pod koniec XX w. uczeni zakładali, że rozszerzanie się Wszechświata musi zachodzić coraz wolniej, ponieważ jest hamowane przez grawitację. Nierozstrzygnięte pozostało natomiast pytanie, czy będzie trwać zawsze, czy może się zatrzyma, aby następnie pod wpływem grawitacji Wszechświat znów zaczął się kurczyć.

Dziś już wiadomo, że rozszerzanie Wszechświata nie tylko nie zwalnia, ale wręcz przyspiesza. Nie rozumiemy tylko, dlaczego tak się dzieje. Jeśli

założymy, że zmiany tempa rozszerzania Wszechświata są niewielkie, możemy oszacować jego wiek.
Załóżmy, że jakaś odległa galaktyka w czasie T (równym wiekowi Wszechświata) oddaliła się od nas na odległość d ze stałą prędkością v. Możemy zapisać:

$$v = \frac{d}{T}$$

Porównajmy tę zależność z prawem Hubble'a:

$$v = H \cdot d$$

Wynika stąd, że $H = \frac{1}{T}$, czyli $T = \frac{1}{H}$.

> Wiek Wszechświata jest w przybliżeniu równy odwrotności stałej Hubble'a.

Obliczmy więc tę wielkość. W tym celu stałą Hubble'a wyrazimy w jednostkach układu SI:

$$H = 70 \frac{\frac{\text{km}}{\text{s}}}{\text{Mpc}} = \frac{70\,000 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10^6 \cdot 3{,}1 \cdot 10^{16}\ \text{m}} = 2{,}26 \cdot 10^{-18} \frac{1}{\text{s}}$$

$$T = \frac{1}{H} = \frac{1}{2{,}26 \cdot 10^{-18} \frac{1}{\text{s}}} = 4{,}43 \cdot 10^{17}\ \text{s} \approx 14\ \text{mld lat}$$

Ten wynik zgadza się z wiekiem Wszechświata obliczonym innymi metodami, np. na podstawie wieku najstarszych skupisk gwiazd.

Po tej lekcji powinieneś

- wyjaśniać pojęcia: galaktyka, Wielki Wybuch, przesunięcie ku czerwieni, mikrofalowe promieniowanie tła;
- rozumieć, dlaczego Galaktyka widziana z Ziemi ma postać świetlistego pasa na niebie;
- opisywać obserwacje świadczące o słuszności teorii Wielkiego Wybuchu;
- posługiwać się astronomicznymi jednostkami długości: latami świetlnymi i parsekami.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Odpowiedz na pytania:

a) Czy podczerwień obecna w widmie gwiazdy także ulega przesunięciu ku czerwieni?

b) W 1922 r. amerykański poeta Robert Frost napisał wiersz, w którym rozważa, czy świat skończy się w ogniu czy w lodzie. Do jego wiersza chętnie nawiązywali astronomowie, gdy na popularnych wykładach podejmowali się próby odpowiedzi na nierozstrzygnięte wówczas pytanie, czy Wszechświat zawsze będzie się rozszerzał, czy też kiedyś zacznie się kurczyć. Jaki jest związek między wierszem a pytaniem z astronomii? Jaką odpowiedź uznajemy dzisiaj za prawdziwą?

2. Wyobraźmy sobie, że chcemy nakręcić film popularnonaukowy trwający 13,7 min, przedstawiający w proporcjonalnym skrócie historię Wszechświata. W którym momencie filmu znalazłoby się pojawienie promieniowania tła? Kiedy w filmie pojawiliby się ludzie?

3. Ponieważ prędkość światła jest skończona, dalekie obiekty oglądamy takimi, jakie były kiedyś. Rozważmy galaktykę, której światło biegnie do nas 2 mld lat.

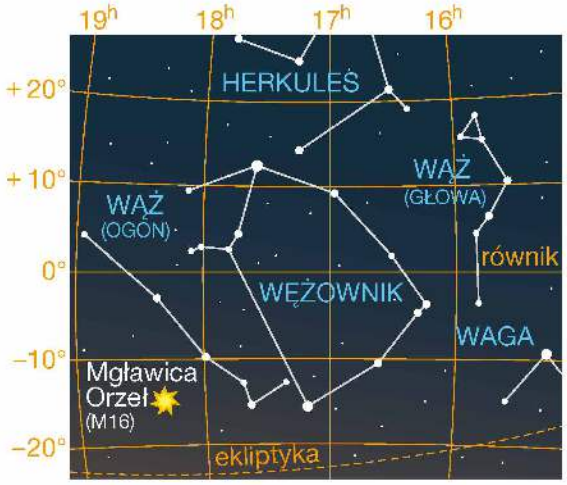
a) Jaka była odległość tej galaktyki od Ziemi w chwili, gdy wysyłała obserwowane przez nas światło? Podaj wynik w latach świetlnych i w megaparsekach.

b) Z jaką prędkością oddalała się ona wtedy od nas?

4. Wykonaj obserwacje. Zrób je latem, kiedy na polskim niebie widać gwiazdozbiór Węża.

a) Skorzystaj z zamieszczonej mapki. W lewym dolnym rogu zaznaczono na niej miejsce, gdzie na niebie można znaleźć Mgławicę Orzeł. Znajdź tę mgławicę na niebie. Jest to obszar, w którym powstają nowe gwiazdy. Przy bezchmurnej pogodzie i z dala od świateł nawet gołym okiem zobaczysz ją jako lekką mgiełkę, a za pomocą lornetki – trochę wyraźniej.

b) Znajdź w internecie zdjęcia tej mgławicy wykonane za pomocą dużych teleskopów.



Jod ze Świerka dla pół miliona pacjentów tygodniowo

Duża część radioaktywnego jodu-131 stosowanego w medycynie nuklearnej na świecie jest produkowana w Polsce. Działający w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) Ośrodek Radioizotopów POLATOM eksportuje odczynniki jodowe i gotowe produkty lecznicze do odbiorców na sześciu kontynentach. Izotopy potrzebne do produkcji radiofarmaceutyków powstają w reaktorze badawczym MARIA. Preparaty zawierające jod-131 używane są przede wszystkim w terapii i diagnostyce chorób tarczycy.



Nadczynność tarczycy produkującej dwa ważne hormony (T3 i T4) to problem ok. 1% ludzi. Choroba powoduje szereg nieprzyjemnych dolegliwości, a w niektórych przypadkach może stanowić zagrożenie dla życia. Choroba może być leczona radioizotopami, poprzez podawanie preparatów z radioaktywnym jodem oraz farmakologicznie lub chirurgicznie. [...]

Do terapii radioizotopowej, a także do wcześniejszej diagnostyki zmian chorobowych wykorzystuje się preparaty zawierające izotopy radioaktywne jodu – przede wszystkim jod-131 o ośmiodniowym czasie połowicznego rozpadu. Jod w naturalny sposób jest gromadzony w tarczycy. Jeśli jest to jod promieniotwórczy, promieniowanie beta emitowane podczas rozpadów jego jąder niszczy część komórek tkanki w swoim najbliższym otoczeniu i w ten sposób zmniejsza intensywność produkcji hormonów.

Jod-131 otrzymuje się przede wszystkim w reaktorach jądrowych. Najczęściej stosowana technologia polega na napromieniowaniu telluru. „Dwutlenek telluru umieszczany jest w specjalnych zasobnikach, które następnie wkładane są do kanałów izotopowych reaktora" – wyjaśnia mgr inż. Ireneusz Owsianko, kierownik reaktora badawczego MARIA w NCBJ w Świerku. „Neutrony pochodzące z reakcji rozszczepienia paliwa jądrowego (U-235) w reaktorze są absorbowane przez jądra telluru-130. Powstały tellur-131 w ciągu kilkudziesięciu minut rozpada się do jodu-131 poprzez rozpad beta. Proces napromieniania materiału trwa kilka dni, przy czym czas ten dobierany jest tak, by osiągnąć optymalne nasycenie jodu. Otrzymany materiał jest silnie promieniotwórczy. Przeładowujemy go w komorach izotopowych do specjalnych pojemników i tak przygotowany wędruje kilkaset metrów dalej do naszego Ośrodka Radioizotopów POLATOM, gdzie jest poddawany dalszej obróbce".

Ośrodek Radioizotopów POLATOM jest koordynatorem i gospodarzem całego procesu wytwarzania produktów zawierających jod-131 w NCBJ w Świerku. Zajmuje się przygotowaniem materiału do napromieniania, a następnie wyodrębnianiem jodu z napromieniowanego materiału i nadawaniem mu użytkowych form w postaci odczynników chemicznych i finalnych preparatów radiofarmaceutycznych, a także sprzedażą do odbiorców na sześciu kontynentach. „Jod wytworzony w reaktorze oddzielamy od pozostałości dwutlenku telluru w procesie sublimacji" – opisuje dr Dariusz Socha, dyrektor OR POLATOM. „Większość uzyskanego radioaktywnego jodu-131 przekształcamy do postaci jodku sodu i głównie w tej formie dostarczany jest klientom. Służy on jako prekursor do wytwarzania radiofarmaceutyków w krajach odbiorców. Produkujmy także gotowe produkty lecznicze stosowane zarówno w zaawansowanej diagnostyce, jak i terapii".

NCBJ jest ważnym światowym dostawcą jodu-131 i producentem radiofarmaceutyków, które go zawierają. „Nasza tygodniowa produkcja jodu-131 zapewnia dawki terapeutyczne i diagnostyczne dla pół miliona pacjentów" – podkreśla mgr inż. Krzysztof Bańko, zastępca dyrektora OR POLATOM ds. handlowych. „Jesteśmy głównym producentem: dostarczamy na rynek światowy mniej więcej tyle jodu, ile w sumie dostarczają trzy pozostałe największe firmy. W całości zaspokajamy polskie zapotrzebowanie na gotowe preparaty jodowe, choć oczywiście dostawy na polski rynek to tylko część naszej produkcji". Niesłychanie ważną okolicznością w produkcji i dystrybucji jodu jest fakt, że czas połowicznego rozpadu jodu-131 wynosi zaledwie 8 dni. „Krótki czas rozpadu izotopu to bardzo dobra okoliczność dla pacjentów, gdyż źródła niszczącego promieniowania wprowadzonego do ich organizmów szybko tracą aktywność" – wyjaśnia dyrektor Bańko. „Jednocześnie jest to duże wyzwanie dla producentów i lekarzy, gdyż preparaty promieniotwórcze muszą być podane pacjentom w ciągu kilku dni od ich produkcji, a ich aktywność przypadająca na konkretny dzień musi być precyzyjnie znana. Radiofarmaceutyki tym różnią się od leków takich jak aspiryna, że nie można zgromadzić ich zapasów. Nasze produkty na bieżąco są rozwożone samolotami do obiorców na obu półkulach. Produkcja musi odbywać się w sposób ciągły, a kilka tygodni ewentualnego przestoju oznacza, że kilka milionów pacjentów na całym świecie nie dostanie w tym czasie swoich leków". […]

Fragment artykułu. Całość dostępna pod kodem QR (adres na s. 309).

Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Wypisz z artykułu pojęcia, których nie rozumiesz, i znajdź w odpowiednich źródłach ich znaczenie.
2. Zapisz równania reakcji jądrowych, o których mowa w artykule: pochłaniania neutronów przez tellur, rozpadu telluru do jodu, rozpadu jodu.
3. Oblicz, jaki procent jodu-131 ulegnie rozpadowi, jeśli dostawa opóźni się o 48 godzin.
4. W artykule napisano: „Proces napromieniania materiału trwa kilka dni, przy czym czas ten dobierany jest tak, by osiągnąć optymalne nasycenie jodu".

   Dlaczego nie jest prawdą, że im dłużej napromieniowywałoby się próbkę telluru, tym więcej zawierałaby ona jodu-131?

Podsumowanie Fizyka jądrowa

Jądro atomowe

- Jądro atomowe składa się z **nukleonów**: protonów i neutronów.
- Liczba protonów (i równa jej liczba elektronów) decyduje o tym, z jakim pierwiastkiem mamy do czynienia, więc odpowiada także za jego właściwości chemiczne. Jądra tego samego pierwiastka mogą mieć różną liczbę neutronów – nazywamy je różnymi **izotopami**.
- Przykładowy symbol izotopu: $^{14}_{6}C$. Liczba 6 to **liczba atomowa** (Z), czyli liczba protonów, a liczba 14 to liczba masowa (A), czyli łączna liczna nukleonów.



Rozpad promieniotwórczy:

- **alfa** (α) – powstaje promieniowanie alfa, czyli jądra helu

Przykładowo: $^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$

- **beta minus** (β^-) – powstaje promieniowanie beta, czyli strumień elektronów

Przykładowo: $^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu}_e$

- **beta plus** (β^+) – powstaje promieniowanie beta plus, czyli strumień pozytonów (antyelektronów)

Przykładowo: $^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + {}^{0}_{1}e + \nu_e$

Rozpad alfa

liczba masowa przed rozpadem → n
liczba atomowa przed rozpadem → m

$$^{n}_{m}\square \rightarrow {}^{n-4}_{m-2}\square + {}^{4}_{2}He$$

$^{4}_{2}He$ ← cząstka alfa

Rozpad beta minus

liczba masowa przed rozpadem → n
liczba atomowa przed rozpadem → m

$$^{n}_{m}\square \rightarrow {}^{n}_{m+1}\square + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\overline{\nu}e$$

$^{0}_{-1}e$ ← elektron

Rozpad beta plus

liczba masowa przed rozpadem → n
liczba atomowa przed rozpadem → m

$$^{n}_{m}\square \rightarrow {}^{n}_{m-1}\square + {}^{0}_{1}e + {}^{0}_{0}\nu e$$

$^{0}_{1}e$ ← pozyton

- **Promieniowanie gamma** jest emitowane, kiedy jądra powstałe po rozpadzie alfa lub beta mają bardzo dużą energię wewnętrzną, czyli są w stanie wzbudzonym.
- **Najbardziej przenikliwe** jest promieniowanie **gamma** – do osłony przed nim potrzeba grubej tarczy.
  Mniej przenikliwe jest promieniowanie **beta** – w powietrzu może przebyć kilka metrów, a w materii do kilku milimetrów.
  Najmniej przenikliwe jest promieniowanie **alfa**, które w powietrzu może przebyć kilka centymetrów, a w tkance – ułamek milimetra.

Masa i energia

- Kiedy ciało zyskuje energię wewnętrzną, zwiększa się jego masa. Gdy traci energię wewnętrzną, jego masa się zmniejsza. Zależność między zmianą energii wewnętrznej a zmianą masy jest opisana wzorem:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

- Energia spoczynkowa ciała to energia odpowiadająca całej jego masie zgodnie ze wzorem $E = mc^2$.
- **Deficyt** (albo defekt) masy to różnica między sumą mas cząstek wchodzących w skład jądra atomowego a jego masą.
- **Energia wiązania** jądra E_w to energia potrzebna do rozbicia jądra na poszczególne składniki. Jej wartość wiąże się z deficytem masy Δm wzorem $E_w = \Delta m c^2$.

W **reakcjach jądrowych** zmianie ulegają jądra atomowe, więc jeden pierwiastek może zmienić się w inny. Różni je to od reakcji chemicznych, w których jądra atomowe, a więc także pierwiastki, nie ulegają zmianie. Przykłady reakcji jądrowych to:

- rozpad promieniotwórczy, opisany wyżej,
- reakcja rozszczepienia ciężkich pierwiastków (wykorzystywana w elektrowniach jądrowych i w bombie jądrowej). Przykładowa reakcja rozszczepienia jądra uranu:

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

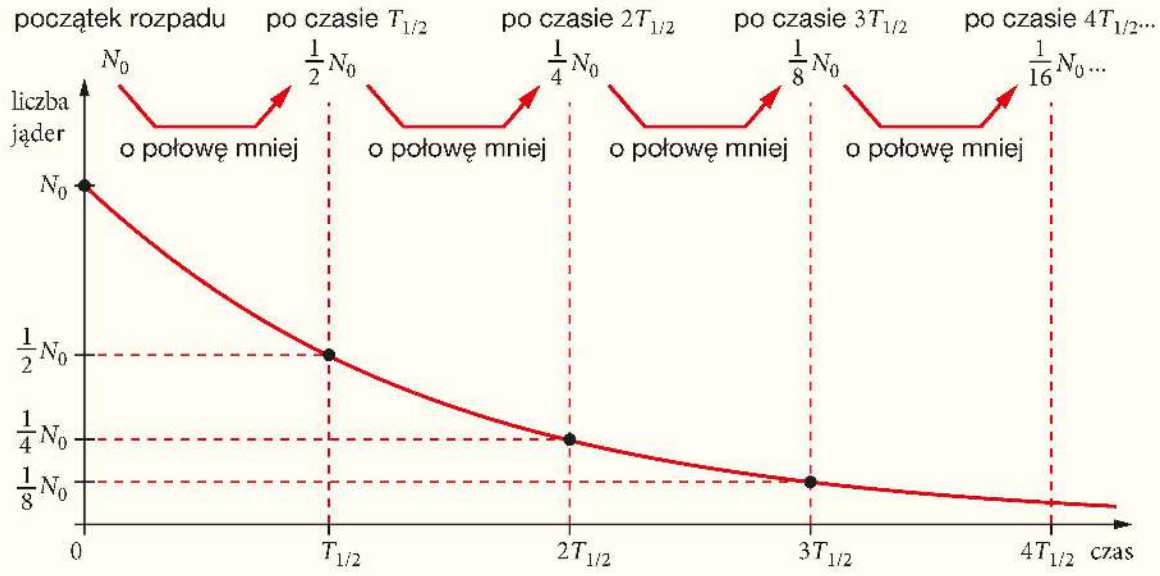
- reakcja łączenia jąder lekkich pierwiastków (zachodząca w gwiazdach, wykorzystywana w bombie wodorowej, czyli termojądrowej, a w przyszłości w elektrowniach termojądrowych). Przykładowa reakcja syntezy jądrowej:

$$^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Nie da się przewidzieć, w którym momencie rozpadnie się dane jądro atomowe, jednak można obliczyć, w jakim czasie rozpadnie się dany procent dużej liczby jąder. Czas, w jakim rozpada się średnio połowa danej liczby jąder, nazywamy **czasem połowicznego rozpadu** $T_{1/2}$.

$$N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

gdzie: N – liczba jąder pierwiastka po czasie t, N_0 – początkowa liczba jąder.



- Proporcjonalnie do liczby jąder zmniejsza się masa wyjściowego izotopu (ale nie masa całej próbki, w której pozostają produkty rozpadu) oraz jego aktywność (liczba rozpadów na sekundę).

- Promieniowanie w niewielkich dawkach nie jest szkodliwe dla organizmu, ale w dużych dawkach może prowadzić do choroby popromiennej, a w skrajnych przypadkach – do śmierci. Skutkiem promieniowania może być też uszkodzenie komórek, a w jego konsekwencji – nowotwór, ujawniający się nawet wiele lat po napromieniowaniu.

- **Ewolucja gwiazd**
  - Każda gwiazda powstaje z obłoku pyłu skupiającego się pod wpływem grawitacji.
  - W większości gwiazd przez większą część czasu ich istnienia ma miejsce reakcja przemiany wodoru w hel. Tak jest obecnie ze Słońcem i będzie jeszcze przez kilka miliardów lat.
  - Dalsze losy gwiazdy zależą od jej masy. Najmasywniejsze gwiazdy wybuchają jako supernowe, po czym zostają z nich gwiazdy neutronowe lub czarne dziury.

- **Jednostki odległości w astronomii**
  - Jednostka astronomiczna – średnia odległość Ziemia–Słońce: 1 au ≈ 150 mln km.
  - Rok świetlny – odległość pokonywana w próżni przez światło w ciągu roku: $1\ \text{ly} \approx 9{,}46 \cdot 10^{12}\ \text{km} \approx 10^{16}\ \text{m}$.
  - Parsek – odległość, dla której kąt paralaksy jest równy jednej sekundzie kątowej: $1\ \text{pc} = 3{,}26\ \text{ly} \approx 3{,}08 \cdot 10^{13}\ \text{km}$.

- **Wielki Wybuch**
  - Zgodnie z obecną wiedzą Wszechświat rozpoczął się od Wielkiego Wybuchu, czyli od stanu, gdy cała jego masa była skupiona w bardzo małej objętości.
  - Teoria Wielkiego Wybuchu wyjaśniła m.in. przesunięcie ku czerwieni w widmie gwiazd i pozwoliła przewidzieć istnienie mikrofalowego promieniowania tła.
  - Dalekie galaktyki oddalają się od nas (i od siebie nawzajem) z prędkością v, proporcjonalną do ich odległości d:

$$v = H \cdot d$$

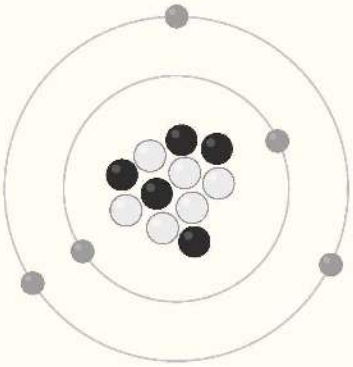
gdzie H – stała Hubble'a, $H = 70\ \frac{\frac{\text{km}}{\text{s}}}{\text{Mpc}}$.

Sposób na zadanie

Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk

Zadanie 1. (0–1)

Na schematycznym rysunku przedstawiono niezjonizowany atom. W jądrze czarnymi kółkami oznaczono jeden rodzaj nukleonów (protony lub neutrony), a białymi – drugi rodzaj.
Zaznacz poprawne dokończenie zdania.



Jądrem atomu jest:

A. $^{11}_{5}B$ **B.** $^{12}_{6}C$ **C.** $^{16}_{8}O$ **D.** $^{23}_{11}Ne$

Rozwiązanie:

Poprawną odpowiedzią jest A.

Wskazówka 1. Pamiętaj, że możesz korzystać ze wszystkich informacji zawartych na rysunku. Mimo że w treści zadania nie ma mowy o elektronach, to na rysunku są one zaznaczone, więc można je policzyć.

Elektrony otaczają jądro i na schematycznym rysunku są przedstawione jako kropki na orbitach. Natomiast białe i czarne kółka wewnątrz jądra to nukleony, czyli protony i neutrony. Protonów jest tyle samo, ile elektronów, a więc 5. W takim razie protony zaznaczono na czarno, a neutrony na biało. Liczba atomowa wynosi 5, a liczba masowa 5 + 6 = 11.

Warto zapamiętać!

- Nukleony to protony i neutrony, czyli każda cząstka w jądrze atomowym to nukleon.
- W atomie jest tyle samo protonów i elektronów.

Zadanie 2.

Izotop neonu ^{24}Ne ulega rozpadowi beta minus z czasem połowicznego rozpadu 3,4 min. W wyniku tego rozpadu powstaje sód ^{24}Na, który również ulega rozpadowi beta minus, a czas połowicznego rozpadu w jego przypadku wynosi 15 h. Ostatecznie powstaje stabilny izotop pewnego pierwiastka.

Zadanie 2.1 (0–2)

Zapisz równania reakcji obu opisanych rozpadów. Jaki pierwiastek powstaje w wyniku drugiego z nich?

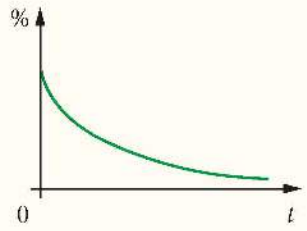
Zadanie 2.2 (0–2)

Oblicz, po jakim czasie w próbce zawierającej neon-24 pozostanie tylko 5% początkowej masy tego pierwiastka.

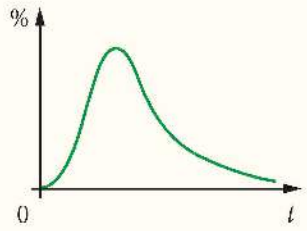
Zadanie 2.3 (0–1)

Próbka czystego neonu-24 zaczęła się rozpadać. Wskaż wykres przedstawiający zawartość sodu-24 w próbce w miarę upływu czasu.

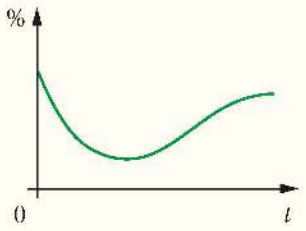
A.



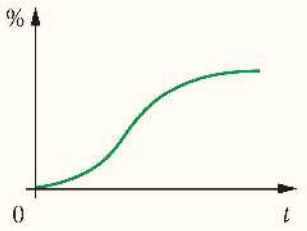
B.



C.



D.



Rozwiązanie:

Ad 2.1

Liczbę atomową pierwiastków możemy sprawdzić w układzie okresowym. Dla neonu wynosi ona 10, a dla sodu 11.

W rozpadzie beta minus z jednego z neutronów powstają proton, elektron i antyneutrino elektronowe.

$$^{24}_{10}\mathrm{Ne} \rightarrow {}^{24}_{11}\mathrm{Na} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \bar{\nu}_e$$

Sód również ulega rozpadowi beta minus, a więc liczba atomowa nowego jądra zwiększa się o 1 (doszedł nowy proton), a liczba masowa pozostaje bez zmian (neutron zmienił się w proton, czyli liczba nukleonów pozostała bez zmiany).

$$^{24}_{11}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{24}_{12}\mathrm{X} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \bar{\nu}_e$$

Symbolem X oznaczyliśmy pierwiastek powstający w tym rozpadzie. W układzie okresowym sprawdzamy, że liczba atomowa 12 oznacza magnez. Tak więc równanie zapiszemy ostatecznie w postaci:

$$^{24}_{11}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \bar{\nu}_e$$

Odpowiedź: W wyniku drugiej reakcji powstaje magnez.

Ad 2.2

Po czasie t z próbki o masie m zostaje $2^{-\frac{t}{T}} \cdot m$, gdzie T jest czasem połowicznego rozpadu. W naszym przypadku:

$$2^{-\frac{t}{T}} \cdot m = 0{,}05m$$

$$2^{-\frac{t}{T}} = 0{,}05 \qquad (1)$$

Wskazówka 2. W tej sytuacji można zlogarytmować obie strony i skorzystać ze wzoru $\log a^b = b \log a$.

Po zlogarytmowaniu obu stron równania (1) mamy:

$$-\frac{t}{T}\log 2 = \log 0{,}05$$

Stąd:

$$t = -\frac{\log 0{,}05}{\log 2}T$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy: $t \approx 14{,}7$ min.

Odpowiedź: Po ok. 14,7 min pozostanie 5% z początkowej masy neonu-24.

Ad 2.3

Poprawną odpowiedzią jest B.

Wskazówka 3. Zwróć uwagę, czym różnią się podane wykresy. Czy wykres zaczyna się od początku układu współrzędnych (A i C – nie, B i D – tak)? Jak zachowuje się dla dużych t (A i B – dąży do zera, C i D – dąży do pewnej dodatniej wielkości)?

Skoro w próbce początkowo był tylko neon, to zawartość sodu dla $t = 0$ była równa 0%. Ten warunek spełniają tylko wykresy B i D.

Neon rozpada się znacznie szybciej niż sód, więc na początku zawartość sodu szybko rosła, ponieważ powstawał szybciej, niż zdążał się rozpaść. Dopiero po pewnym czasie, gdy neonu było już bardzo mało, rozpad sodu przeważył nad jego wytwarzaniem. Po bardzo długim czasie rozpadł się zarówno neon, jak i sód, więc dla dużego t zawartość sodu powinna dążyć do zera.

Z tymi warunkami zgadza się tylko wykres B.

Warto zapamiętać!

- Liczba atomowa (liczba protonów w jądrze) określa jednoznacznie pierwiastek. Liczbę atomową danego pierwiastka można łatwo znaleźć w układzie okresowym pierwiastków.
- Znaczna część izotopów nie jest trwała, ale rozpada się w miarę upływu czasu. Wielkością charakteryzującą tempo tego rozpadu jest czas połowicznego rozpadu.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Rozpad jodu-128

W naturze występuje tylko jeden trwały izotop jodu, o liczbie masowej 127. Poprzez naświetlanie neutronami można z niego otrzymać nietrwały i niewystępujący w przyrodzie izotop $^{128}_{53}\mathrm{I}$. Przeważająca część – aż 93% – jodu-128 podlega rozpadowi beta minus, w którym powstaje trwały izotop ksenonu. Na skutek tego rozpadu powstaje promieniowanie gamma złożone z kwantów o różnych energiach, wśród których najwięcej jest kwantów o energii 443 keV. Pozostałe 7% izotopu rozpada się do telluru. Czas połowicznego rozpadu jest jednakowy dla obu możliwości rozpadu i wynosi 25 minut.

1.1. Zapisz równanie reakcji, w której do jądra jodu-127 jest dołączany dodatkowy neutron, oraz równania reakcji rozpadu powstałego jodu-128.

1.2. Oblicz częstotliwość i długość fali promieniowania gamma złożonego z kwantów o energii 443 keV.

1.3. Przygotowano próbkę 2 g czystego jodu-128. Ile izotopu pozostało w próbce po 1 godzinie?

1.4. O godzinie 10:05 za pomocą scyntylatora stwierdzono, że próbka jodu-128 emituje 50 kwantów o energii 443 keV na sekundę. O której godzinie próbka emitowała 500 takich kwantów?

1.5. O godzinie 10:00 w laboratorium uzyskano próbkę 10 g czystego jodu-128. Oblicz, ile ksenonu będzie zawierać próbka o godzinie 12:05. Pomiń ubytek masy podczas rozpadu związany z utratą energii.

1.6. Naszkicuj, jak wraz z upływem czasu zmienia się procentowa zawartość ksenonu w próbce złożonej początkowo z czystego jodu-128. Pomiń ubytek masy podczas rozpadu, związany z utratą energii.

1.7. Masa atomowa jodu-128 to 127,9058 u, a masa atomowa ksenonu-128 to 127,9035 u. Oblicz, jaka energia wydziela się w czasie rozpadu jodu-128 do ksenonu-128. Wynik podaj w kiloelektronowoltach. Oblicz, jaka część tej energii przypada na kwant 443 keV, a jaka – na energię spoczynkową powstającego elektronu. Wyniki podaj w procentach.

Zadanie 2. Efekt Dopplera dla bardzo dużych prędkości

W przypadku ciał poruszających się z bardzo dużymi prędkościami przy obliczeniach związanych z efektem Dopplera należy posługiwać się wzorami uwzględniającymi efekty teorii względności. Okazuje się, że jeśli ciało oddalające się od obserwatora z prędkością v emituje światło o częstotliwości f, to obserwowana częstotliwość wynosi:

$$f' = f\sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}}$$

Zadanie 2.1. Udowodnij, że zależność długości fali świetlnej λ emitowanej przez ciało oddalające się od obserwatora z prędkością v oraz długość fali obserwowanej λ' są związane zależnością:

$$\lambda' = \lambda\sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}}$$

Zadanie 2.2. Ciało emitujące światło o długości fali 500 nm oddala się od obserwatora z prędkością $0{,}2c$. Oblicz obserwowaną długość fali ze wzoru z teorii względności, a następnie ze wzoru poznanego w rozdziale „Fale mechaniczne" w części 2. podręcznika:

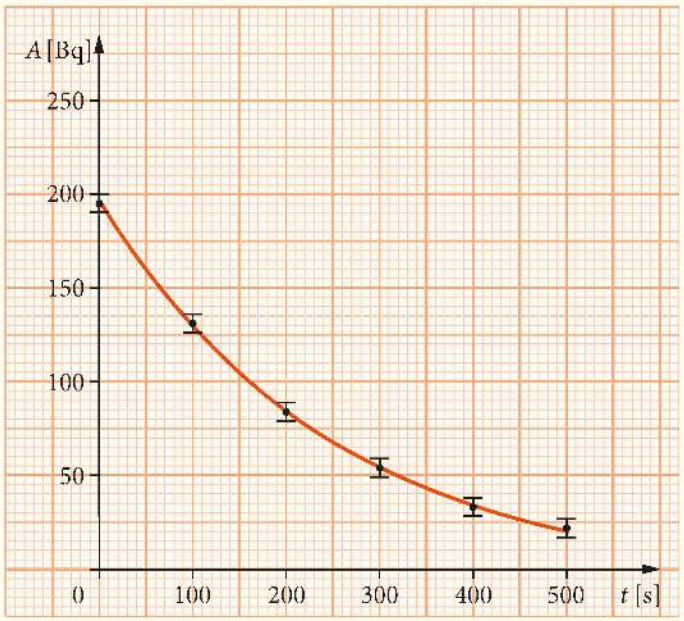
$$\lambda' = \lambda\left(1+\frac{v}{c}\right)$$

Czy ten drugi wzór daje wynik zaniżony czy zawyżony? O ile procent?

Zadanie 2.3. W widmie gwiazd z pewnej galaktyki linia 486 nm (błękitna linia widma wodoru) jest widoczna jako 680 nm. W jakiej odległości od nas znajdowała się ta galaktyka, gdy emitowała obserwowane dzisiaj światło?

Zadanie 3. Wyznaczanie czasu połowicznego rozpadu

Aktywność to liczba rozpadów promieniotwórczych na sekundę, mierzona w bekerelach (1 Bq to 1 rozpad na sekundę).



Fizycy mierzyli zmieniającą się w czasie aktywność próbki pewnego izotopu. Wyniki pomiarów przedstawili na wykresie. Na jego podstawie określ czas połowicznego rozpadu tego izotopu.



19 Elementy fizyki relatywistycznej

1. Czasoprzestrzeń
2. Czasoprzestrzeń w szczególnej teorii względności
3. Względność równoczesności
4. Więcej o teorii względności – temat dodatkowy
5. Energia całkowita

19.1. Czasoprzestrzeń

Przypomnij sobie

- Ruch ciała po linii prostej możemy przedstawić na wykresie zależności współrzędnej położenia od czasu $x(t)$.
- Ruch jest względny – położenie i prędkość ciała zależą od wyboru układu odniesienia.



Rys. 19.1. Albert Einstein

Nazwisko Alberta Einsteina i nazwę *teoria względności* słyszeli wszyscy, ale niewielu umie powiedzieć o niej coś więcej. Masz wreszcie okazję nieco zgłębić ten temat. Omówimy przede wszystkim **szczególną teorię względności**. Einstein stworzył jeszcze **ogólną teorię względności**, która uwzględnia oddziaływania grawitacyjne. Wspomnimy także o jej podstawach (s. 290–292).
Zanim jednak przejdziemy do szczególnej teorii względności, wyjaśnimy pojęcie **czasoprzestrzeni**. Jak sama nazwa wskazuje, oznacza ono coś, co obejmuje jednocześnie czas i przestrzeń. Pojęcie czasoprzestrzeni nie jest związane tylko z teorią względności i można używać go także w fizyce newtonowskiej. Do tego właśnie ograniczymy się w tej lekcji.

Od czasu i przestrzeni do czasoprzestrzeni

Prawem fizyki, w którym ważny jest kierunek upływu czasu, jest druga zasada termodynamiki.

W jaki sposób połączyć czas z przestrzenią? Wiemy przecież, że te pojęcia wiele różni – chociażby fakt, że w czasie poruszamy się tylko do przodu, a w przestrzeni możemy poruszać się w dowolną stronę, a także wracać wielokrotnie w to samo miejsce.

Zauważmy najpierw, że dla idącego człowieka kierunek pionowy jest wymiarem zupełnie innym niż kierunki poziome. Nikt z nas nie może przecież spacerować pionowo w górę. Nawet samolot może zmieniać swoją wysokość zaledwie w granicach kilku kilometrów.
Natomiast dla załogi statku kosmicznego w przestrzeni międzygwiezdnej wszystkie trzy kierunki przestrzenne są całkowicie równoprawne.

Nieco podobnie jest z przejściem od czasu i przestrzeni do czasoprzestrzeni. Co prawda czas zachowuje pewne odrębne własności, ale staje się nowym wymiarem, obok trzech wymiarów przestrzennych.
Mówimy, że czasoprzestrzeń jest czterowymiarowa: składa się z **trójwymiarowej przestrzeni** oraz z dodatkowego, czwartego wymiaru – **czasu**. Wyobrażenie sobie czasoprzestrzeni jest trudne. Gdy jednak zajmujemy się ruchem po linii prostej, czasoprzestrzeń ma tylko dwa wymiary: jeden czasowy i jeden przestrzenny. Można ją więc zilustrować na płaszczyźnie.

Od wykresów do czasoprzestrzeni

1. Na zdjęciu widzisz Giewont od strony północnej.



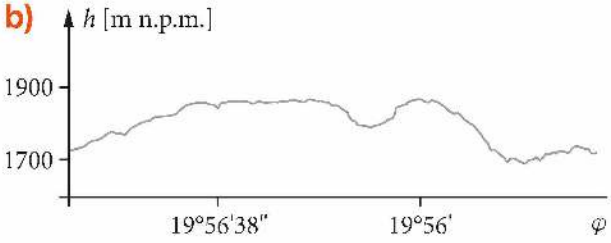
Poniżej zamieszczono zarys tej góry (rys. a). Można go traktować po prostu jako schematyczny rysunek. Jednak można też popatrzeć na niego inaczej: jako na wykres funkcji $h(\varphi)$, która długości geograficznej φ przyporządkowuje wysokość h n.p.m. Wystarczy dorysować układ współrzędnych (rys. b).

a)

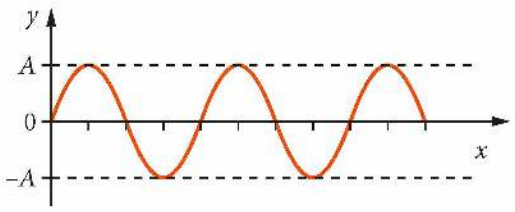


Podobnie było w przypadku wykresu zależności wychylenia od położenia $y(x)$ dla fali. Wykres przedstawiał jednocześnie, jak wygląda fala widziana z boku (rys. c).

b)



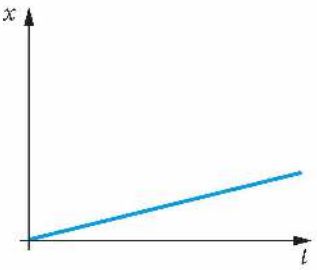
c)



2. Przypomnijmy sobie teraz wykres dla ruchu jednostajnego prostoliniowego pewnego ciała (rys. d).

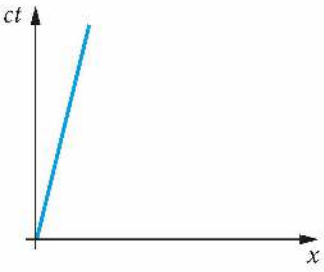
Także na ten wykres możemy popatrzeć w inny sposób: jako na rysunek w **czasoprzestrzeni**. Ciało porusza się po jednowymiarowej prostej, czasoprzestrzeń ma jeden wymiar przestrzenny (x) i jeden czasowy (t), więc taką ilustrację można po prostu narysować na płaszczyźnie.

d)



W teorii względności przyjęło się, aby oś czasu rysować w pionie, co oczywiście jest tylko sprawą umowy. Aby wszystkie kierunki w czasoprzestrzeni były równoprawne, na osi pionowej nie odkładamy czasu t, ale jego iloczyn z prędkością światła w próżni c, czyli ct (rys. e).

e)



Dzięki temu na obu osiach jest ta sama jednostka – metr – przy czym o jednostce na osi ct można myśleć jako o „metrach świetlnych", jeśli przyjmiemy, że metr świetlny to czas, w którym światło przebywa drogę 1 m, czyli ok. $\frac{1}{300\,000\,000}$ s.

Kiedy już uda nam się zrozumieć pojęcie czasoprzestrzeni, teoria względności okaże się wręcz bardziej elegancka od fizyki newtonowskiej.

Zdarzenie i trajektoria

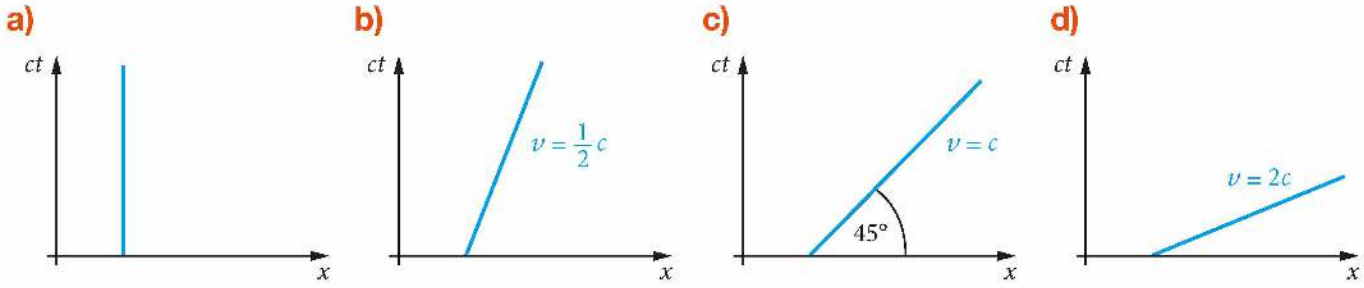
Umiemy już wyobrazić sobie czasoprzestrzeń dwuwymiarową (jeden wymiar przestrzenny i czas), więc dalej będziemy posługiwać się właśnie taką czasoprzestrzenią.

Punkt, a raczej „punktochwilę", w czasoprzestrzeni nazywamy **zdarzeniem**. Na rysunku odpowiada mu pewien punkt płaszczyzny.

Kiedy badamy ruch ciała, interesują nas jego położenia w różnych chwilach, czyli zdarzenia (x, ct) takie, że w chwili t ciało znalazło się w punkcie o współrzędnej x. Możemy powiedzieć: „zdarzyło się, że w chwili t ciało znalazło się w punkcie x". Takie punkty układają się w linię zwaną **trajektorią**, która obejmuje całą historię ruchu ciała – jego położenia w kolejnych chwilach.

Wykresem funkcji stałej jest zwykle pozioma prosta, ale ponieważ oś położenia jest ustawiona poziomo, a oś czasu pionowo, więc trajektorią ciała spoczywającego jest prosta pionowa.

Na rysunku 19.2a widzisz trajektorię spoczywającego ciała. Łatwo z niego odczytać, że położenie się nie zmienia. Z kolei dla ruchu jednostajnego różnym prędkościom odpowiada różne nachylenie wykresu (rys. 19.2b–d). Kiedy na obu osiach jest ta sama jednostka, trajektoria odpowiadająca prędkości światła ma nachylenie 45° (rys. 19.2c). Można narysować nawet trajektorię ciała poruszającego się szybciej od światła (rys. 19.2d), choć taki ruch nie jest możliwy.

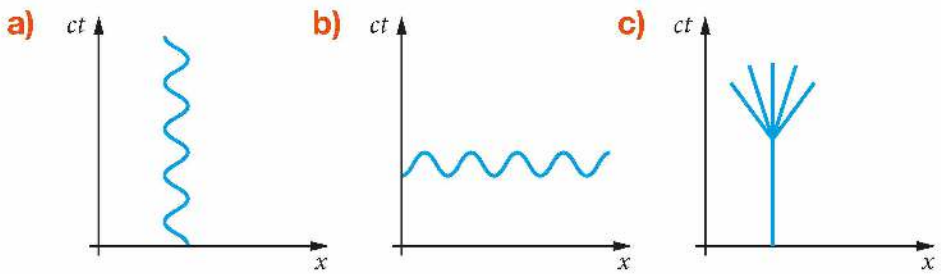


Rys. **19.2.** Trajektoria: a) ciała spoczywającego, b) ciała poruszającego się ruchem jednostajnym z prędkością 0,5c, c) fotonu (poruszającego się z prędkością światła), d) hipotetycznego ciała poruszającego się z prędkością 2c

Zauważ, że x oznacza współrzędną przestrzenną, a niekoniecznie oś poziomą, tak jak to jest w układzie współrzędnych xy. Może na przykład odpowiadać wysokości ciała nad ziemią.

Jeśli umiesz rysować wykresy ruchu prostoliniowego, to umiesz także rysować trajektorie. W przypadku mniejszej wyobraźni geometrycznej możesz obrócić zeszyt tak, aby oś czasu była ułożona poziomo.

Jednak nie każda linia narysowana w układzie (x, ct) jest trajektorią ruchu jakiegoś ciała (patrz rys. 19.3b). Ważne, aby każdej chwili czasu odpowiadało jakieś jedno (i tylko jedno) położenie.
Linia (trajektoria) może się rozdzielać wtedy, gdy ciało podzieli się na kilka mniejszych części (rys. 19.3c). Gdyby linie (trajektorie) schodziły się w jednym punkcie, oznaczałoby to złączenie kilku ciał.



Rys. **19.3.** Porównaj: a) trajektoria ciała poruszającego się ruchem harmonicznym, b) linia, która nie odpowiada trajektorii ruchu żadnego ciała (musiałoby ono zawracać w czasie!), c) trajektoria fajerwerku (puszczonego pionowo w górę, gdzie x jest osią poziomą) i jego fragmentów, rozpraszających się po wybuchu w różne strony

Czasoprzestrzeń się nie zmienia

Czasoprzestrzeń zawiera w sobie obrazy przestrzeni we wszystkich chwilach czasu. Tak więc jeśli w przestrzeni zachodzi jakaś zmiana, na przykład zmienia się położenie ciała, to ta zmiana jest zapisana w czasoprzestrzeni. Natomiast sama czasoprzestrzeń już się nie zmienia.
Podobnie jest z płytą DVD: na nagranym na nią filmie może się wydarzyć mnóstwo przygód, ale to nie znaczy, że zmienia się sama płyta. Ona zawiera w sobie opis wszystkich tych zmian, ale sama nie ulega zmianie.

Transformacja Galileusza

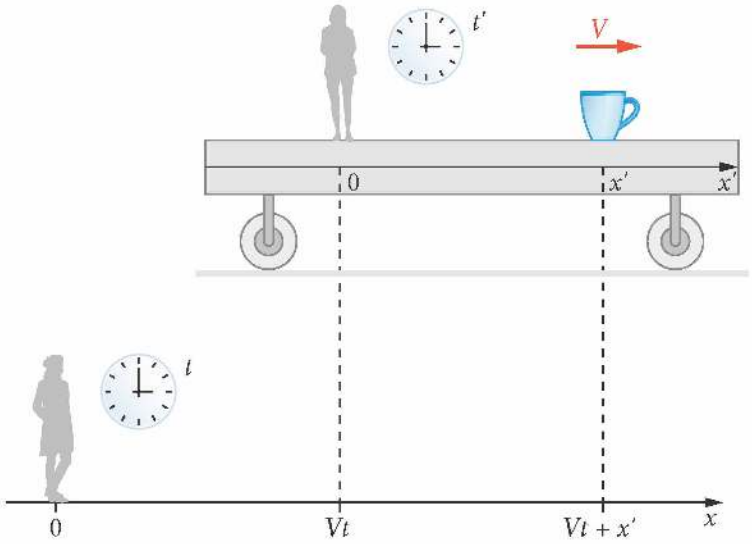
Nadal zajmujemy się tylko ruchem prostoliniowym.

Wyobraźmy sobie dwóch obserwatorów (rys. 19.4).

- Jeden z nich stoi na ziemi i odczytuje położenie ciał według narysowanej na ziemi osi x, a czas t według swojego zegara.
- Drugi jedzie na otwartym wagonie z prędkością V i odczytuje położenie ciał według osi x', jadącej razem z nim, a czas t' według swojego zegara.

Dla uproszczenia załóżmy, że gdy punkty zerowe obu osi się mijały, oba zegary wskazywały $t' = t = 0$.

Prędkość, z jaką porusza się układ odniesienia – u nas wagon – oznaczamy najczęściej dużą literą V, w odróżnieniu do prędkości ciała, którą oznaczamy małą literą v.



Rys. 19.4. Dwaj obserwatorzy: jeden stoi na ziemi, a drugi na wagonie poruszającym się z prędkością V

Jaka będzie sytuacja, gdy w układzie obserwatora spoczywającego względem ziemi upłynie czas t? Zgodnie z zasadami fizyki newtonowskiej oba zegary chodzą tak samo, a więc $t' = t$.
Położenie ciała (np. kubeczka) w obu układach będzie jednak inne. Jeśli w układzie poruszającym się względem ziemi przez cały czas wynosi ono x', to w układzie nieruchomym do tej wielkości trzeba dodać Vt, ponieważ o tyle zdążył się poruszyć wagon. Tak więc $x = Vt + x'$, czyli:

$$t' = t$$
$$x' = x - Vt$$

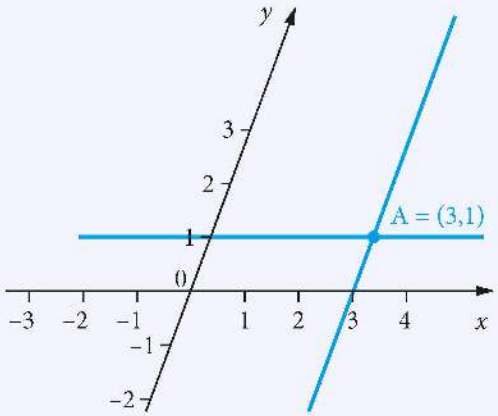
Galileusz bardzo by się tym zdziwił, ponieważ nie zapisywał praw fizyki za pomocą wzorów.

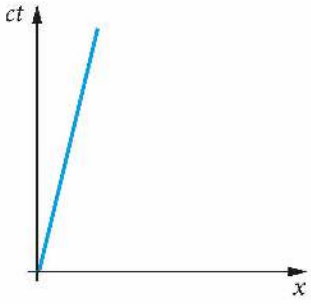
Te zasady przeliczania współrzędnych nazywamy **transformacją Galileusza.**

Dodatek matematyczny

Nieprostokątny układ współrzędnych

Na rysunku widzisz nieprostokątny układ współrzędnych. Jest podobny do dobrze ci znanego układu prostokątnego, tyle że osie nie są wzajemnie prostopadłe.
Aby odczytać współrzędną x danego punktu A, prowadzimy prostą **równoległą** do osi y – **nie jest** ona prostopadła do osi x. Podobnie, aby odczytać współrzędną y danego punktu, prowadzimy prostą równoległą do osi x, która nie jest prostopadła do osi y.

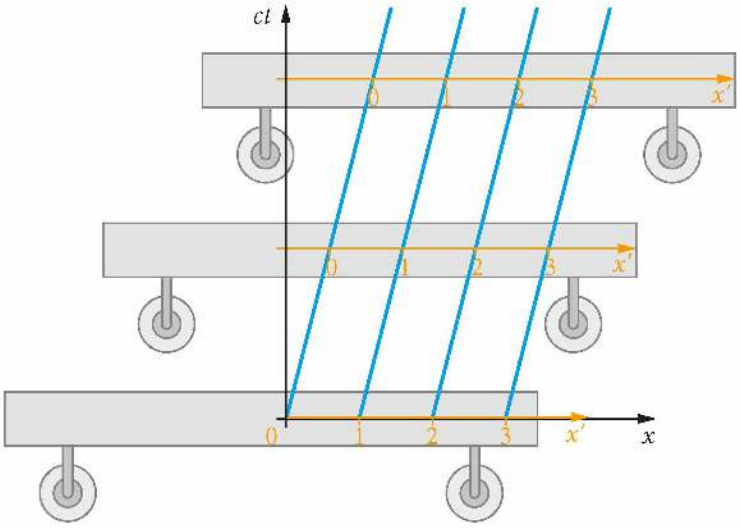




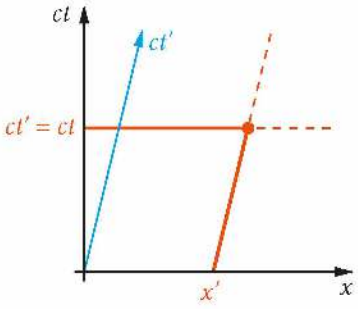
Rys. 19.5. Trajektoria punktu, który w chwili $t' = 0$ jest w położeniu $x' = 0$

Transformacja Galileusza w czasoprzestrzeni

Zastanówmy się, jak przedstawić transformację Galileusza w czasoprzestrzeni. Zacznijmy od trajektorii punktu $x' = x = 0$ dla $t' = t = 0$. Jest to wykres dla ruchu jednostajnego prostoliniowego z prędkością V zaczynający się w punkcie (0, 0) (rys. 19.5).
Trajektorie punktów $x' = 1$, $x' = 2$, $x' = 3$ itd. są prostymi równoległymi do trajektorii punktu $x' = 0$, ponieważ wszystkie te punkty poruszają się z jednakową prędkością (rys. 19.6).



Rys. 19.6. Na rysunku czasoprzestrzennym *wyżej* oznacza *później*. Im później, tym dalej na prawo przesunięty jest wózek



Rys. 19.7. Odczytywanie współrzędnych zdarzenia w układzie wózka (który porusza się z prędkością V)

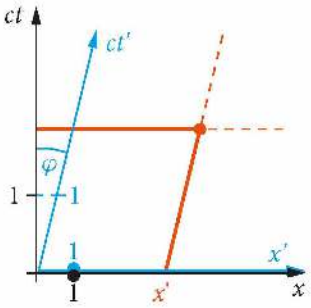
Jeśli mamy dane zdarzenie (x, ct) i chcemy odczytać jego współrzędne w układzie wózka, to powinniśmy od tego punktu narysować dwie proste (rys. 19.7):

- równoległą do osi x' (i jednocześnie do osi x) – ona pozwoli odczytać czas,
- równoległą do osi ct' (czyli też do trajektorii dowolnego punktu na wózku) – ona pozwoli odczytać położenie.

Takie postępowanie to nic innego jak odczytywanie współrzędnych w nieprostokątnym układzie współrzędnych (patrz dodatek matematyczny na poprzedniej stronie).

Transformacja Galileusza to zmiana układu współrzędnych w czasoprzestrzeni.

Ten drugi układ współrzędnych nie jest prostokątny. Jego oś x' pokrywa się z osią x. Natomiast oś ct' jest nachylona, a skala na niej jest zmieniona tak, aby ta sama liczba wypadała na tej samej wysokości co na osi ct (rys. 19.8).



Rys. 19.8. Układy współrzędnych $ct(x)$, $ct'(x')$

Jak mocno jest nachylona oś ct'? Opisuje ona ruch punktu $x' = 0$, więc jest to prosta o równaniu $x = Vt$, czyli $x = \frac{V}{c} \cdot ct$. Zatem kąt nachylenia to:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{V}{c}$$

gdzie V – prędkość, z jaką porusza się układ z osią x' względem układu z osią x.

Po tej lekcji powinieneś

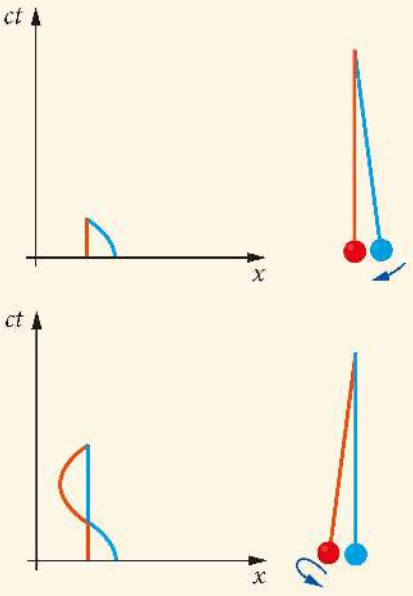
- rozumieć pojęcia: czasoprzestrzeń, zdarzenie, trajektoria, i stosować je w rozwiązywaniu zadań;
- rysować trajektorie ruchu ciał i analizować takie rysunki;
- stosować transformację Galileusza.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Rozważmy uproszczoną kołyskę Newtona, złożoną tylko z dwóch kulek. Naszkicuj w jednym czasoprzestrzennym układzie współrzędnych trajektorie obu kulek. Pomiń czas zderzeń.
Uwaga. Jeśli nie wiesz, czym jest kołyska Newtona (*Newton's cradle*), znajdź w internecie odpowiedni film.

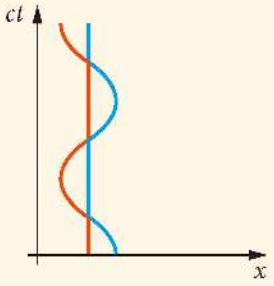


Rozwiązanie

Przeanalizujmy, co po kolei się dzieje. Załóżmy, że w chwili $t = 0$ lewa kulka spoczywa, a prawa jest maksymalnie wychylona. Następnie prawa kulka porusza się w stronę lewej z coraz większą prędkością. Zanim nastąpi zderzenie, ruch kulki jest w dobrym przybliżeniu harmoniczny, ponieważ jest ona wahadłem matematycznym.
Rysujemy więc fragment sinusoidy dla kulki prawej (niebieskiej), a pionową linię prostą dla kulki lewej (czerwonej).
Następnie dochodzi do zderzenia i teraz prawa kulka się zatrzymuje, a lewa zaczyna się poruszać jak wahadło, najpierw w lewo, a potem w prawo.

Następnie znów dochodzi do zderzenia, lewa kulka się zatrzymuje, a niebieska wykonuje pół cyklu ruchu harmonicznego itd.

Odpowiedź: Trajektorie dla kołyski Newtona złożonej z dwóch kulek są narysowane na rysunku obok.



1. Narysuj trajektorię ciała:

a) spoczywającego w punkcie $x = 4$,

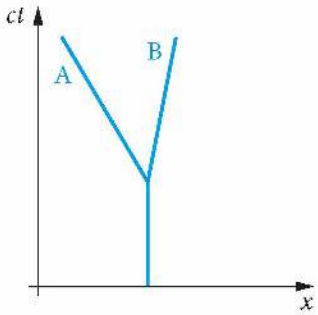
b) poruszającego się z punktu $x = 5$ do $x = 10$ ruchem jednostajnym z prędkością $0{,}25c$,

c) fotonu wysłanego ze zdarzenia $x = 4$, $ct = 2$,

d) tachionu poruszającego się od zdarzenia $x = 0$, $ct = 2$ z prędkością $-2c$.

Uwaga. Tachion to nazwa hipotetycznej cząstki poruszającej się szybciej od światła. Tachiony najprawdopodobniej nie istnieją, jednak to nie przeszkadza w wykonaniu zadania.

2. Rysunek przedstawia trajektorię armaty spoczywającej przed wystrzałem, tej samej armaty po wystrzale oraz wystrzelonego pocisku. Która z gałęzi: A czy B, przedstawia ruch armaty, a która – pocisku? Uzasadnij swoją odpowiedź.



3. Metalowa kula toczyła się po ziemi z prędkością $3\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$, aż uderzyła w drugą, jednakową kulę. W tym momencie pierwsza kula się zatrzymała, a druga – potoczyła dalej. Narysuj w jednym czasoprzestrzennym układzie współrzędnych trajektorie obu kul.

4. Pewien swobodny (nieoddziałujący z innymi ciałami) atom początkowo spoczywał. Następnie wyemitował foton i zaczął się poruszać. Narysuj trajektorię atomu przed emisją i po niej oraz trajektorię fotonu.

***5.** Dwaj obserwatorzy, Leszek i Mieszko, stoją nieruchomo na ziemi. Każdy z nich ma swoją oś współrzędnych. Osie są równoległe i skierowane w tę samą stronę, ale punkt $x = 0$ na osi Leszka pokrywa się z punktem $x' = 5$ m na osi Mieszka. Obaj są wyposażeni w zegary, ale zegar Mieszka spóźnia się o 10 s względem zegara Leszka.

Zapisz wzory pozwalające przeliczać współrzędne (x, t) Leszka na współrzędne (x', t') Mieszka według fizyki newtonowskiej i zilustruj tę transformację jako przejście do innego układu współrzędnych w czasoprzestrzeni.

19.2. Czasoprzestrzeń w szczególnej teorii względności

Przypomnij sobie

- Wszystkie fale elektromagnetyczne, w tym światło, rozchodzą się w próżni ze stałą prędkością $c \approx 300\,000\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$.
- Prędkość światła można obliczyć na podstawie stałych opisujących oddziaływania elektryczne i magnetyczne: $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$.
- Prędkość ciała jest względna, a więc różna w różnych układach odniesienia.
- W każdym układzie inercjalnym obowiązują takie same prawa mechaniki. W układzie nieinercjalnym (np. obracającym się albo przyspieszającym) należy dodatkowo uwzględnić siły bezwładności.

Stałość prędkości światła

Skoro oswoiłeś się już z pojęciem czasoprzestrzeni, możemy zająć się teorią względności. Albert Einstein stworzył ją, aby pozbyć się niezgodności między prawami mechaniki a prawami elektromagnetyzmu.

Przypomnijmy, że teorię opisującą elektromagnetyzm sformułował James Clerk Maxwell. Pozwoliła ona przewidzieć istnienie nieznanych wcześniej fal elektromagnetycznych i obliczyć ich prędkość. Ponieważ okazało się, że jest ona równa prędkości światła, Maxwell trafnie zauważył, że światło także jest falą elektromagnetyczną.

Prędkość fal elektromagnetycznych, s. 8

Gdy mówiliśmy o tym wszystkim, pominęliśmy ważne pytanie: rozpatrujemy prędkość światła – ale w jakim układzie odniesienia?

Wyobraźmy sobie samochód (czy też w czasach Maxwella – parowóz) jadący z prędkością $20\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ z zapalonym przednim reflektorem. Czy prędkość światła z reflektora obliczona na podstawie równań Maxwella to prędkość względem pojazdu czy względem ziemi? Ta druga wielkość powinna być większa o $20\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Tymczasem z równań Maxwella wynikało, że prędkość światła ma zawsze taką samą wartość (rys. 19.9).

Dodawanie wektorów, cz. I s. 43



Rys. **19.9.** Dwa mierniki prędkości światła, jeden na wagonie pchanym przez lokomotywę, a drugi na ziemi, wskazują dokładnie tę samą wartość, mimo że są względem siebie w ruchu

Hipoteza eteru światłonośnego

Początkowo fizycy uważali, że każda fala musi rozchodzić się w jakimś ośrodku, skoro więc światło jest falą, to także potrzebuje ośrodka. Prędkość światła – podobnie jak prędkość dźwięku – jest więc jej prędkością w układzie odniesienia związanym z ośrodkiem.
Oczywiście wiedziano, że światło biegnie także przez próżnię, w ten sposób dociera do nas przecież światło słoneczne. Wyjaśniano jednak, że nawet to, co wydaje nam się próżnią, jest w rzeczywistości wypełnione tajemniczą substancją, zwaną eterem światłonośnym.

Nazwa *eter* nie ma nic wspólnego ze związkiem chemicznym o tej samej nazwie.

Gdy jednak próbowano zbadać ruch Ziemi względem eteru, okazało się, że eter najwyraźniej nie tylko przemieszcza się w kosmosie razem z naszą planetą, ale także razem z nią obraca. Tłumaczono to porywaniem warstwy eteru przez powierzchnię Ziemi, ale takie wyjaśnienia sprawiały wrażenie wymyślanych na siłę.

Einstein: prędkość światła jest stała

Coraz bardziej pokrętna teoria eteru zupełnie nie odpowiadała Albertowi Einsteinowi. Przypomnijmy, że od dawna już była znana:

> Zasada względności Galileusza: Zjawiska mechaniczne zachodzą tak samo we wszystkich układach inercjalnych.

Einstein uważał, że powinna ona obowiązywać nie tylko w mechanice, lecz także w innych dziedzinach fizyki. Uogólnił ją więc do postaci nazwanej dziś jego nazwiskiem:

> Zasada względności Einsteina: Wszystkie zjawiska fizyczne zachodzą tak samo we wszystkich układach inercjalnych.

Pomijamy tu niewielką różnicę między prędkością światła w próżni a jego prędkością w powietrzu.

Oznaczałoby to jednak, że prędkość światła obliczona na podstawie praw elektromagnetyzmu nie zależy od układu odniesienia. Innymi słowy, światło wysyłane przez reflektor na czole parowozu porusza się względem maszynisty z taką samą prędkością jak względem dróżnika stojącego przy torach (rys. 19.9 na poprzedniej stronie).
To założenie Einsteina okazało się słuszne.

> Prędkość światła w próżni c jest jednakowa we wszystkich układach odniesienia.

Jak jednak pogodzić stałość prędkości światła ze wzorami na składanie prędkości? Otóż w ich wyprowadzeniu w pierwszej części podręcznika przyjęliśmy dwa założenia, które wydawały nam się oczywiste, podobnie

jak wydawały się one oczywiste wszystkim fizykom aż do początku XX w.:

- czas płynie jednakowo dla wszystkich obserwatorów,
- długości mierzone przez wszystkich obserwatorów są jednakowe.

Jeśli więc na zegarku maszynisty minęła minuta, to tyle samo czasu upłynęło na zegarku dróżnika. Jeśli według pomiarów maszynisty jego lokomotywa ma 20 m długości, taka sama jest jej długość z punktu widzenia dróżnika.
Te założenia wydają się zgodne ze zdrowym rozsądkiem, ale są nie do pogodzenia z zasadą względności Einsteina. Jego teoria w zupełnie inny sposób opisuje czas i przestrzeń. I choć jest zaskakująca, została wielokrotnie potwierdzona w precyzyjnych doświadczeniach.
Dlaczego więc na co dzień nie obserwujemy efektów wynikających z teorii względności? Założenie o jednakowym upływie czasu i jednakowych odległościach dla różnych obserwatorów jest spełnione w przybliżeniu. Przy małych prędkościach – nie tylko w przypadku pociągów, ale nawet rakiet kosmicznych – jest ono zupełnie wystarczające. Jednak gdy zbliżamy się do prędkości światła, zaczyna zawodzić.

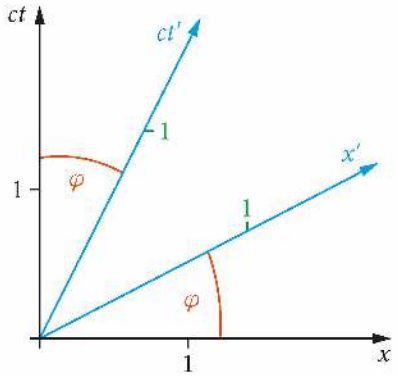
W fizyce klasycznej położenie ciała zależy od układu odniesienia zgodnie z transformacją Galileusza, ale długość, czyli różnica współrzędnych początku i końca, już nie:

$$x_2' - x_1' = x_2 - Vt - (x_1 - Vt) = x_2 - Vt - x_1 + Vt = x_2 - x_1$$

Transformacja Lorentza

Przypomnijmy, że transformację Galileusza przedstawialiśmy jako zmianę układu współrzędnych.
Można jednak zaproponować inną zmianę, bardziej jednolicie traktującą czas i przestrzeń. Tym razem obie osie obrócimy o ten sam kąt, którego tangens tak jak poprzednio wynosi $\frac{V}{c}$ (rys. 19.10).

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{V}{c}$$



Rys. 19.10. Transformacja Lorentza w dwuwymiarowej czasoprzestrzeni (jeden wymiar przestrzenny i jeden wymiar czasowy) dla $V = 0{,}5c$

Najprościej byłoby teraz nie zmieniać skali na osiach, ale okazuje się, że aby poprawnie opisać zjawiska fizyczne, musimy to zrobić. Jednak w odróżnieniu od transformacji Galileusza, w której zmiana dotyczyła tylko jednej z osi, w naszym przypadku zmieniamy jednostkę na obu osiach w jednakowy sposób.

Otóż punkt 1 na osi ct' znajdzie się na prawo od punktu:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$$

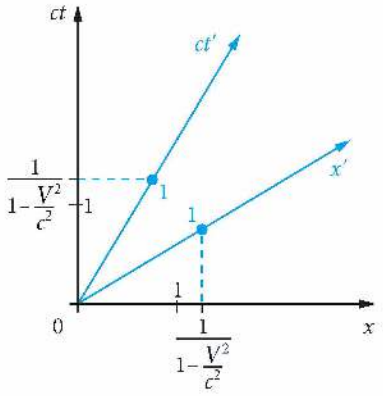
na osi ct, a punkt 1 na osi x' znajdzie się w górę od punktu:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$$

na osi x (rys. 19.11). Zauważ, że liczba pod pierwiastkiem jest mniejsza od 1, a więc pierwiastek także jest mniejszy od 1, a całe wyrażenie:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$$

większe do 1. Zatem jednostka na osiach układu primowanego jest wydłużona.

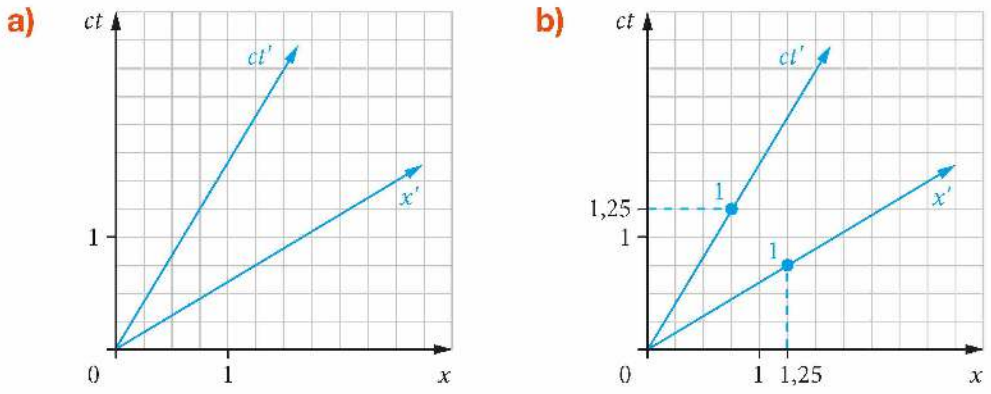


Rys. **19.11.** Zmiana skali na osiach układu poruszającego się z prędkością V

Otrzymaliśmy **transformację Lorentza**, opisaną w szczególnej teorii względności. Okazuje się, że to właśnie transformacja Lorentza poprawnie opisuje rzeczywistość. Transformacja Galileusza jest tylko jej przybliżeniem dla niewielkich prędkości.

Rysowanie układu współrzędnych z właściwą jednostką pokażemy na przykładzie układu poruszającego się z prędkością $V = 0{,}6c$. Dla tej prędkości (rys. 19.12):

$$\frac{1}{\sqrt{1-0{,}6^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}36}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}64}} = \frac{1}{0{,}8} = 1{,}25$$



Rys. **19.12.** Wyznaczanie układu współrzędnych odpowiadającego transformacji Lorenza dla $V = 0{,}6c$: a) kierunek osi, b) jednostka

Zauważ, że aby narysować oś x' pod kątem, którego tangens wynosi 0,6, nie musimy korzystać z tablic tangensów ani z kątomierza, wystarczy odliczyć kratki (np. pięć w poziomie i trzy w pionie). Analogicznie postępujemy z osią ct' (rys. 19.12a).

Transformacja Lorentza zapisana wzorami

W tej książce będziemy korzystać tylko z geometrycznego opisu transformacji Lorentza. Oczywiście można ją podać także za pomocą wzorów i z takiego właśnie opisu korzystamy przy rozwiązywaniu bardziej złożonych problemów. Wzory te mają postać:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \qquad t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Porównajmy je z transformacją Galileusza:

$$x' = x - Vt \qquad t' = t$$

We wzorze na x' w transformacji Lorentza pojawia się znane z transformacji Galileusza wyrażenie $x - Vt$, ale jest ono podzielone przez $\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$. Zauważ, że dla prędkości znacznie mniejszych od prędkości światła ułamek $\frac{V}{c}$ oznacza niewielką liczbę, a jego kwadrat jest jeszcze mniejszy. Dlatego mamy $\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \approx 1$, a wtedy zamiast transformacji Lorentza możemy stosować transformację Galileusza.

W tabeli 19.1 podaliśmy wartości odwrotności pierwiastka dla różnych wartości prędkości układu.
Taki sam mianownik pojawia się we wzorze na t', gdzie jednak ważniejsza jest inna różnica. W transformacji Galileusza na wynik pomiaru położenia ma wpływ to, kiedy go wykonujemy, ale nie odwrotnie – miejsce wykonania pomiaru czasu nie ma wpływu na to, co pokaże zegar. W transformacji Lorentza wpływ zachodzi w obie strony. Nie obserwujemy tego na co dzień, ponieważ wielkość c^2 jest zbyt duża – z tego samego powodu nie obserwujemy m.in. zmiany masy podgrzanego ciała.

Symetria wymiaru czasowego i przestrzennego będzie widoczna jeszcze lepiej, gdy zapiszemy transformację Lorentza tak, aby występowała w niej współrzędna ct zamiast czasu t:

$$x' = \frac{x - \frac{V}{c}(ct)}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \qquad (ct') = \frac{(ct) - \frac{V}{c}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Tabela 19.1

V	$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$
11 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$*	1,000000001
1000 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$	1,0000056
30 000 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$	1,005
0,5c	1,15
0,6c	1,25
0,7c	1,4
0,8c	1,67
0,9c	2,3
0,99c	7,1
0,999c	22,4

* druga prędkość kosmiczna dla Ziemi

Po tej lekcji powinieneś

- wyjaśniać, dlaczego transformacji Galileusza nie można pogodzić z zasadą względności Einsteina;
- przedstawiać graficznie transformację Lorentza i wykorzystywać ją do rozwiązywania zadań.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Statek kosmiczny leci z prędkością $V = 0{,}5c$ (czyli z prędkością równą połowie prędkości światła) względem Ziemi. Ze statku w kierunku jego ruchu wystrzelono rakietę, której prędkość względem statku wynosiła $v' = 0{,}75c$. Czy względem Ziemi rakieta poruszała się z prędkością nadświetlną?

Rozwiązanie

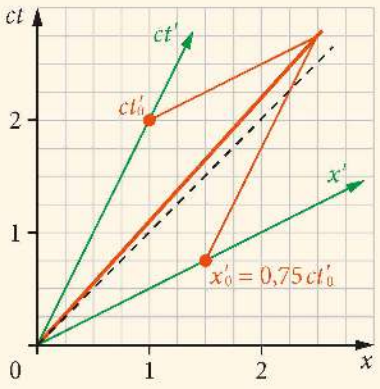
Zwykłe dodawanie prędkości dałoby wynik $1{,}25c$, a więc prędkość nadświetlną. Jednak przy tak dużych prędkościach musimy stosować teorię względności.

Niech zdarzenie „statek wystrzelił rakietę" będzie początkiem obu układów współrzędnych – w układzie odniesienia Ziemi (nieprimowanym) i w układzie odniesienia statku kosmicznego (primowanym). Układ współrzędnych skonstruowaliśmy już na rysunku 19.12 na s. 275, tutaj jednak nie musimy nawet korzystać z informacji o jednostkach na osiach primowanych. Ważne tylko, że są one jednakowe.

Chcemy narysować trajektorię rakiety. Jest to linia prosta (rakieta ma stałą prędkość) przechodząca przez początek układu współrzędnych. Aby ją narysować, znajdźmy jeszcze jeden punkt. Wybierzmy dowolny punkt ct'_0 na osi ct'. Odpowiada mu punkt:

$$x'_0 = v't'_0 = \frac{v'}{c} \cdot ct'_0 = 0{,}75ct'_0$$

Zaznaczamy więc dowolny punkt ct'_0 na osi ct' oraz punkt x'_0 na osi x' – o $\frac{1}{4}$ bliżej od początku układu współrzędnych. Następnie konstruujemy równoległobok.

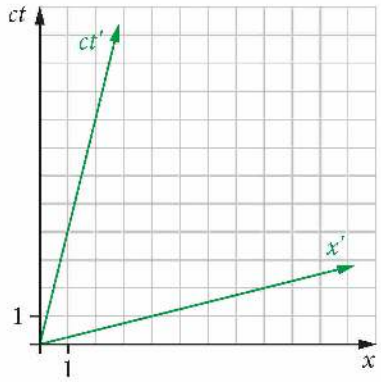


Widzimy, że trajektoria rakiety (czerwona prosta na rysunku) znajduje się ponad linią przerywaną, odpowiadającą prędkości światła, więc także względem Ziemi rakieta porusza się wolniej od światła. Z rysunku możemy odczytać jej przybliżoną prędkość względem Ziemi: dla $ct = 2$ $(t = \frac{2}{c})$ mamy $x \approx 1{,}8$, czyli z $x = vt$ otrzymujemy $1{,}8 = v \cdot \frac{2}{c}$, a więc prędkość:

$$v \approx 0{,}9c < c$$

Odpowiedź: Rakieta względem Ziemi porusza się nie z prędkością nadświetlną, ale z prędkością ok. $0{,}9c$.

1. W układzie współrzędnych zilustrowano transformację Lorentza. Odczytaj z wykresu względną prędkość układów odniesienia.

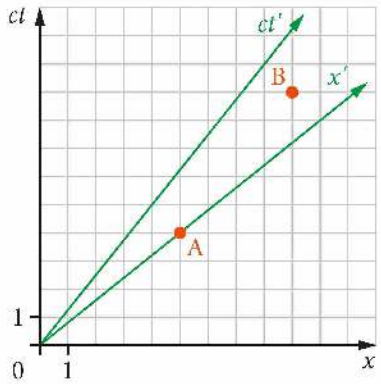


2. W układzie współrzędnych zilustrowano transformację Lorentza.

a) Odczytaj z wykresu względną prędkość układów odniesienia.

b) Odczytaj z wykresu współrzędne zdarzeń A i B w obu układach odniesienia.

c) Oblicz w każdym z układów odniesienia prędkość potrzebną, aby ruchem jednostajnym przemieścić się z A do B.



3. Statek kosmiczny mija Ziemię z prędkością $V = \frac{1}{3}c$ i kieruje się w stronę Księżyca.

a) Zilustruj transformację Lorentza z układu Ziemi do układu statku. Za wspólny początek układu współrzędnych przyjmij zdarzenie „statek minął Ziemię".

b) Niech A będzie zdarzeniem „statek minął Księżyc". Przyjmij w przybliżeniu, że Księżyc znajduje się 300 000 km od Ziemi (faktycznie jest to kilkadziesiąt tysięcy km więcej). Zaznacz zdarzenie A na swojej ilustracji i zapisz jego współrzędne w układzie Ziemi.

c) Na podstawie rysunku wyznacz współrzędne zdarzenia A w układzie statku.

4. Oblicz, jaką wartość przyjmuje wyrażenie

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$$

dla:

a) $v = 344 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (prędkość dźwięku w powietrzu),

b) $v = 8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ (pierwsza prędkość kosmiczna),

c) $v = 0{,}8c$.

Wskazówka. Skorzystaj z kalkulatora naukowego w komputerze, zwykły kalkulator nie ma dostatecznej liczby cyfr na wyświetlaczu.

19.3. Względność równoczesności

Przypomnij sobie

- Prędkość światła w próżni c jest maksymalną prędkością, z jaką można przesyłać materię lub informację.
- Prędkość c jest jednakowa w każdym układzie odniesienia.
- W różnych inercjalnych układach odniesienia obowiązują te same prawa fizyki, ale różne są wyniki pomiarów położenia i czasu.
- Do przeliczania współrzędnych zdarzeń czasowych i przestrzennych służy transformacja Lorentza.



Rys. 19.13. Gdy korzystamy z odbiornika GPS, wykorzystujemy teorię względności

GPS działa dzięki pomiarowi czasu przelotu fal radiowych z satelity do odbiornika. Dokładność 1 m uzyskujemy, mierząc czas z dokładnością do $\frac{1}{300\,000\,000}$ s.

W zasadzie cała szczególna teoria względności to **wnioski z transformacji Lorentza**. Często wydają się one sprzeczne ze zdrowym rozsądkiem, ale tylko dlatego, że nasze doświadczenie jest związane z obserwacją zjawisk, w których ciała poruszają się znacznie wolniej od światła i gdzie teoria newtonowska się sprawdza.

Teoria względności zgadza się jednak doskonale z wynikami eksperymentów. Mowa nie tylko o doświadczeniach wykonywanych przez fizyków.
Miliony ludzi codziennie testują teorię względności, kiedy korzystają z nawigacji GPS. Równania, które posłużyły do wyznaczania współrzędnych położenia dla tego systemu, są oparte na tej teorii. Gdyby okazała się błędna, nawigacja nie byłaby w stanie poprawnie określać współrzędnych, ponieważ poprawki wynikające z teorii względności mają duże znaczenie – z im większą dokładnością chcemy określić położenie, tym większe znaczenie mają te poprawki.

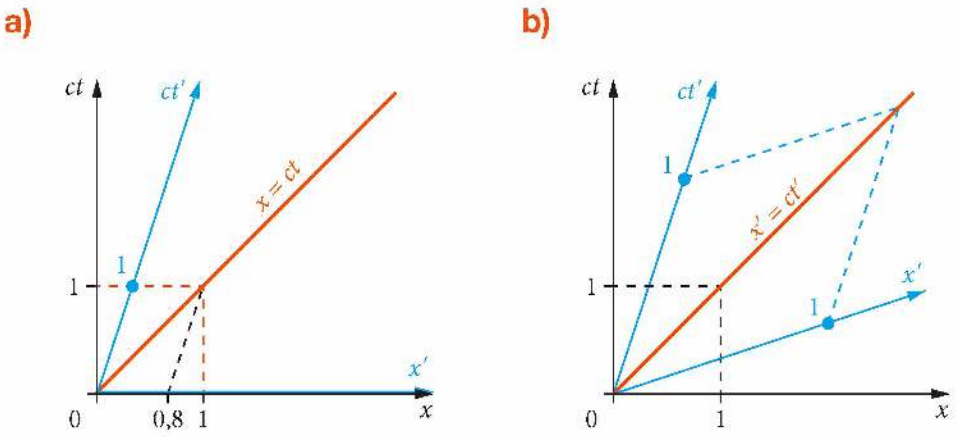
Uwaga. Jako przymiotnika od nazwy *teoria względności* używamy terminu *relatywistyczny*, ponieważ słowo „względnościowy" nie istnieje, a słowo *względny* oznacza co innego.
Tak więc wzór relatywistyczny to wzór zgodny z teorią względności, a prędkość relatywistyczna to prędkość zbliżona do prędkości światła (a najwyżej kilka razy mniejsza). Słowo to nie ma żadnego związku z relatywizmem w sensie filozoficznym ani tym bardziej moralnym.

Transformacje Galileusza i Lorentza

Punktem wyjścia dla Einsteina była stałość prędkości światła. Sprawdźmy więc, jak to wygląda w przypadku transformacji Galileusza i transformacji Lorentza.

Transformacja Galileusza

Na rysunku 19.14a poniżej widzimy zaznaczony czerwoną linią bieg promienia światła poruszającego się z prędkością c w układzie (x, ct). Równanie tej prostej to $x = ct$, więc jest ona dwusieczną kąta między osiami. Układ primowany (oznaczany symbolami x' i ct') to układ wagonika, który porusza się z prędkością $V = 0{,}2c$.
W układzie (x', ct') jedna z osi jest nachylona, a czerwona prosta nie jest już dwusieczną kąta między osiami. Względem wagonika światło porusza się nie z prędkością c, ale zaledwie $0{,}8c$. Nic dziwnego, skoro mówimy o fizyce newtonowskiej, gdzie obowiązuje składanie prędkości.



Rys. **19.14.** Bieg promienia światła (czerwony): a) transformacja Galileusza, b) transformacja Lorentza

Transformacja Lorentza

Tym razem obie osie układu (x', ct') są nachylone do osi układu (x, ct) pod takim samym kątem (rys. 19.14b).
Tutaj w układzie ruchomym (x', ct') trajektoria promienia światła także jest dwusieczną kąta między osiami, a jej równanie to $x' = ct'$. Zatem również w układzie ruchomym światło porusza się z prędkością c, tak jak pokazują doświadczenia.

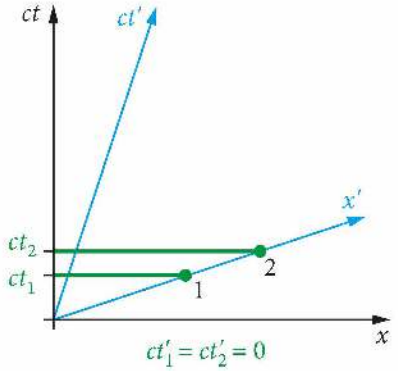
Względność równoczesności

Już w fizyce newtonowskiej mieliśmy do czynienia ze względnością równości położenia. Na przykład w pewnej chwili w układzie odniesienia pociągu pasażer siedzący w fotelu znajduje się w tym samym miejscu co minutę wcześniej, natomiast w układzie odniesienia ziemi – w ciągu tej minuty przemieścił się (razem z pociągiem) o kilometr.
W teorii Einsteina także mamy względność równości położenia. Ponieważ czas i przestrzeń są do siebie podobne, możemy się spodziewać, że równoczesność także jest względna. I tak rzeczywiście jest.

> Równoczesność zdarzeń zależy od układu odniesienia.

Spójrz na rysunek transformacji Lorentza (rys. 19.15). Wszystkie punkty położone na osi x' mają współrzędną $t' = 0$, czyli są zdarzeniami równoczesnymi. Natomiast w układzie spoczywającym mają różną współrzędną czasową t.

Zakładamy, że układ primowany (x', ct') się porusza, a układ nieprimowany spoczywa. Oczywiście z punktu widzenia obserwatora w układzie primowanym jest na odwrót!

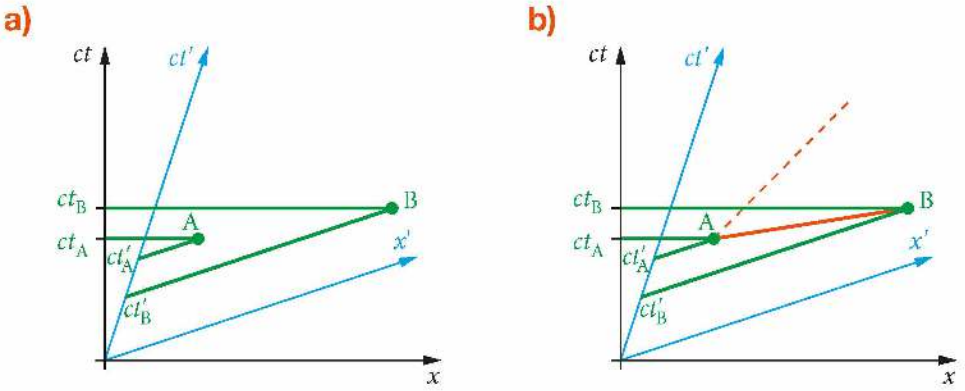


Rys. **19.15.** Zdarzenia oznaczone zielonymi kropkami są równoczesne w układzie primowanym, ale nie są równoczesne w układzie nieprimowanym

Względność kolejności czasowej

Jeśli równoczesność jest względna, to czy jest możliwa jeszcze dziwniejsza sytuacja, w której odwrócona zostaje kolejność zdarzeń? Okazuje się, że nietrudno znaleźć takie zdarzenia (rys. 19.16a).

Kolejność czasowa zdarzeń może zależeć od układu odniesienia.



Rys. **19.16.** a) w układzie nieprimowanym zdarzenie A następuje przed B, a w układzie primowanym – odwrotnie, b) te same zdarzenia i łącząca je trajektoria (czerwona) oraz trajektoria światła ze zdarzenia A (czerwona przerywana)

Względność kolejności czasowej jest niepokojąca. Wyobraźmy sobie, że zdarzenie A to urodzenie pewnej osoby, a B to jej śmierć. W pewnym poruszającym się inercjalnym układzie odniesienia (primowanym) stwierdzimy, że ten człowiek najpierw umarł, a dopiero potem się urodził! A przecież wszystkie prawa przyrody są takie same we wszystkich układach inercjalnych. W takim razie również w naszym układzie odniesienia powinniśmy obserwować ludzi, którzy umierają, zanim się urodzili, a wiemy, że to się nie zdarza.

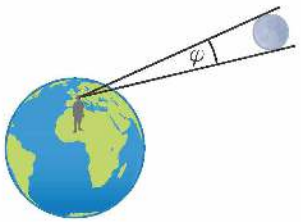
Aby rozwiązać ten paradoks, połączmy zdarzenia A i B prostą trajektorią (czerwony odcinek na rys. 19.16b na poprzedniej stronie). Widzimy teraz, że mówimy o osobie, która z miejsca urodzenia do miejsca śmierci podróżowała z prędkością nadświetlną.
Innymi słowy, aby kolejność czasowa w układzie primowanym była inna niż w nieprimowanym, prosta AB musi być nachylona do osi x pod kątem mniejszym od 45°.

> Kolejność czasowa zdarzeń może zależeć od układu odniesienia, ale tylko wtedy, gdy są one w przestrzeni na tyle daleko, że dotarcie z jednego do drugiego wymagałoby przekroczenia prędkości światła.

To właśnie jest powód, dla którego uważamy, że zgodnie z teorią względności nie można przesyłać informacji ani materii szybciej od światła.

Nadświetlny ruch plamki

Ostatnie stwierdzenie często wypowiadane jest krócej: „nic nie może poruszać się szybciej od światła". Jednak „nic" to określenie zbyt mocne. Wyobraź sobie, że kierujemy mocny laser w stronę Księżyca. Tak zresztą kiedyś faktycznie zrobiono, aby dokładnie wyznaczyć jego odległość od Ziemi (patrz ciekawostka poniżej).
Bez problemu taki laser możemy wprawić w ruch obrotowy z częstotliwością 1 obrotu na sekundę. Wówczas jednak plamka światła na Księżycu przebiegnie pół jego obwodu, czyli ponad 5400 km, w czasie ok. $\frac{1}{720}$ sekundy. To oznacza ruch z prędkością nadświetlną (patrz zad. 2. s. 282). Jaki popełniliśmy błąd? Otóż żaden.
Plamka światła na Księżycu naprawdę może poruszać się z prędkością nadświetlną. Nie stanowi to jednak problemu, ponieważ ani nie jest materialnym ciałem, ani nie przenosi informacji między różnymi punktami Księżyca.
Czy w takim razie istnieje układ odniesienia, w którym plamka porusza się w przeciwną stronę? Owszem, istnieje, ale nie prowadzi to do żadnych paradoksów.



$\varphi \approx 0{,}5° = \frac{1}{720}$ kąta pełnego

Rys. 19.17. Rozmiar kątowy Księżyca widzianego z Ziemi

A to ciekawe

Pierwsi ludzie na Księżycu, Neil Armstrong i Buzz Aldrin, pozostawili tam m.in. retroreflektor, czyli duże światełko odblaskowe. Kolejne podobne przyrządy pozostawiali też uczestnicy następnych misji księżycowych.
Dzięki bardzo dokładnemu pomiarowi czasu przelotu impulsu laserowego z Ziemi na Księżyc i z powrotem można precyzyjnie mierzyć odległość do naszego naturalnego satelity. Choć dałoby się w tym celu wykorzystywać odbicie od naturalnej powierzchni Księżyca, zamontowane tam retroreflektory pozwalają na dokładniejsze pomiary. Na zdjęciu: Buzz Aldrin przed lotem na Księżyc ćwiczy wyjmowanie przyrządu z lądownika.



Po tej lekcji powinieneś

- wyjaśniać na podstawie diagramu czasoprzestrzennego względność równoczesności zdarzeń;
- wskazywać na diagramie czasoprzestrzennym przykłady zdarzeń, których kolejność czasowa zależy od układu odniesienia;
- wyjaśniać, dlaczego istnienie takich zdarzeń nie prowadzi do paradoksów.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

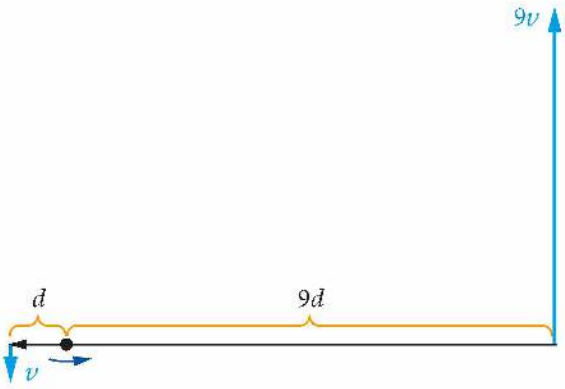
1. Na rysunku przedstawiającym transformację Lorentza wskaż przykładowe dwa zdarzenia równoczesne w układzie nieprimowanym, które nie są równoczesne w układzie primowanym.

2. Oblicz średnią prędkość plamki przesuwającej się po Księżycu, opisanej na s. 281. Porównaj swój wynik z prędkością światła.

3. Aby lepiej zrozumieć, co to znaczy „prędkość przekazywania informacji", obejrzyj film *Does a Falling Slinky Defy Gravity?* na kanale „Veritasium" (adres na s. 309 i pod kodem QR).

Znajdź błąd w następującym rozumowaniu:

„Wyobraźmy sobie sztywny pręt, który może się obracać wokół prostopadłej do niego osi. Oś jest zamocowana w $\frac{1}{10}$ długości pręta. Gdy poruszymy jego krótszym końcem, dłuższy zacznie się poruszać 9 razy szybciej. Poruszmy więc krótszym końcem z prędkością $0{,}2c$. Wówczas dłuższy koniec będzie się poruszał z prędkością $1{,}8c$, a więc szybciej od światła. A przecież jest on ciałem materialnym. Możemy też do niego przymocować jakieś inne ciało, które w ten sposób wprowadzimy w ruch z prędkością nadświetlną".



19.4. Więcej o teorii względności

Przypomnij sobie

- W różnych inercjalnych układach odniesienia obowiązują te same prawa fizyki, ale wyniki pomiarów położenia i czasu są różne.
- Do przeliczania czasowych i przestrzennych współrzędnych zdarzeń służy transformacja Lorentza.

Dylatacja czasu

Zajmiemy się teraz nieco dokładniej upływem czasu w różnych układach odniesienia. Wyobraź sobie relatywistyczny pociąg z zegarem umieszczonym na lokomotywie (w punkcie $x' = 0$). Pojazd przejeżdża przez stację, na której końcach także ustawiono zegary. Przy każdym z nich stoi kolejarz, który w momencie przejazdu pociągu zapisze wskazania obu zegarów: na peronie i na lokomotywie.

Taką sytuację dla $V = \frac{1}{2}c$ i peronu długości 1 sekundy świetlnej (czyli 300 000 km) przedstawia rysunek 19.18. Zdarzenia A i B to mijanie przez lokomotywę zegarów na końcach peronu. Dla prędkości $V = \frac{1}{2}c$ mamy:

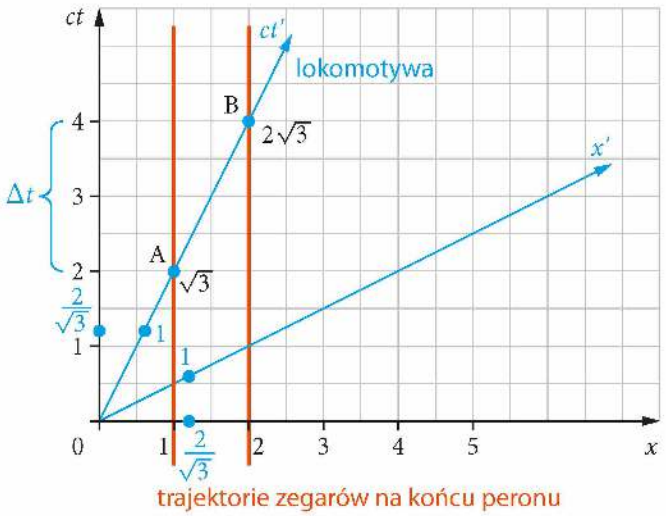
$$\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{1}{2}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{1}{4}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{3}{4}}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1{,}15$$

To pozwala nam zaznaczyć jednostkę na osiach układu primowanego. Potrzebne nam będą także współrzędne ct'_A punktu A oraz ct'_B punktu B. Możemy obliczyć je z proporcji:

$$\frac{ct'_A}{ct_A} = \frac{1}{\frac{2}{\sqrt{3}}}$$

gdzie $ct_A = 2$ jest współrzędną czasową punktu A w układzie nieprimowanym. Stąd obliczamy, że: $ct'_A = \sqrt{3}$. Dla punktu B współrzędna czasowa jest dwa razy większa: $ct'_B = 2\sqrt{3}$.

Relatywistyczny pociąg to pociąg poruszający się z prędkością zbliżoną do c. Oczywiście jest to tylko eksperyment myślowy, nawet statki kosmiczne nie poruszają się tak szybko.



trajektorie zegarów na końcu peronu

Jednostka na osiach to „sekunda świetlna", czyli 300 000 km. Oznacza to, że jednostka osi ct odpowiada upływowi 1 s.

Rys. 19.18. Porównanie tempa zegarów na dworcu i zegara na lokomotywie

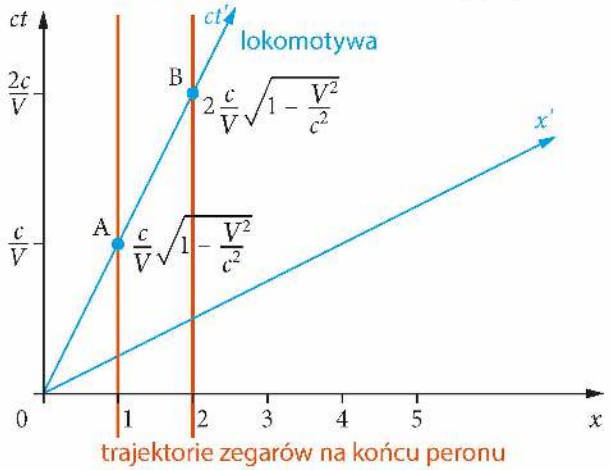
Gdy kolejarze się spotkają, obliczą, że pomiędzy zdarzeniami A i B upłynął czas $\Delta t = 2$ s. Nie zdziwią się, ponieważ peron ma 300 000 km, a pociąg jedzie z prędkością 150 000 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$. Bardziej zaskakujące okaże się porównanie tej wartości ze wskazaniami zegara na lokomotywie, na którym minęło zaledwie $\Delta t' = \sqrt{3}\ \text{s} \approx 1{,}7$ s.

W poruszającym się układzie odniesienia czas płynie wolniej.

To zjawisko nazywamy **dylatacją czasu.**

Wzór opisujący dylatację czasu

Nasze rozważania możemy uogólnić do dowolnej prędkości V (rys. 19.19).



Rys. 19.19. Diagram czasoprzestrzenny dla układu poruszającego się z prędkością V

Widzimy na nim, że gdy w układzie spoczywającym (peron) upłynie:

$$2\frac{c}{V} - \frac{c}{V} = \frac{c}{V}\ \text{sekund}$$

w układzie poruszającym się (w pociągu) upływa zaledwie:

$$2\frac{c}{V}\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}} - \frac{c}{V}\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}} = \frac{c}{V}\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}\ \text{sekund}$$

czyli czas płynie tam: $\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}$ razy wolniej.

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$$

Zależność obok możemy także wyprowadzić z transformacji Lorentza (s. 275), wstawiając do wzoru na transformację czasu równanie ruchu pociągu: $x = Vt$.

Dla prędkości V znacznie mniejszej od c ułamek $\frac{V^2}{c^2}$ ma bardzo małą wartość, zatem $\Delta t' \approx \Delta t$, tak jak to obserwujemy na co dzień.

Dylatacja czasu a względność ruchu

Sam fakt, że w poruszającym się układzie odniesienia czas płynie wolniej, jest sprzeczny z intuicją, ale nie z logiką. Pozorna sprzeczność pojawia się wtedy, gdy przypominamy sobie o zależności ruchu od układu odniesienia. Zawiadowca stacji obserwuje, że zegarek maszynisty chodzi

wolniej. Ale przecież z punktu widzenia maszynisty to zawiadowca jest w ruchu, więc to jego zegarek powinien być wolniejszy. Kto ma rację? Zastanówmy się, w jaki sposób obaj kolejarze mieliby porównywać wskazania swoich zegarków. Aby to zrobić, nie wystarczy, że spojrzą na nie raz. Muszą porównać wskazania w co najmniej dwóch różnych chwilach. Tymczasem pociąg się porusza, więc nawet jeśli będą obserwowali odległy zegarek przez lornetkę, to nie odczytają jego aktualnego wskazania, ale nieco wcześniejsze, ponieważ światło od zegara do lornetki przemieszcza się ze skończoną prędkością.

Zawiadowca obserwuje ruchome zegary

Ten przypadek omówiliśmy na początku tematu. Jak pamiętamy, zawiadowca musiał porównać wskazania zegara na lokomotywie i dwóch zegarów na końcach peronu.

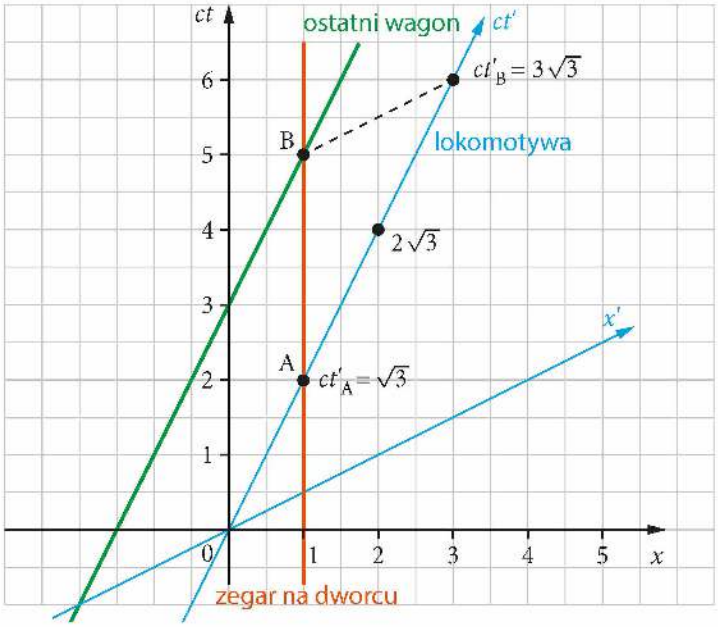
Pomiar zawiadowcy: jeden zegar na lokomotywie porównujemy z dwoma zegarami na peronie.

Maszynista obserwuje nieruchome zegary

Gdyby z kolei maszynista chciał obserwować upływ czasu na jednym z zegarów dworcowych, musiałby poprosić konduktora, aby poszedł on na koniec pociągu. Wówczas każdy z kolejarzy w pociągu mógłby zapisać, o której godzinie mijał zegar dworcowy i co ten zegar wskazywał. Taką sytuację przedstawiono na rysunku 19.20. Zdarzenie A to mijanie dworcowego zegara przez lokomotywę, a zdarzenie B to mijanie dworcowego zegara przez koniec pociągu. Przyjęliśmy, że pociąg ma w swoim układzie odniesienia długość $\sqrt{3}$ sekundy świetlnej, czyli ok. 520 tys. km. Jak przekonasz się dalej, jego długość z punktu widzenia zawiadowcy jest inna.

Pomiar maszynisty: jeden zegar na peronie porównujemy z dwoma zegarami w pociągu.

Po porównaniu wyników maszynista i konduktor stwierdziliby, że pomiędzy zdarzeniem A i B na ich zegarkach minęło $2\sqrt{3} \approx 3{,}5$ s, ale zegar dworcowy przesunął się tylko o 3 s. Tak więc tym razem to załoga pociągu stwierdzi, że zegar na dworcu chodzi wolniej.



Rys. 19.20. Porównanie zegara dworcowego z zegarami na początku (A) i końcu pociągu (B). Przerywana linia pokazuje sposób odczytywania współrzędnej czasowej zdarzenia B

Nie ma w tym żadnej sprzeczności – przecież w każdym z tych przypadków porównywaliśmy inne zdarzenia.

Paradoks bliźniąt

Aby czas w układzie bliźniaka-astronauty płynął 40 razy wolniej, musiałby się on poruszać z prędkością taką, że:
$\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}=\frac{1}{40}$,
czyli $V = 0{,}9997c$.

Kolejny paradoks związany ze zmianą upływu czasu jest znany jako paradoks bliźniąt. Wyobraźmy sobie, że jeden z dwóch braci bliźniaków wybrał się w roczną podróż kosmiczną bardzo szybką rakietą. Czas w jego układzie odniesienia płynął powoli, więc gdy po roku – mierzonym zegarem w rakiecie – wrócił na Ziemię, na naszej planecie minęło już 40 lat i o tyle postarzał się jego bliźniak.
Jednak z punktu widzenia bliźniaka-astronauty to jego brat się poruszał razem z Ziemią, więc to on powinien być młodszy.

Tym razem oba zegary (a dokładnie: zegary biologiczne bliźniaków) zarówno przed startem, jak i po lądowaniu porównujemy, gdy bracia znajdują się obok siebie. Nie musimy więc uciekać się do komplikacji takich jak w przypadku opisanego wyżej pociągu.

Wyjaśnienie paradoksu

Na czym więc polega paradoks? Otóż opiera się on na błędzie w wykorzystaniu zasady względności. Zgodnie z nią wszystkie **układy inercjalne** są równoprawne.
Tymczasem układ bliźniaka-astronauty nie był inercjalny. Rakieta musiała się najpierw rozpędzić, potem zawrócić, a w końcu zahamować. Tylko brat-astronauta odczuje działanie sił bezwładności przy starcie, zawracaniu i lądowaniu.
Relatywistyczny opis ruchu przyspieszonego jest skomplikowany, więc nie przedstawimy jego szczegółów, w każdym razie podróżujący bliźniak naprawdę okaże się młodszy.

Ten wniosek z teorii względności potwierdzono już w latach 70. ubiegłego wieku, tyle że zamiast ludzi w doświadczeniu użyto zegarów atomowych, pozwalających na bardzo precyzyjny pomiar czasu. Jeden z nich wysłano w podróż lotniczą dookoła świata, zwykłymi rejsowymi samolotami. Po powrocie późnił się on dokładnie tyle, ile wynikało z teorii względności – zarówno z dylatacji czasu, jak i ze zmian w upływie czasu związanych ze zmianą grawitacji, opisywanych przez ogólną teorię względności.

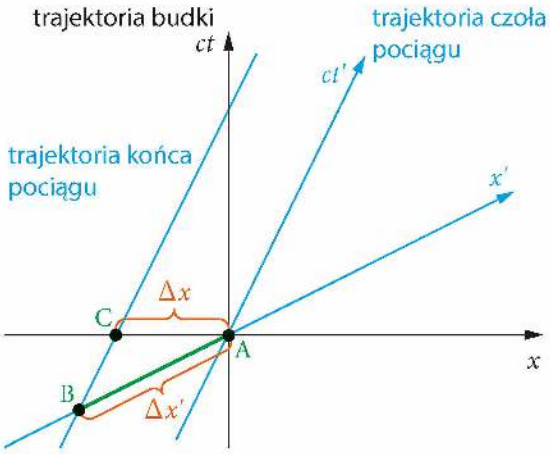


A to ciekawe

Roczna podróż w kosmos jednego z braci bliźniaków to już nie fikcja – właśnie takie badanie przeprowadziła NASA w 2017 r. Oczywiście przy dostępnych dziś prędkościach statków kosmicznych różnica w wieku biologicznym byłaby nie do wykrycia, ale nie to było celem misji. Chodziło o sprawdzenie, czy długotrwałe narażenie na promieniowanie kosmiczne może powodować zmiany w DNA, co byłoby problemem na przykład w przyszłych lotach na Marsa. Okazało się, że bracia pozostali genetycznie identyczni.

Skrócenie Lorentza

Wyobraź sobie długi pociąg przejeżdżający z relatywistyczną prędkością przez peron. Jak zwykle układ związany z ziemią oznaczymy symbolami bez primów, a układ związany z pociągiem – symbolami primowanymi.



Rys. 19.21. Określenie długości pociągu poruszającego się z relatywistyczną prędkością

Wspólny początek układów współrzędnych to zdarzenie A: „czoło lokomotywy mija budkę zawiadowcy". Zauważmy, że (rys. 19.21):

Czoło lokomotywy mija budkę zawiadowcy w miejscu $x = x' = 0$ w chwili $ct = ct' = 0$.

- oś ct' to jednocześnie trajektoria czoła lokomotywy,
- oś ct to jednocześnie trajektoria budki zawiadowcy,
- prosta BC to trajektoria końca pociągu.

Jaką długość ma pociąg? W chwili zerowej jego początek znajdował się w punkcie $x = x' = 0$. Ale gdzie **w tej samej chwili** znajdował się jego koniec? Zastrzeżenie „w tej samej chwili" jest ważne – w innych momentach koniec pociągu znajdzie się gdzie indziej. Równoczesność jest jednak względna.

- Z punktu widzenia maszynisty równoczesne są zdarzenia A i B, więc długość pociągu wynosi $\Delta x' = |AB|$ – maszynista może użyć do zmierzenia tej odległości taśmy mierniczej, ponieważ względem niego pociąg spoczywa.

- Z punktu widzenia zawiadowcy równoczesne są zdarzenia A i C, więc długość pociągu wynosi $\Delta x = |AC|$.

Gdy wykonamy odpowiednie obliczenia (w których trzeba uwzględnić różną jednostkę na osiach układów), okaże się, że:

$$\Delta x = \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}\,\Delta x'$$

Pod pierwiastkiem jest liczba mniejsza od 1, a więc:

$$\Delta x < \Delta x'$$

Ten efekt nosi nazwę **skrócenie Lorentza**.

> Rozmiary poruszającego się ciała mierzone przez nieruchomego obserwatora ulegają skróceniu w kierunku ruchu.

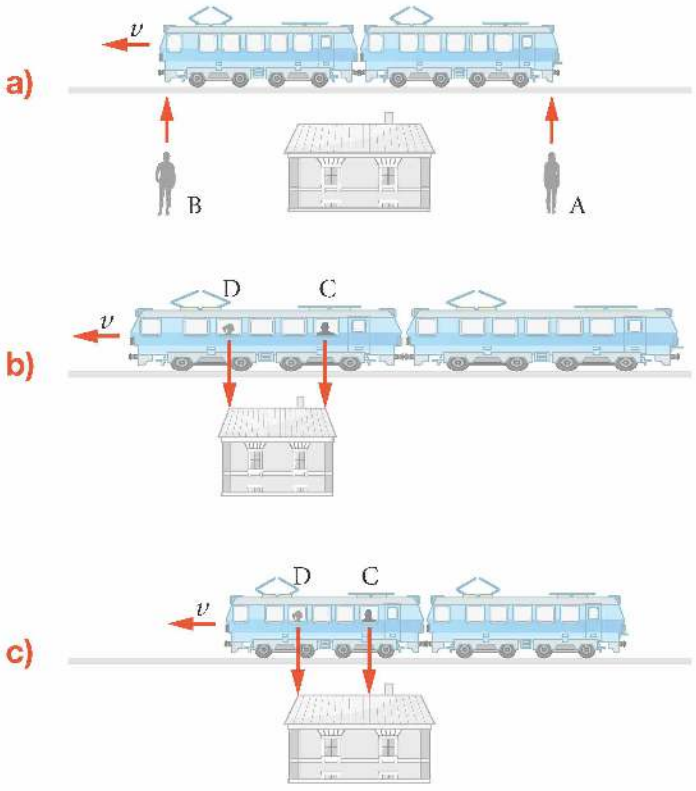
Oczywiście z punktu widzenia maszynisty porusza się peron, a nie pociąg, i to peron wraz ze znajdującymi się na nim przedmiotami jest dla niego skrócony.

Skrócenie Lorentza i względność ruchu

Jeśli chcemy się przekonać, że między obserwacjami z peronu i z pociągu nie ma sprzeczności, musimy dokładniej przeanalizować, w jaki sposób da się przeprowadzić takie pomiary.

- Aby zawiadowca mógł wyznaczyć długość pociągu, musi mieć pomocników ustawionych z zegarkami wzdłuż peronu. Będą oni notować, kiedy minął ich przód, a kiedy koniec pociągu. Jeśli stwierdzimy, że o tej samej godzinie pomocnika Bartka mijało czoło lokomotywy, a pomocnicę Anię – koniec pociągu, to długość pociągu jest równa odległości między Anią a Bartkiem (rys. 19.22a).

Oznaczenia na rysunkach:
A – Ania,
B – Bartek,
C – Czarek,
D – Dorota



Rys. **19.22.** Skrócenie Lorentza: A i B to obserwatorzy na peronie mierzący długość pociągu, C i D to obserwatorzy w pociągu mierzący długość budynku na peronie

- Aby maszynista mógł zmierzyć długość sklepiku stojącego na peronie, powinien mieć pomocników ustawionych z zegarkami wzdłuż pociągu. Będą oni notować, kiedy minął ich początek, a kiedy koniec sklepiku. Po porównaniu wyników określimy długość sklepu w układzie odniesienia pociągu – to odległość między Czarkiem i Dorotą, którzy w tej samej chwili zaobserwowali dwa końce sklepiku (rys. 19.22b).

Popatrzmy teraz na Czarka i Dorotę w układzie odniesienia peronu (rys. 19.22c). Nie ma możliwości, aby jedno z nich znajdowało się przy lewym, a drugie przy prawym końcu sklepiku. Ale nie ma w tym sprzeczności, gdyż równoczesność jest względna.
Mijali oni skrajne punkty sklepiku równocześnie, ale tylko w układzie odniesienia pociągu. Natomiast w układzie odniesienia peronu najpierw Czarek zaobserwował, że mija prawy koniec sklepu, a dopiero po chwili, gdy pociąg zdążył już przebyć pewną drogę, swojej obserwacji dokonała Dorota.

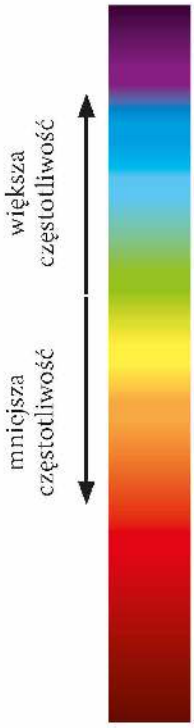
W chwili przedstawionej na rys. 19.22c s. 288 w układzie odniesienia peronu Dorota mija lewy koniec sklepu, natomiast Czarek zdążył już chwilę wcześniej minąć jego prawy koniec.

Obraz świata przy wielkich prędkościach

Skrócenie Lorentza następuje tylko w kierunku ruchu, co oznacza zmianę kształtu poruszających się przedmiotów.
Aby to stwierdzić doświadczalnie, powinniśmy mieć zestaw automatycznych aparatów fotograficznych rozstawionych wzdłuż toru takiego ciała. Gdy wykonają one jednocześnie zdjęcia, z każdego z nich wytniemy tylko część znajdującą się na wprost obiektywu. Po sklejeniu tych fragmentów zdjęć będziemy mogli odtworzyć zmieniony kształt ruchomego ciała.
Jednak podczas obserwacji ciała poruszającego się z prędkością relatywistyczną zobaczymy zupełnie co innego.



Rys. **19.23.** Świat widziany przez osobę poruszającą się z relatywistyczną prędkością – kadr z filmu *Captain Einstein* (patrz zad. 5. s. 293). Domy są nie tylko węższe, lecz także przekrzywione, a ich kolor zmienia się na niebieski



Rys. 19.24. Widmo światła białego i zmiana koloru zielonego w zależności od kierunku ruchu obiektu (oddala się lub zbliża)

Różnica wynika stąd, że postrzegamy obiekty nie takimi, jakimi są w danej chwili, ale jakimi były nieco wcześniej. Bieg światła od przedmiotu do oczu zajmuje przecież nieco czasu.
Jednak różne punkty ciała w chwili obserwacji znajdują się w różnej odległości od naszych oczu, czyli w ogóle nie widzimy całego ciała, jakim było w jednej określonej chwili. Widzimy punkty dalsze tam, gdzie znajdowały się chwilę wcześniej niż punkty bliższe. To spowoduje zniekształcenie obrazu ciała poruszającego się z prędkością relatywistyczną (rys. 19.23 na s. 289).
Dodatkowo będziemy obserwować efekt Dopplera. Światło od obiektu, który się do nas zbliża, ma większą częstotliwość, a więc na przykład zielone ciało zobaczymy jako niebieskie albo fioletowe. Gdy to samo zielone ciało będzie się od nas oddalać, zobaczymy je jako żółte albo czerwone (rys. 19.24).

Idea ogólnej teorii względności

Ogólna teoria względności opisuje także grawitację. Jej ideę omówimy w kilku krokach.

Ruch przyspieszony a grawitacja

Czy zwróciłeś kiedyś uwagę na fakt, że grawitacji nie odczuwamy, dopóki się jej nie przeciwstawimy? Człowiek skaczący ze stołka w czasie lotu znajduje się w stanie nieważkości, tak jakby w ogóle nie było grawitacji. Zaczyna ją odczuwać dopiero wtedy, gdy dotknie ziemi. Podobnie w stanie nieważkości znajdują się pasażerowie dowolnego statku kosmicznego, który leci z wyłączonymi silnikami.

Odczuwanie ciężaru i stanu nieważkości, cz. I s. 167–173

Z kolei kiedy już odczuwamy grawitację, nie jesteśmy w stanie odróżnić jej od sił bezwładności, wynikających z przyspieszenia naszego układu odniesienia.
W statku kosmicznym, który z dala od gwiazd porusza się z przyspieszeniem g, czujemy się dokładnie tak samo jak w polu grawitacyjnym na Ziemi. I nie dotyczy to tylko naszych subiektywnych odczuć.

> Żadne doświadczenie prowadzone w niewielkim zamkniętym pomieszczeniu nie pozwoli nam odróżnić sił grawitacji od sił bezwładności wynikających z ruchu przyspieszonego układu.

To stwierdzenie stanowiło dla Alberta Einsteina punkt wyjścia do stworzenia ogólnej teorii względności. A jakie są jego konsekwencje?

Ruch przyspieszony a efekty relatywistyczne

Jak wiesz, ruch jednostajny układu odniesienia powoduje zmianę długości ciała i upływu czasu.

A to ciekawe

W opowiadaniu Stanisława Lema *Terminus* bohater kąpie się na statku kosmicznym tylko wtedy, gdy ma on włączone silniki. Kąpiel w stanie nieważkości jest – delikatnie mówiąc – niewygodna, a siły bezwładności wynikające z przeciążenia są przecież nieodróżnialne od sił grawitacji. Na zdjęciu: Stanisław Lem.



Łatwo się domyślić, że w przypadku ruchu przyspieszonego taka zmiana także następuje. Jej opis jest jednak bardziej skomplikowany, ponieważ prędkość – wpływająca na dylatację czasu i skrócenie Lorentza – zmienia się z czasem.
Tak więc w układzie przyspieszonym zmiany odległości i tempa upływu czasu są nie tylko inne niż w układzie inercjalnym, ale nawet różne w okolicy różnych zdarzeń.

W lutym 2022 r. potwierdzono doświadczalnie, że zegar umieszczony nawet kilka milimetrów nad ziemią, a więc w minimalnie słabszym polu grawitacyjnym, chodzi szybciej. Eksperyment wymagał wykonania pomiarów z dokładnością do 21 cyfr znaczących.

Grawitacja a efekty relatywistyczne

Skoro jednak grawitacji nie możemy odróżnić od ruchu przyspieszonego układu, to znaczy, że również w polu grawitacyjnym zmieniają się długości i upływ czasu. Właśnie te efekty są odpowiedzialne za wszystkie zjawiska, które w fizyce newtonowskiej tłumaczymy siłą grawitacji.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni

Co oznacza stwierdzenie: **obecność masy powoduje, że zakrzywia się czasoprzestrzeń**? Otóż oznacza zmianę odległości czasowej i przestrzennej między zdarzeniami.

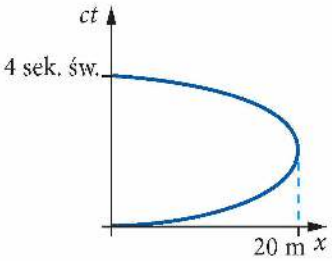
W przypadku dwuwymiarowej czasoprzestrzeni możemy to sobie wyobrażać tak, jakbyśmy zamiast kartki mieli gumową membranę. Taką membranę można rozciągać i w ten sposób zmieniać odległości między punktami (mierzone po jej powierzchni).
Prostym modelem oddziaływania za pośrednictwem zakrzywionej czasoprzestrzeni są dwie metalowe kulki leżące na membranie bębna (rys. 19.25). Każda z nich powoduje ugięcie czasoprzestrzeni, w której druga kulka zaczyna się poruszać w jej stronę. Wydaje nam się, że kulki się przyciągają, choć nie działa między nimi żadna siła.



Rys. 19.25. Membrana uginająca się pod ciężarem kulki to model dający pewne wyobrażenie o zakrzywianiu się czasoprzestrzeni pod wpływem masy

Tabela 19.2. Porównanie teorii newtonowskiej i teorii Einsteina (ogólna teoria względności)

Fizyka newtonowska	Ogólna teoria względności
Ciało swobodne (czyli takie, na które nie działają siły) porusza się po prostej ze stałą prędkością, czyli jego trajektoria w czasoprzestrzeni także jest prostą,	Trajektoria ciała swobodnego to linia łącząca punkty po najkrótszej drodze,
możemy więc powiedzieć, że trajektoria ciała swobodnego to linia łącząca punkty po najkrótszej drodze (bo taką właściwość ma prosta),	niekoniecznie jednak jest to zwykła linia prosta, ponieważ w różnych miejscach czasoprzestrzeni odległości mierzy się różnie,
jednak w pobliżu wielkich mas na ciało działa siła grawitacji,	w pobliżu wielkich mas linie łączące punkty po najkrótszej drodze są inne, niż gdyby takich mas nie było,
pod jej wpływem ciało porusza się ruchem przyspieszonym, a jego trajektoria jest zakrzywiona.	grawitacja nie jest siłą, więc ciało w polu grawitacyjnym jest swobodne i porusza się po najkrótszej drodze.



Rys. 19.26. Trajektoria piłeczki rzuconej do góry

Zakrzywienie czasoprzestrzeni przez masę Ziemi

Jak duże jest to zakrzywienie? Wyobraźmy sobie piłeczkę podrzuconą pionowo do góry z prędkością 20 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Wzleci ona na wysokość 20 m, a cały lot w górę i w dół będzie trwał 4 s. Jej trajektoria, podobnie jak wykres $x(t)$, ma kształt paraboli. Przedstawia ją rysunek 19.26. Gdybyśmy chcieli zachować taką samą skalę 1:1000 na obu osiach, to na osi x wierzchołek byłby odległy od osi ct tylko o 2 cm, ale długość osi ct musiałaby wynosić 12 000 km, czyli być zbliżona do średnicy Ziemi.

Po tej lekcji powinieneś

- ilustrować na diagramie czasoprzestrzennym dylatację czasu i skrócenie Lorentza;
- rozwiązywać zadania dotyczące tych zjawisk;
- wyjaśniać, dlaczego dylatacja czasu i skrócenie Lorentza nie prowadzą do sprzeczności.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Rakieta o długości 50 m porusza się z prędkością $V = 0{,}75c$. Oblicz długość rakiety w spoczywającym układzie odniesienia.

Rozwiązanie

Podana długość to długość rakiety w jej własnym układzie odniesienia: $\Delta x' = 50$ m. Ze wzoru na skrócenie Lorentza mamy:

$$\Delta x = \Delta x' \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$\Delta x = 50\ \text{m} \cdot \sqrt{1 - 0{,}75^2} \approx 33\ \text{m}$$

Odpowiedź: W spoczywającym układzie odniesienia długość rakiety wynosi ok. 33 m.

1. Elektron został rozpędzony do prędkości $0{,}8c$. Jaki czas minął w układzie odniesienia elektronu, jeśli w układzie laboratorium minęła 1 s?

2. Rakieta ma długość 50 m. Oblicz, do jakiej prędkości należy ją rozpędzić, aby w układzie odniesienia Ziemi jej długość wynosiła:

a) 49,9 m, **b)** 49 m, **c)** 25 m.

3. Cząstka poruszająca się z prędkością $0{,}99c$ rozpada się, gdy w jej układzie odniesienia upłynie czas 100 ns. Czy taka cząstka może w układzie laboratorium przebyć drogę 100 m?

***4.** Na s. 285 napisaliśmy, że tempa pracy zegarków maszynisty i zawiadowcy nie da się porównać, a maszynista może jedynie porównywać wskazania swojego zegarka ze wskazaniami kolejnych mijanych zegarów. Mateusz zaprotestował: „Kiedy maszynista porównuje wskazanie swojego zegarka z zegarem na stacji, w tej samej chwili wszystkie inne zegary na stacji wskazują to samo, więc równie dobrze mógłby porównać je z dowolnym innym". Jak na to odpowiedzieć?

5. Gdyby prędkość c była zbliżona do prędkości, z jakimi poruszamy się na co dzień, zjawiska relatywistyczne znalibyśmy z codziennego doświadczenia. Obejrzyj film *Captain Einstein*, przedstawiający ruch w takim hipotetycznym świecie, i zapisz, jakie efekty relatywistyczne udało ci się zaobserwować (adres na s. 309 i pod kodem QR nr 1).

Uwaga. Jeśli chcesz spróbować swoich sił w poruszaniu się w relatywistycznym świecie, możesz zagrać w grę dostępną na stronie *MIT Game Lab* (adres na s. 309 i pod kodem QR nr 2).

1. 2.

DROGA DO TEORII WZGLĘDNOŚCI

Na przełomie XIX i XX w. wśród fizyków panowało przekonanie, że w naukach ścisłych niewiele pozostało do zbadania. Jednak w 1905 r. Albert Einstein opublikował artykuły, które zmieniły obraz fizyki. Okazało się, że nie tylko w przypadku Izaaka Newtona sprawdziły się jego słynne słowa: „widzę dalej, ponieważ stoję na ramionach olbrzymów".



Arystoteles

(384–322 p.n.e.)

był przekonany, że naturalnym stanem na niebie jest ruch, a na Ziemi – spoczynek. Cokolwiek poruszymy na Ziemi, po pewnym czasie się zatrzyma, ale ruch gwiazd na firmamencie będzie trwać bez końca.

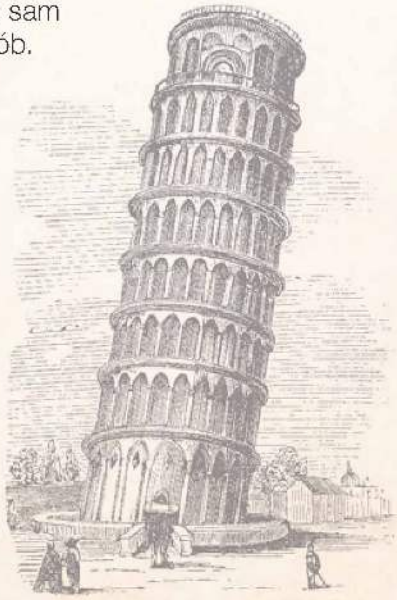




Galileusz

(1564–1642)

sformułował zasadę, zgodnie z którą ciało raz wprawione w ruch będzie się poruszać ruchem jednostajnym prostoliniowym, o ile nie istnieje siła (np. tarcie) zdolna je zatrzymać. Uznał też, że każdy obserwator poruszający się ruchem jednostajnym prostoliniowym musi tak samo opisywać prawa fizyki, a wszystkie ciała w polu grawitacyjnym są przyspieszane w ten sam sposób.





Kartezjusz

(1596–1650)

jako pierwszy zdał sobie sprawę z tego, że ruch jednostajny prostoliniowy ciała – jeśli nie podlega ono wpływom zewnętrznym – jest stanem ciała, podobnie jak spoczynek.

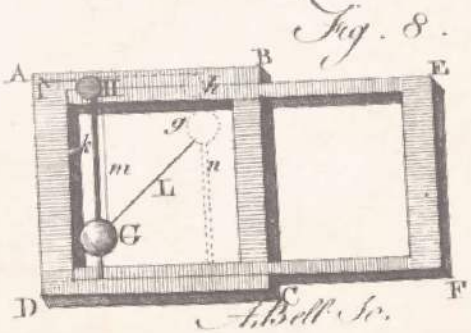




Izaak Newton

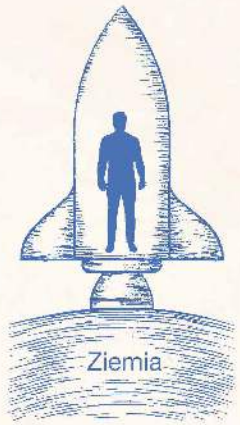
(1642–1727)

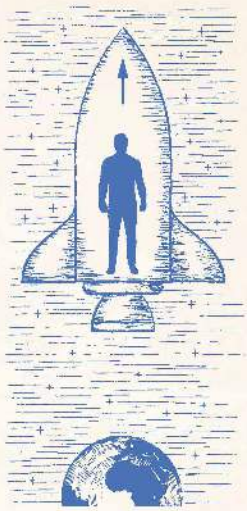
założył, że czas i przestrzeń są absolutne (w każdym punkcie we Wszechświecie przestrzeń i czas mają takie same własności). Sformułował prawa ruchu, które stały się fundamentem fizyki. Pierwsze (zasada bezwładności) – jest powtórzeniem spostrzeżeń Kartezjusza. Drugie – mówi o tym, że zmiana ruchu jest proporcjonalna do przyłożonej siły. Trzecie – stwierdza, że każdemu działaniu towarzyszy przeciwdziałanie. Newton sformułował także prawo powszechnego ciążenia.



Doświadczenie myślowe Einsteina
wykazujące, że siły bezwładności wynikające z przyspieszenia układu równoważą siłę grawitacji:

Wyobraź sobie, że jesteś w rakiecie bez okien. W takiej sytuacji nie możesz rozstrzygnąć, czy znajdujesz się w pobliżu Ziemi i spoczywasz, czy poruszasz się w górę ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem 9,81 m/s^2 w przestrzeni kosmicznej poza polem grawitacyjnym.



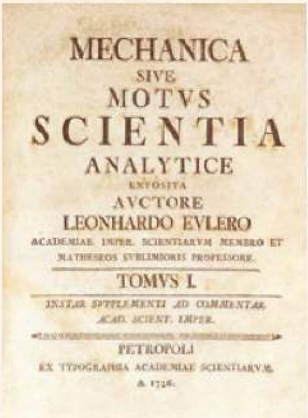






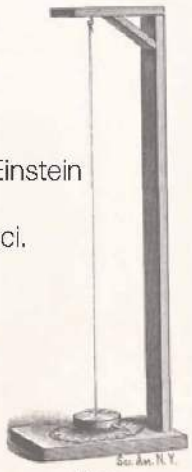
Leonhard Euler
(1707–1783)

napisał pierwszy podręcznik mechaniki zawierający równania. Ani Galileusz, ani Newton nie znali pojęcia prędkości jako stosunku drogi do czasu. Euler wprowadził obecną definicję prędkości i jej jednostkę. To on jako pierwszy podał równanie $F = m \cdot a$.


MECHANICA
SIVE
MOTVS
SCIENTIA
ANALYTICE
EXPOSITA
AVCTORE
LEONHARDO EVLERO
ACADEMIAE IMPER. SCIENTIARVM MEMBRO ET
MATHESEOS SVBLIMIORIS PROFESSORE.
TOMVS I.
PETROPOLI
EX TYPOGRAPHIA ACADEMIAE SCIENTIARVM.

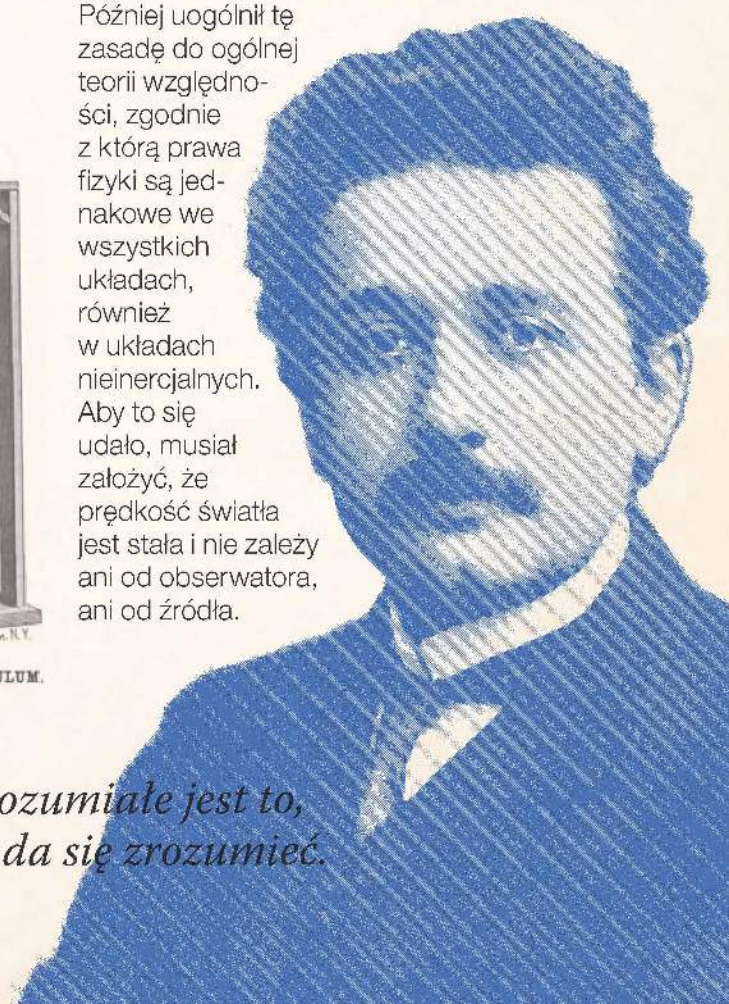
Loránd Eötvös
(1848–1919)

w 1887 r. wykazał doświadczalnie, że masa bezwładna jest równa (z dokładnością rzędu 10^{-14}) masie grawitacyjnej. To oznacza, że siły bezwładności i siły grawitacyjne działają na ciała w taki sam sposób, a my bez dodatkowych wskazówek nie jesteśmy w stanie ocenić, która z tych sił na nas działa. Z tego wniosku Einstein wywiódł ogólną teorię względności.


Fig. 3.
TORSION PENDULUM.

Albert Einstein
(1879–1955)

w szczególnej teorii względności uwzględnił za Galileuszem, że równania opisujące ruch we wszystkich inercjalnych układach odniesienia związanych z dwoma ciałami poruszającymi się jednostajnie prostoliniowo nie mogą się różnić. Później uogólnił tę zasadę do ogólnej teorii względności, zgodnie z którą prawa fizyki są jednakowe we wszystkich układach, również w układach nieinercjalnych. Aby to się udało, musiał założyć, że prędkość światła jest stała i nie zależy ani od obserwatora, ani od źródła.



Najbardziej niezrozumiałe jest to, że Wszechświat da się zrozumieć.

19.5. Energia całkowita

Przypomnij sobie

- Energia spoczynkowa ciała o masie m wynosi $E = mc^2$.
- Niemożliwy jest ruch ciała z prędkością większą niż prędkość światła.

Przy każdym przejściu pomiędzy dwoma duantami (połówkami) cyklotronu przyspieszana cząstka zwiększa energię kinetyczną o tę samą wartość

Energia w fizyce klasycznej

Spróbujmy jeszcze raz znaleźć sposób na przekroczenie prędkości światła. Przypomnijmy sobie z poprzedniej części podręcznika cyklotron (cz. 3, s. 246–247). W odpowiednio dużym urządzeniu tego typu możemy nadać cząstce dowolnie wielką energią kinetyczną. A zgodnie ze wzorem $E_k = \frac{mv^2}{2}$, czyli $v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}}$, oznacza to dowolnie wielką prędkość, także prędkość większą od prędkości światła.

Energia relatywistyczna

Gdzie jest błąd? Być może już się domyślasz, że w szczególnej teorii względności nie obowiązuje wzór $E_k = \frac{mv^2}{2}$. Wzór na energię całkowitą (czyli sumaryczną energię spoczynkową i kinetyczną) ma postać:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Jeżeli $v = 0$, otrzymujemy $E = mc^2$, czyli samą energię spoczynkową.
Jeżeli $v > 0$, energia rośnie, jednak w miarę zbliżania się prędkości do prędkości światła energia nie zbliża się do określonej wartości, ale rośnie w nieskończoność.
Samą energię kinetyczną możemy obliczyć, odejmując energię spoczynkową od całkowitej:

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1\right)$$

Uwaga. W niektórych książkach to, co my nazywamy „masą", określa się „masą spoczynkową" i oznacza zwykle m_0, a oprócz niej definiuje się „masę relatywistyczną", zależną od prędkości zgodnie ze wzorem:

$$m_r = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

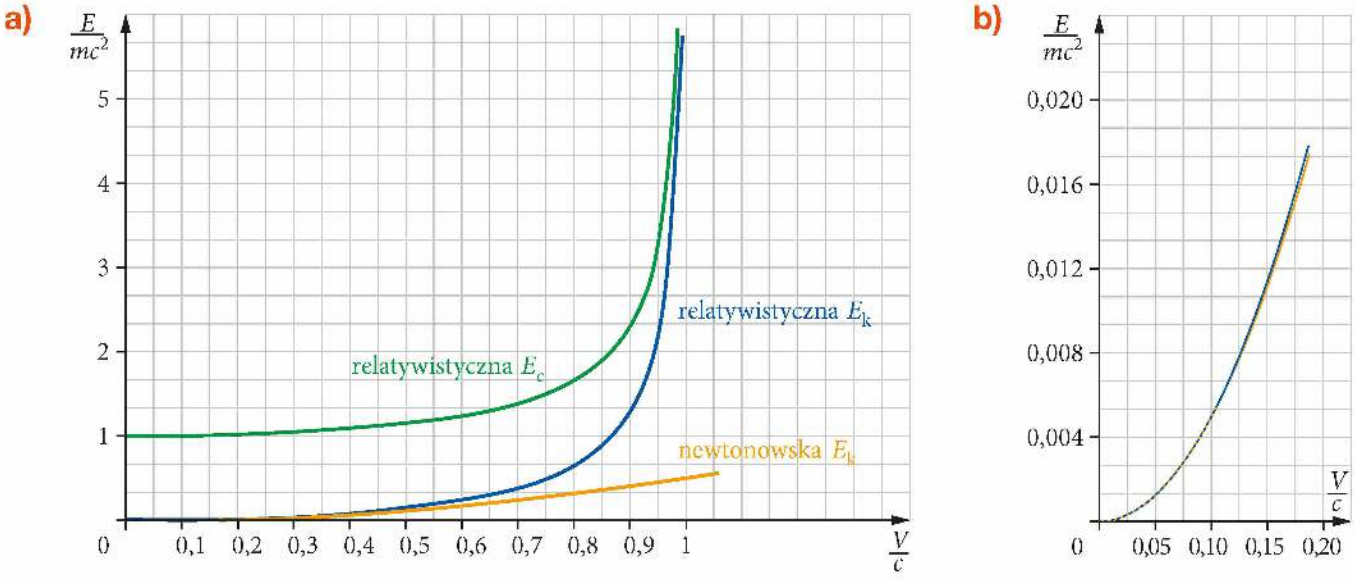
Czasami masę relatywistyczną nazywa się krótko „masą". Wówczas tak rozumiana masa zależy od prędkości ciała.
W naszej książce **przyjmujemy, że słowo *masa* oznacza wielkość charakteryzującą dane ciało, niezależną od wyboru układu odniesienia ani od prędkości ciała.**

Jeśli jednak będziesz korzystać z innych źródeł, zwłaszcza starszych, musisz się zorientować, jaką terminologię w nich przyjęto.

Wykres energii kinetycznej przedstawiono na rysunku 19.27. Zauważmy, że aż do $v = 0{,}1c$ nie widać różnicy między energią kinetyczną obliczoną ze wzoru newtonowskiego $\frac{1}{2}mv^2$ a tą samą energią obliczoną ze wzoru relatywistycznego.

Jednak im bliżej prędkości światła, tym ta różnica jest większa. Według fizyki newtonowskiej dla $v = c$ energia kinetyczna po prostu osiąga wartość $\frac{1}{2}mc^2$ i dalej rośnie dla większych prędkości. W rzeczywistości jednak – zgodnie z teorią względności – energia rośnie coraz szybciej i dla v zbliżającego się do c dąży do nieskończoności.

Innymi słowy, niezależnie od tego, jak bardzo zwiększymy energię, prędkość nie przekroczy c.



Rys. 19.27. Porównanie zależności energii od prędkości. Na rysunku b) powiększony początkowy obszar wykresu

Po tej lekcji powinieneś

- stosować wzór na energię całkowitą do rozwiązywania zadań;
- wyjaśniać, dlaczego przez zwiększanie energii kinetycznej ciała nie da się przekroczyć prędkości światła.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

W jednym z akceleratorów ośrodka DESY (niem. *Deutsches Elektronen-Synchrotron* – Niemiecki Synchrotron Elektronowy) w Hamburgu elektrony uzyskują energię kinetyczną 17,5 GeV.

a) Oblicz ich prędkość.

b) Jak zwiększyłaby się ich prędkość, gdyby energia kinetyczna wzrosła jeszcze dwukrotnie?

Rozwiązanie

Skorzystamy ze wzoru:

$$E_k = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right)$$

Po przekształceniach otrzymujemy z niego:

$$\frac{E_k}{mc^2}=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}-1 \quad \rightarrow \quad \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\frac{E_k}{mc^2}+1$$

$$1-\frac{v^2}{c^2}=\frac{1}{\left(\frac{E_k}{mc^2}+1\right)^2} \quad \rightarrow \quad \frac{v^2}{c^2}=1-\frac{1}{\left(\frac{E_k}{mc^2}+1\right)^2}$$

$$\frac{v}{c}=\sqrt{1-\frac{1}{\left(\frac{E_k}{mc^2}+1\right)^2}}$$

Energię kinetyczną możemy przeliczyć na dżule:

$$E_k = 17{,}5\ \text{GeV} = 17{,}5 \cdot 10^9 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 2{,}8 \cdot 10^{-9}\ \text{J}$$

Energia spoczynkowa elektronu wynosi:

$$E_s = mc^2 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8\ \tfrac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 8{,}19 \cdot 10^{-14}\ \text{J}$$

Podstawiamy wartości do wzoru:

$$\frac{v}{c}=\sqrt{1-\frac{1}{\left(\frac{2{,}8 \cdot 10^{-9}\ \text{J}}{8{,}19 \cdot 10^{-14}\ \text{J}}+1\right)^2}} \approx 0{,}9999999996$$

Stąd $v = 0{,}9999999996c$.

Dla dwa razy większej energii kinetycznej z tego samego wzoru otrzymujemy:

$$v_2 = 0{,}99999999989c$$

Odpowiedź: Prędkość elektronów wynosi $0{,}9999999996c$. Jeżeli energia kinetyczna elektronów wzrośnie dwukrotnie, to ich prędkość wyniesie $0{,}99999999989c$.

Uwaga. Zauważ, że dwukrotnemu zwiększeniu energii odpowiada tylko niewielkie zwiększenie prędkości. W fizyce newtonowskiej dwukrotnemu zwiększeniu energii kinetycznej zawsze odpowiada zwiększenie prędkości $\sqrt{2}$ razy.

1. Proton porusza się z prędkością $0{,}8c$. Przy jakiej prędkości jego energia kinetyczna będzie dwa razy większa? Rozwiąż zadanie dwoma sposobami:

a) na podstawie wzoru,

b) graficznie, na podstawie rysunku 19.27.

2. Elektron zostaje rozpędzony różnicą potencjałów 2 MV. Jaką prędkość osiągnie? Oblicz, jaki wynik otrzymamy za pomocą wzoru z teorii względności, a jaki za pomocą wzorów z fizyki klasycznej. Który wynik jest poprawny?

Uwaga. Masę cząstek elementarnych znajdziesz w tabeli na końcu książki.

3. Jaki procent energii całkowitej elektronów opisanych w przykładzie stanowi ich energia spoczynkowa? A jak jest dla rakiety kosmicznej lecącej z prędkością 11 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$?

4. Przy jakiej prędkości elektronu jego energia całkowita jest dwukrotnie większa od spoczynkowej? A jak jest dla protonu? Spróbuj uogólnić swoje obserwacje.

Świat zdrowo zafalował

Z prof. Tomaszem Bulikiem z Obserwatorium Astronomicznego Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, członkiem zespołu LIGO-Virgo (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, Interferometr Virgo), o odkryciu fal grawitacyjnych rozmawia Przemek Berg.

1 Czy istnieje prawdopodobieństwo, że to, co odkryto w interferometrach LIGO w USA, i co zelektryzowało nie tylko środowiska naukowe, ale też światową opinię publiczną, to nie są fale grawitacyjne?

Prawdopodobieństwo to jest niezwykle małe. Obliczono, że przypadkowe zaobserwowanie silnego sygnału w dwóch interferometrach LIGO jednocześnie i pomyłkowe uznanie go za falę grawitacyjną może się wydarzyć raz na 200 tys. lat. Czyli raczej należy sądzić, że po raz pierwszy zidentyfikowano falę grawitacyjną, zwłaszcza że kształt zarejestrowanego sygnału jest zaskakująco zbieżny z oczekiwaniami naukowców.

2 Jak działają detektory LIGO?

Zbudowano dwa takie detektory. Znajdują się one w USA i dzieli je odległość 3 tys. km. Oba laserowe interferometry są takie same i składają się z dwóch ramion o długości 4 km każde, ustawionych pod kątem prostym. W miejscu połączenia ramion wysyłany jest sygnał laserowy, który jest następnie dzielony na dwa sygnały, każdy podążający swoim torem. Ten sygnał jest jeszcze odbijany wiele razy (używa się luster), by w ten sposób istotnie wydłużyć mierzoną odległość. […]
Normalnie nie ma między wartościami ramion żadnej różnicy. Ale gdy przez detektor przechodzi fala grawitacyjna, nieznacznie zmienia ona długość ramion o rząd jednej tysięcznej średnicy protonu. To bardzo mało, ale da się zmierzyć. W obu oddalonych od siebie interferometrach zarejestrowano to samo – różnicę długości jednego ramienia w stosunku do drugiego. Jedno ramię się wydłużyło, drugie uległo skróceniu.
To oznacza, że przestrzeń w tych miejscach uległa ugięciu, a więc wykryto i tym samym potwierdzono istnienie fal grawitacyjnych. […]

3 Co było źródłem wykrytej fali?

Kolizja dwóch dość masywnych czarnych dziur, do której doszło w odległości ponad miliarda lat świetlnych od nas. W jej wyniku powstała jedna czarna dziura o masie ponad 60 Słońc. […]

4 Czyli wieloletnie poszukiwanie fal grawitacyjnych, które było jednym z ważniejszych wyzwań astrofizyki, zakończyło się wielkim sukcesem?

W ogólnej teorii względności Albert Einstein zauważył, że istnieje rozwiązanie falowe jego równań, ale nie był przekonany, że dotyczy ono fal niosących ze sobą energię. Później wielu naukowców zajmowało się teorią fal grawitacyjnych, w tym kilku wybitnych teoretyków polskich, np. prof. Trautman, i udało im się pokazać, że równania Einsteina opisują prawdziwą falę. I to taką, która niesie energię. […]

Na podstawie artykułu: Przemek Berg, „Wiedza i Życie" 2016, nr 4.

Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Oceń prawdziwość zdań. Zaznacz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F – jeśli jest fałszywe. Wskaż fragmenty tekstu, które pozwalają na taką ocenę.

1.	Prawdopodobieństwo, że w interferometrach LIGO zaobserwowano fale grawitacyjne, jest bardzo małe.	P	F
2.	W pracach nad obserwacjami fal grawitacyjnych brał udział przynajmniej jeden uczony z Polski.	P	F

2. Oblicz, ile razy:

a) ramię interferometru jest dłuższe od połowy długości fali światła czerwonego,

b) połowa długości fali światła czerwonego jest dłuższa od jednej tysięcznej średnicy protonu.
Uwaga. Średnica protonu wynosi $1{,}68 \cdot 10^{-15}$ m.

3. Wyjaśnij, dlaczego w zadaniu 2. do porównań użyliśmy połowy długości fali światła, a nie całej takiej długości.

4. Kiedy doszło do kolizji czarnych dziur będącej przyczyną powstania pierwszej zaobserwowanej fali grawitacyjnej? Wybierz i uzasadnij odpowiedź.

A. kilka lat temu

B. ok. miliarda lat temu

5. Artykuł opublikowano po pierwszej obserwacji fal grawitacyjnych. Od tego czasu dalej trwały badania. Znajdź informacje o kolejnych odkryciach, a także o laureatach Nagrody Nobla przyznanej za pierwszą obserwację fal grawitacyjnych.

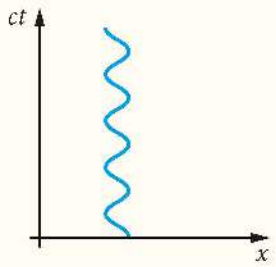
Podsumowanie Elementy fizyki relatywistycznej

Czas i przestrzeń w szczególnej teorii względności

- **Czasoprzestrzeń** to struktura zawierająca w sobie przestrzeń i czas. Kiedy badamy ruch prostoliniowy (jednowymiarowy), czasoprzestrzeń możemy przedstawić na płaskim rysunku.

  Przykładowy diagram czasoprzestrzenny na rysunku a) przedstawia ruch harmoniczny.

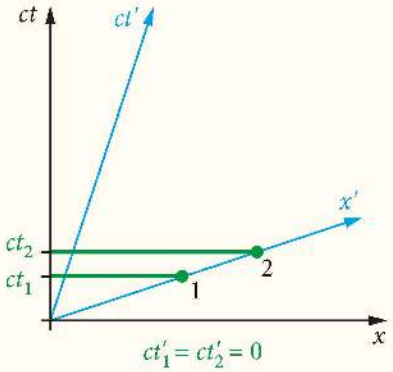
a)



- **Zdarzenie** to punkt w czasoprzestrzeni. W czasoprzestrzeni dwuwymiarowej – jeden wymiar przestrzenny i jeden czasowy (rys. a) – zdarzenie to punkt na płaszczyzny (x, ct) taki, że w chwili t ciało znalazło się w punkcie o współrzędnej x.
- **Trajektoria** to linia, która pokazuje położenie ciała w kolejnych chwilach. W czasoprzestrzeni dwuwymiarowej trajektorię ruchu harmonicznego przedstawiono powyżej.

- We wszystkich inercjalnych układach odniesienia prawa fizyki są jednakowe. **Jednakowa jest też prędkość światła w próżni** mierzona w różnych inercjalnych układach odniesienia, nawet jeżeli poruszają się względem siebie.

b)

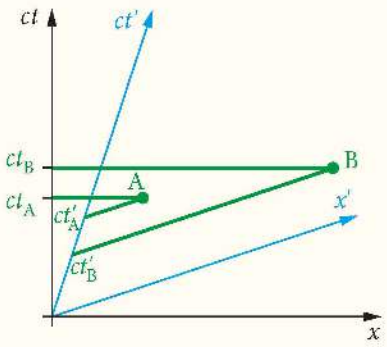


- **Równoczesność zdarzeń** zależy od układu odniesienia: zjawiska równoczesne w jednym układzie odniesienia mogą nie być równoczesne w innym układzie (rys. b).

- **Kolejność czasowa** zdarzeń może zależeć od układu odniesienia, ale tylko wtedy, gdy są one w przestrzeni tak daleko, że aby dotrzeć z jednego do drugiego, należałoby przekroczyć prędkość światła.

  Na diagramie (rys. c) w układzie nieprimowanym zjawisko A nastąpiło przed B, a w układzie primowanym – zjawisko B przed A.

c)



Energia relatywistyczna

- Całkowita energia ciała (spoczynkowa + kinetyczna) zależy od prędkości tego ciała zgodnie ze wzorem:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Kiedy prędkość ciała zbliża się do c, jego energia dąży do nieskończoności. Dlatego ciał o niezerowej masie nie da się rozpędzić do prędkości światła.

Sposób na zadanie

Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. (0–2)

Na dziobie statku kosmicznego lecącego w kierunku Jowisza z prędkością $v = 10\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$ włączono reflektor świecący do przodu.
Oceń prawdziwość zdań. Zaznacz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F – jeśli jest fałszywe. Symbolem c oznaczono prędkość światła w próżni.

1.	Fotony biegnące z reflektora poruszają się względem Jowisza z prędkością $c + v$.	P	F
2.	Fotony biegnące z reflektora poruszają się względem statku z prędkością $c - v$.	P	F

Rozwiązanie:

Poprawną odpowiedzią jest 1. F i 2. F.
Prędkość światła w próżni wynosi c niezależnie od przyjętego układu odniesienia. Znane z fizyki newtonowskiej wzory na składanie prędkości obowiązują tylko dla prędkości znacznie mniejszych od prędkości światła.

Warto zapamiętać!

- Klasyczne składanie prędkości, opisane w pierwszej części podręcznika, obowiązuje tylko w fizyce newtonowskiej, czyli dla prędkości znacznie mniejszych od prędkości światła.
- Prędkość światła w próżni jest stała niezależnie od układu odniesienia.

Zadanie 2. (0–3)

Oblicz prędkość elektronu o energii kinetycznej 554,1 keV. Wynik podaj jako ułamek prędkości światła w próżni c.

Rozwiązanie:

Przeliczmy energię elektronu na dżule:

$$E_k = 554{,}1\ \text{keV} = 554{,}1 \cdot 1000 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 8{,}9 \cdot 10^{-14}\ \text{J}$$

Energię spoczynkową elektronu można obliczyć na podstawie znajomości jego masy:

$$E_s = mc^2 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8\ \tfrac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 8{,}2 \cdot 10^{-14}\ \text{J}$$

Wskazówka 1. Dla cząstek o dużej prędkości trzeba posługiwać się wzorami relatywistycznymi. Dla tych o niewielkiej prędkości wygodniejsze są wzory newtonowskie, które dają praktycznie taki sam wynik. Jeśli jednak nie znasz prędkości cząstki, na wszelki wypadek skorzystaj ze wzorów relatywistycznych.

Energia całkowita cząstki dana jest wzorem:

$$E_c = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Stąd wyznaczamy szukaną prędkość elektronu w zależności od prędkości światła, czyli iloraz $\frac{v}{c}$:

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}=\frac{mc^2}{E_c} \quad \rightarrow \quad 1-\frac{v^2}{c^2}=\frac{m^2c^4}{E_c^2}$$

$$\frac{v^2}{c^2}=1-\frac{m^2c^4}{E_c^2} \quad \rightarrow \quad \frac{v}{c}=\sqrt{1-\frac{m^2c^4}{E_c^2}}$$

Znamy energię spoczynkową i kinetyczną, czyli w powyższym wzorze należy podstawić:

$$mc^2 = E_s \text{ oraz } E_c = E_s + E_k$$

Otrzymujemy:

$$\frac{v}{c}=\sqrt{1-\frac{E_s^2}{(E_s+E_k)^2}}$$

Po podstawieniu danych liczbowych:

$$\frac{v}{c}=\sqrt{1-\left(\frac{8{,}2\cdot 10^{-14}\,\mathrm{J}}{8{,}2\cdot 10^{-14}\,\mathrm{J}+8{,}9\cdot 10^{-14}\,\mathrm{J}}\right)^2}\approx 0{,}88$$

Tak więc:

$$v \approx 0{,}88c$$

Odpowiedź: Prędkość elektronu wynosi ok. $0{,}88c$.

Uwaga. Jak widać, prędkość elektronu jest bardzo duża, czyli słusznie wykorzystaliśmy wzory relatywistyczne, a nie przybliżenie newtonowskie.

Warto zapamiętać!

- Cząstki elementarne (np. elektrony, protony) w wielu zjawiskach poruszają się tak szybko, że do ich opisu musimy korzystać ze wzorów relatywistycznych.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Pociąg relatywistyczny

Pociąg przejeżdżał przez stację bez zatrzymania. Kierownik pociągu, siedzący w środkowym wagonie, powiedział przez głośniki: „Proszę Państwa, przejeżdżamy przez stację Koluszki". Z punktu widzenia pasażerów pociągu jego głos rozbrzmiewał jednocześnie w pierwszym i ostatnim wagonie.

Wskaż właściwe zakończenie zdania.

Jeśli prędkość pociągu stanowiła znaczną część prędkości światła, to w układzie odniesienia związanym z ziemią:

A. pasażerowie z pierwszego wagonu słyszeli słowa konduktora nieco wcześniej niż pasażerowie z ostatniego wagonu.

B. pasażerowie z pierwszego wagonu słyszeli słowa konduktora nieco później niż pasażerowie z ostatniego wagonu.

C. pasażerowie z pierwszego i ostatniego wagonu usłyszeli słowa konduktora równocześnie.

Zadanie 2. Ruch elektronu

Elektron jest rozpędzany w polu elektrycznym pod napięciem 1 MV.

2.1. Wykaż, że obliczanie prędkości takiego elektronu z klasycznego wzoru na energię kinetyczną $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ prowadzi do absurdalnego wyniku.

2.2. Oblicz prędkość tego elektronu ze wzorów relatywistycznych.

Zadanie 3. Pęd relatywistyczny

Pęd ciała o masie $m > 0$ poruszającego się z prędkością v obliczamy ze wzoru relatywistycznego:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

3.1. Uzasadnij, że dla niewielkich prędkości wzór ten daje w bardzo dobrym przybliżeniu taki sam wynik jak wzór znany z fizyki newtonowskiej.

3.2. Określ szacunkowo stałą siatki dyfrakcyjnej pozwalającej badać interferencję wiązki elektronów poruszających się z prędkością równą połowie prędkości światła.

3.3. Udowodnij, że dla każdej cząstki o masie $m > 0$ zachodzi związek:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

gdzie E jest energią całkowitą, a m^2c^4 jest energią spoczynkową.

Uwaga. Zależność ta obowiązuje także dla cząstek o zerowej masie, choć wówczas nie obowiązuje podany wcześniej wzór na pęd.

Tabele

Tabela 1. Wielokrotności i podwielokrotności jednostek

Przedrostek		Mnożnik	Przedrostek		Mnożnik	Przedrostek		Mnożnik	Przedrostek		Mnożnik
E	eksa	10^{18}	M	mega	10^{6}	d	decy	10^{-1}	n	nano	10^{-9}
P	peta	10^{15}	k	kilo	10^{3}	c	centy	10^{-2}	p	piko	10^{-12}
T	tera	10^{12}	h	hekto	10^{2}	m	mili	10^{-3}	f	femto	10^{-15}
G	giga	10^{9}	da	deka	10^{1}	μ	mikro	10^{-6}	a	atto	10^{-18}

Tabela 2. Stałe fizyczne, jednostki

Prędkość światła w próżni	$c = 299\,792\,458\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ (wartość dokładna) $\approx 300\,000\ \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}} \approx 3 \cdot 10^{8}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
Przenikalność elektryczna próżni	$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N \cdot m}^2}$
Przenikalność magnetyczna próżni	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2} \approx 1{,}26 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$
Stała Wiena	$b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m \cdot K}$
Stała Plancka	$h = 6{,}62607015 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Js}$ (wartość dokładna) $\approx 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$ $h = 4{,}14 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{eV \cdot s}$
Ładunek elementarny	$e = 1{,}602176634 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$ (wartość dokładna) $\approx 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$
Masa elektronu	$m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$
Masa protonu	$m_p = 1{,}6726 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
Masa neutronu	$m_n = 1{,}6749 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
Stała Hubble'a	$H = 70\ \frac{\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}}{\mathrm{Mpc}}$
Jednostka masy atomowej	$1\ \mathrm{u} = 1{,}6605 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
Jednostka astronomiczna	$1\ \mathrm{au} = 1{,}5 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m}$
Parsek	$1\ \mathrm{pc} = 3{,}1 \cdot 10^{16}\ \mathrm{m}$
Rok świetlny	$1\ \mathrm{ly} = 9{,}46 \cdot 10^{15}\ \mathrm{m} = 0{,}307\ \mathrm{pc}$
Elektronowolt	$1\ \mathrm{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$
Stała Avogadra	$N_A = 6{,}02214076 \cdot 10^{23}\ \frac{1}{\mathrm{mol}}$ (wartość dokładna) $\approx 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \frac{1}{\mathrm{mol}}$

Tabela 3. Współczynnik załamania światła o długości fali 590 nm dla wybranych substancji

Substancja	Współczynnik załamania
Lód	1,31
Woda	1,33
Alkohol etylowy	1,36
Szkło kwarcowe	1,46
Oliwa z oliwek	1,47
Pleksi	1,49
Szkło typu kron	1,50
Chlorek sodu	1,54
Szkło typu flint lekki	1,58
Cyrkonia	2,16
Diament	2,42

Tabela 4. Współczynniki załamania światła w zależności od długości fali dla wody i szkła typu lekki flint

λ [nm]	Woda	Szkło flint lekki
400	1,3433	1,603
450	1,3393	1,591
500	1,3363	1,584
550	1,3340	1,577
600	1,3326	1,574
650	1,3311	1,571
700	1,3302	1,569
750	1,3292	1,567

Tabela 5. Praca wyjścia wybranych substancji

Metal	Praca wyjścia [eV]
Arsen	5,1
Bar	2,5
Cez	2,1
Cynk	4,3
Glin (aluminium)	4,2
Lit	2,4
Miedź	4,5
Ołów	4,0
Platyna	5,3
Potas	2,2
Rubid	2,2
Sód	2,75
Srebro	4,7
Stront	2,5
Wolfram	4,6
Złoto	4,4

Tabela 6. Prędkość światła w zależności od częstotliwości fali w różnych ośrodkach

Częstotliwość fali [Hz]	Prędkość światła $[\frac{km}{s}]$		
	w próżni	w powietrzu	w wodzie
$7{,}5 \cdot 10^{14}$	299 792	299 708	223 176
$5{,}0 \cdot 10^{14}$	299 792	299 709	224 968
$4{,}3 \cdot 10^{14}$	299 792	299 710	225 374

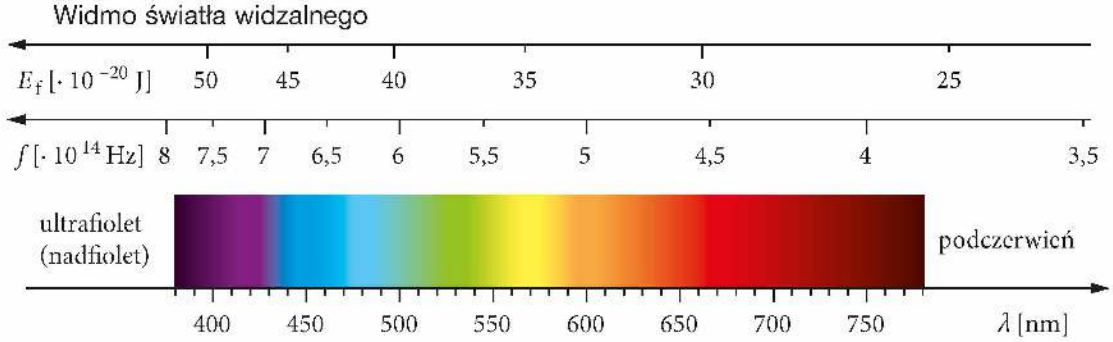


Tabela 7. Niektóre pierwiastki i ich izotopy występujące w przyrodzie

Liczba atomowa	Symbol chemiczny	Nazwa	Liczba masowa*
1	H	Wodór	**1**, 2, 3
2	He	Hel	**4**, 3
3	Li	Lit	**7**, 6
4	Be	Beryl	**9**
5	B	Bor	**11**, 10
6	C	Węgiel	**12**, 13, 14
7	N	Azot	**14**, 15
8	O	Tlen	**16**, 18, 17
9	F	Fluor	**19**
10	Ne	Neon	**20**, 22, 21
11	Na	Sód	**23**
12	Mg	Magnez	24, 26, 25
19	K	Potas	**39**, 41, 40
26	Fe	Żelazo	**56**, 54, 57, 58
36	Kr	Krypton	84, 86, 82, 83 i in.
38	Sr	Stront	**88**, 86, 87, 84
54	Xe	Ksenon	132, 129, 131, 134 i in.
55	Cs	Cez	**133**
56	Ba	Bar	138, 137, 136 i in.
58	Ce	Cer	140, 142 i in.
60	Nd	Neodym	142, 144, 146, 143 i in.
77	Ir	Iryd	193, 191
78	Pt	Platyna	195, 194, 196 i in.
79	Au	Złoto	**197**
80	Hg	Rtęć	202, 200, 199, 201 i in.
81	Tl	Tal	205, 203 i in.
82	Pb	Ołów	208, 206, 207 i in.
84	P	Polon	210
86	Rn	Radon	**222**
88	Ra	Rad	**226** i in.
90	Th	Tor	**232**
92	U	Uran	**238**, 235, 234

Tabela 8. Czasy połowicznego rozpadu izotopów

Izotop	Nazwa	Czas połowicznego rozpadu
$^{3}_{1}H$	Wodór (tryt)	12 lat
$^{8}_{3}Li$	Lit	0,8 s
$^{12}_{5}B$	Bor	7,2 s
$^{14}_{6}C$	Węgiel	5730 lat
$^{12}_{7}N$	Azot	0,02 s
$^{13}_{7}N$	Azot	0,011 s
$^{16}_{7}N$	Azot	10 min
$^{18}_{9}F$	Fluor	110 min
$^{40}_{19}K$	Potas	1,3 mld lat
$^{99}_{43}Tc$	Technet	6 h
$^{131}_{52}Te$	Tellur	25 min
$^{131}_{53}I$	Jod	8 dób
$^{133}_{54}Xe$	Ksenon	5 dób
$^{218}_{84}Po$	Polon	45 s
$^{222}_{86}Rn$	Radon	3,8 doby
$^{226}_{88}Ra$	Rad	1600 lat
$^{238}_{92}U$	Uran	4,5 mld lat
$^{235}_{92}U$	Uran	704 mln lat

* Izotopy uporządkowano od najczęściej do najrzadziej spotykanych w przyrodzie. Sztucznie, przez odpowiednie reakcje jądrowe, można utworzyć także pierwiastki i izotopy niewystępujące naturalnie w przyrodzie. Wytłuszczono izotopy stanowiące ponad 80% masy danego pierwiastka w przyrodzie. **Uwaga.** To nie oznacza, że pierwiastek występuje w przyrodzie w dużych ilościach.

Tabela 9. Wartości funkcji trygonometrycznych

α	sin α	cos α	tg α
0°	0,0000	1,0000	0,0000
5°	0,0872	0,9962	0,0875
10°	0,1736	0,9848	0,1763
15°	0,2588	0,9659	0,2679
20°	0,3420	0,9397	0,3640
25°	0,4226	0,9063	0,4663
30°	0,5000	0,8660	0,5774
35°	0,5736	0,8192	0,7002
40°	0,6428	0,7660	0,8391
45°	0,7071	0,7071	1,0000
50°	0,7660	0,6428	1,1918
55°	0,8192	0,5736	1,4281
60°	0,8660	0,5000	1,7321
65°	0,9063	0,4226	2,1445
70°	0,9397	0,3420	2,7475
75°	0,9659	0,2588	3,7321
80°	0,9848	0,1736	5,6713
85°	0,9962	0,0872	11,4301
90°	1,0000	0,0000	–

Tabela 10. Masy jąder wybranych izotopów i cząstek wchodzących w ich skład

Cząstki	Nazwa	Masa [$\cdot 10^{-27}$ kg]
p	Proton	1,6726
n	Neutron	1,6749
$^{1}_{1}H$	Wodór	1,6726
$^{2}_{1}H$	Wodór (deuter)	3,3436
$^{3}_{1}H$	Wodór (tryt)	5,0074
$^{4}_{2}He$	Hel	6,6447
$^{12}_{6}C$	Węgiel	19,9210
$^{93}_{36}Kr$	Krypton	154,2832
$^{94}_{38}Sr$	Stront	155,9155
$^{140}_{54}Xe$	Ksenon	232,3441
$^{140}_{56}Ba$	Bar	232,2760
$^{144}_{56}Ba$	Bar	238,9387
$^{218}_{84}Po$	Polon	361,9359
$^{222}_{86}Rn$	Radon	368,5905
$^{226}_{88}Ra$	Rad	375,2438
$^{235}_{92}U$	Uran	390,2158
$^{239}_{94}Pu$	Pluton	396,8698

Spis doświadczeń obowiązkowych

Doświadczenia	Numer doświadczenia	Strona
Badanie interferencji światła	2	27
Obserwacja rozpraszania światła w ośrodku	4	39
Wyznaczanie współczynnika załamania światła z pomiaru kąta granicznego	6	55
Badanie związku między ogniskową soczewki a położeniem przedmiotu i obrazu	8	72
Obserwacja zmiany natężenia światła po przejściu przez polaryzatory	16	100
Obserwacja widma atomowego za pomocą siatki dyfrakcyjnej	19	160

Spis infografik

Widmo fal elektromagnetycznych 14–15
Obserwacje w różnych zakresach fal elektromagnetycznych 20–21
Kolory na bańkach mydlanych 33
Tęcza 60–61
Ekran LCD 104–105
Promieniowanie termiczne i temperatura barwowa 130–131
Mikroskop elektronowy 156–157
Zastosowania laserów 164–165
Tomografia komputerowa 176–177
Wpływ promieniowania jonizującego na organizm 206–207
Rozszczepienie jądra atomowego 226–227
Ewolucja masywnej gwiazdy 238–239
Ewolucja Wszechświata 248–249
Droga do teorii względności 294–295

Spis dodatków matematycznych

Obliczanie logarytmu o podstawie 2 214
Nieprostokątny układ współrzędnych 268

Spis adresów pod kodami QR

https://www.youtube.com/watch?v=5ezNP3jSwuQ 42
http://www.foton.if.uj.edu.pl/archiwum/2009/107 110
https://www.naukaoklimacie.pl 140
https://www.youtube.com/watch?v=hFkiMWrA2Bc 152
http://www.deltami.edu.pl/2021a/09/2021-09-delta-art-07-braun.pdf 159
https://chandra.harvard.edu/photo/2007/sombrero/ 178
http://www.scanpyramids.org/index-en.html 204
https://www.ncbj.gov.pl/aktualnosci/jod-swierka-pol-miliona-pacjentow-tygodniowo 254
https://www.youtube.com/watch?v=uiyMuHuCFo4 282
https://www.youtube.com/watch?v=i6AouFHLb2g ..... 289 i (kod 1) 293
http://gamelab.mit.edu/games/a-slower-speed-of-light/ ..... (kod 2) 293

Odpowiedzi i wskazówki do wybranych zadań

Rozdział 16. Fale elektromagnetyczne i optyka

16.1. Czym są fale elektromagnetyczne

Zadanie 2. $\lambda = cT = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{50 \cdot 10^6}\,\text{s} = 6\,\text{m}$

Zadanie 3. $\frac{c - v_{\text{pow}}}{c} \cdot 100\% =$

$= \frac{299792 \frac{\text{km}}{\text{s}} - 299708 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{299792 \frac{\text{km}}{\text{s}}} \cdot 100\% \approx 0{,}028\%$

16.2. Widmo fal elektromagnetycznych

Zadanie 1.

$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{108 \cdot 10^6\,\text{Hz}} = 2{,}78\,\text{m},$

$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{88 \cdot 10^6\,\text{Hz}} = 3{,}41\,\text{m}$

16.3. Dyfrakcja i interferencja fal elektromagnetycznych

Zadanie 1. a) $\sin\theta_0' \approx \text{tg}\,\theta_0' = \frac{\lambda}{2d},$

$x_a = l\frac{\lambda}{2d} = 2{,}2\,\text{mm},$

b) $\sin\theta_1 \approx \text{tg}\,\theta_1 = \frac{\lambda}{d}$, $x_b = \frac{l\lambda}{d} = 4{,}3\,\text{mm}$

Zadanie 2. $\Delta x = x_3 - x_2 \approx x_1 = 0{,}5\,\text{cm}$

Zadanie 3. $\Delta x = x_6 - x_5 = 17\,\text{cm}$

Zadanie 4. **Wskazówka.** Oznacz odległość do ekranu, np. literą l. W dalszych obliczeniach ta wielkość się skróci. Zauważ, że im dalszy prążek, tym gorsze przybliżenie.

Dla sytuacji określonej w zadaniu 3. błąd względny to 12%.

16.4. Siatka dyfrakcyjna

Zadanie 1. **Wskazówka.** Której barwie odpowiada większa długość fali? Jak zgodnie ze wzorem wpływa to na miarę kąta θ_1? A na miarę kąta θ_0?

Zadanie 3. $\Delta\theta = \theta_{2\,\text{fiol}} - \theta_{1\,\text{czerw}} \approx 1{,}2°$

16.5. Odbicie i rozproszenie światła

Zadanie 1. **Wskazówka.** Skąd bierze się różnica między obserwacjami z Księżyca i z Ziemi?

Zadanie 4. a) **Wskazówka.** Tego dnia Słońce góruje (świeci pionowo z góry) nad zwrotnikiem Raka.

$x_a = \frac{h}{\sin 61{,}5°} \approx 11\,\text{km}$

b) **Wskazówka.** Skorzystaj z twierdzenia Pitagorasa.

$x_b \approx 357\,\text{km}$

16.6. Załamanie światła

Zadanie 1.

a) $\sin\beta = \frac{n_w}{n_{sz}}\sin\alpha \to \beta \approx 17{,}7°,$

b) $\beta \approx 22{,}7°$

Zadanie 3. a) $x = d\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos\beta} \approx 1{,}65\,\text{mm},$

b) $\alpha = 0°$

16.7. Częściowe i całkowite wewnętrzne odbicie

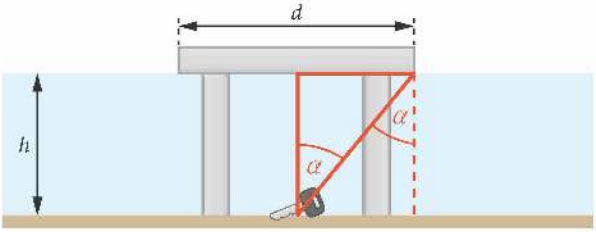
Zadanie 1. a) $\beta \approx 27°$, b) $\beta \approx 15°$,

c) załamanie nie zachodzi, d) $\beta \approx 48°$

Zadanie 3. $\sin\alpha_{gr} = \frac{1}{n} = \frac{1}{2{,}42}$, stąd: $\alpha_{gr} = 24°$

Zadanie 4. $n = \frac{1}{\sin\alpha_{gr}} \approx 1{,}77$

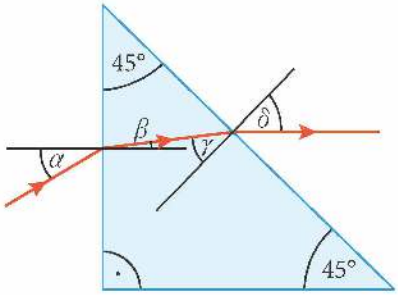
Zadanie 5. **Wskazówka.** Możesz skorzystać z równości kątów naprzemianległych.



$d = \frac{2h}{\sqrt{n^2 - 1}} \approx 3{,}42\,\text{m}$

16.8. Rozszczepienie światła

Zadanie 2. **Wskazówka.** Dla każdej z barw oblicz po kolei kąty β, γ, δ.



a) $\beta_{cz} - \beta_f \approx 0,4°$, b) $\delta_{cz} - \delta_f \approx 2,2°$

Zadanie 3. $\beta_{cz} - \beta_f \approx 0,2°$

16.9. Soczewki

Zadanie 1. a) $f = 0,25$ m, b) $f = -0,20$ m

Zadanie 3. **Wskazówka.** Skorzystaj z podobieństwa trójkątów. Najłatwiej obliczyć najpierw odległość szukanego miejsca od ogniska soczewki.

$x_1 = 6$ cm, $x_2 = 14$ cm

Zadanie 5. Jest to soczewka rozpraszająca.

16.10. Obraz rzeczywisty tworzony przez soczewkę wypukłą

Zadanie 1. a) $y = 60$ cm, $h_o = h_p \frac{y}{x} = 8$ cm,

b) $y = 40$ cm, $h_o = 4$ cm,

c) $y \approx 33,3$ cm, $h_o \approx 2,7$ cm

Zadanie 2. $y_\infty = 1$ cm, $y_{30} = 1,03$ cm

Zadanie 3. a) $y_\infty = 2,5$ mm, $y_{10} = 2,56$ mm,

c) $h_o = 0,5$ mm

16.11. Obrazy pozorne tworzone przez soczewki

Zadanie 1. $\frac{1}{y} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x}$, $h_o = h_p \frac{|y|}{x}$,

a) $|y| \approx 6,7$ cm, $h_o \approx 5,4$ cm,

b) $|y| = 20$ cm, $h_o = 8$ cm,

c) $|y| = 60$ cm, $h_o = 16$ cm

Zadanie 2. a) $|y| = 6,7$ cm, $h_o = 2,7$ cm,

b) $|y| = 10$ cm, $h_o = 2$ cm,

c) $|y| = 12$ cm, $h_o = 1,6$ cm

Zadanie 3. Obraz nie powstaje.

16.12. Obrazy tworzone przez zwierciadła – temat dodatkowy

Zadanie 1. $h_{min} = 90$ cm

Uwaga. Wynik nie zależy od odległości obserwatora od lustra.

Zadanie 3. obraz rzeczywisty, odwrócony, powiększony, $h_o = 9$ cm, odległość obrazu od zwierciadła $y = 24$ cm

16.13. Przyrządy optyczne – temat dodatkowy

Zadanie 1. **Wskazówka.** Powierzchnia koła jest proporcjonalna do kwadratu średnicy.

Zadanie 2. Widzimy znacznie pomniejszone obrazy.

16.14. Polaryzacja światła

Zadanie 2. $I = I_0 \cos^2 \alpha = 8,8 \frac{W}{m^2}$

Zadanie 3. $I' = \frac{1}{2} I$

Wskazówka. Zwróć uwagę, że funkcja COS() w większości arkuszy kalkulacyjnych wymaga podania argumentu w radianach.

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.

1.1. **Wskazówka.** W sytuacji z rysunku I jeden z promieni biegnących od A do A' przechodzi przez ognisko soczewki. Jak go narysować?

Z rysunku $f_I = 0,7$ m, $f_{II} = 2$ m,

z obliczeń: $f_I = 0,67$ m, $f_{II} = 2$ m

1.2. **Wskazówka.** Zauważ, że nic jest to żaden z „charakterystycznych" promieni używanych w konstrukcjach.

1.3. I – obraz rzeczywisty, II – obraz pozorny

Zadanie 2.

$$y = \frac{d + 2f + \sqrt{d^2 + 4f^2}}{2} \approx 72,6 \text{ cm},$$

gdzie $d = 45$ cm

Uwagi.

1. Równanie ma dwa dodatnie rozwiązania, ale $y = 12,4$ cm odrzucamy – obraz rzeczywisty nigdy nie powstaje przed ogniskiem.
2. Rozwiązanie będzie łatwiejsze, jeśli już na etapie równania kwadratowego podstawimy wartości liczbowe. Pamiętaj, aby wszystkie wielkości wyrazić w tych samych jednostkach.

Zadanie 3.

$\sin \theta < 0,287$, więc zmieszczą się cztery prążki po każdej stronie prążka zerowego

Zadanie 4.

Wskazówka. Oblicz kąt padania światła wychodzącego z pryzmatu. Następnie skorzystaj

z twierdzenia sinusów w trójkącie, którego jednym bokiem jest x, a drugim połowa przeciwprostokątnej podstawy pryzmatu.
$x \approx 4{,}7$ cm

Zadanie 6.
$I' = I\cos^2\alpha$, $I' = \frac{I}{5}$, stąd $\cos^2\alpha = \frac{1}{5}$,
czyli $\alpha = 63{,}4°$

Rozdział 17. Fizyka atomowa i kwanty promieniowania elektromagnetycznego

17.1. Promieniowanie termiczne

Zadanie 2. $\lambda_ś = \frac{b}{T_ś} \approx 11\,\mu$m, gdzie $T_ś = 363$ K, długość fali światła czerwonego (średnia długość fali): $\lambda_{cz} = 0{,}7\,\mu\text{m} = 0{,}064\,\lambda_ś$, dla promieniowania kuchenki: $\lambda_k = \frac{c}{f} = 12{,}2$ cm $\approx 11\,000\,\lambda_ś$

Zadanie 3. $T = \frac{b}{\lambda_{max}}$, dla światła czerwonego:

$T_{cz} = \frac{b}{\lambda_{cz}} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}\,\text{m}\cdot\text{K}}{780 \cdot 10^{-9}\,\text{m}} \approx 3700$ K (temperatura minimalna), dla światła fioletowego:

$T_f = \frac{b}{\lambda_f} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}\,\text{m}\cdot\text{K}}{380 \cdot 10^{-9}\,\text{m}} \approx 7600$ K (temperatura maksymalna)

Zadanie 4. $E = hf = h\frac{c}{\lambda}$,

światło czerwone: $E_{cz} \approx 2{,}8 \cdot 10^{-19}$ J,

światło fioletowe: $E_f \approx 5{,}2 \cdot 10^{-19}$ J

Zadanie 5. $n = \frac{E}{E_f} = \frac{Pt}{E_f} = 1{,}8 \cdot 10^{17}$ (wykorzystano wartość energii fotonu obliczoną w zadaniu 4.)

17.2. Efekt cieplarniany

Zadanie 2. $\lambda_{asf} = \frac{b}{T_{asf}} \approx 9{,}0\,\mu\text{m} = 15\,\lambda_ż$

(długość fali światła żółtego: $\lambda_ż = 580$ nm)

Zadanie 3.

$T_{sz} = \sqrt[4]{\frac{1}{\frac{2}{3}}} \cdot 278\,\text{K} \approx 308\,\text{K} = 35°\text{C}$

17.3. Zjawisko fotoelektryczne

Zadanie 1. światło fioletowe:

$E_1 = hf_1 = h\frac{c}{\lambda_1} \approx 5{,}23 \cdot 10^{-19}\,\text{J} \approx 3{,}27\,\text{eV}$

(maksymalna energia fotonu),
światło czerwone: $E_2 = h\frac{c}{\lambda_2} \approx 2{,}65 \cdot 10^{-19}\,\text{J} \approx 1{,}59\,\text{eV}$

(minimalna energia fotonu)

Zadanie 2. Energia elektronu będzie się zawierać między W a $E_{max} = W + \frac{m_e v^2}{2}$, gdzie m_e – masa elektronu, W – praca wyjścia,
tym granicznym energiom odpowiadają:

$\lambda_{min} = \frac{hc}{E_{max}} = 153$ nm,

$\lambda_{max} = \frac{hc}{W} = 235$ nm, elektrodę należy więc oświetlić światłem ultrafioletowym

Zadanie 3. Maksymalna energia elektronu:

$E_{max} = \frac{hc}{\lambda} - W = \frac{m_e v_{max}^2}{2}$,

$v_{max} = \sqrt{\frac{2E_{max}}{m_e}} \approx 610\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$

17.4. Foton jako cząstka

Zadanie 2. **Wskazówka.** Zderzenie jest sprężyste, zachowane są więc zarówno pęd, jak i energia kinetyczna (więcej w części 1. podręcznika).
Nie zapominaj, że zmienia się zwrot pędu piłeczki – wartość zmiany pędu piłeczki to suma wartości pędu przed zderzeniem i po nim. Zamiast wyprowadzać ogólny wzór, można też podstawić dane liczbowe do równości wynikających z zasad zachowania i rozwiązać układ równań.
Ogólny wzór ma postać: $\frac{|\Delta E_k|}{E_k} = \frac{4Mm}{(M+m)^2}$,
gdzie m – masa piłki, M – masa pingwina,
a) $\frac{|\Delta E_k|}{E_k} \approx 0{,}33$, b) $\frac{|\Delta E_k|}{E_k} \approx 0{,}095$

Zadanie 3. **Wskazówka.** Zadanie możemy rozwiązywać jak zwykłe zadania na temat zderzeń sprężystych, tylko że dla atomu skorzystać ze wzorów na pęd i energię takich samych jak dla ciał makroskopowych, natomiast dla fotonu – z odpowiednich wzorów, które poznałeś w tym rozdziale.

Masa atomu węgla $m = 12$ u $= 1{,}99 \cdot 10^{-26}$ kg,

$v = \sqrt{c^2 + \frac{4hc}{m\lambda_1}} - c \approx 950\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$, stąd

$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{mv^2}{2h} = 1{,}36 \cdot 10^{13}\,\text{Hz} = 0{,}0003\%\,f_1$

Zadanie 4. **Wskazówka.** Możesz wyznaczyć zarówno pęd, jak i energię kinetyczną ciała, a na tej podstawie – jego masę.

$m = \frac{h(f_1 + f_2)^2}{2c^2(f_1 - f_2)} \approx 6 \cdot 10^{-35}$ kg (dla światła fioletowego o długości 380 nm i niebieskiego o długości 450 nm).
To masa kilkadziesiąt tysięcy razy mniejsza od masy elektronu.

17.5. Falowa natura materii

Zadanie 1. $E = 100\ \text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-17}\ \text{J}$,

$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2Em}} \approx 0{,}1\ \text{nm}$

Zadanie 2. $v = \frac{h}{m\lambda} = 1250\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (podstawiono długość fali światła żółtego: $\lambda = 580\ \text{nm}$)

Zadanie 3. $\lambda = \frac{h}{mv} = 1{,}7 \cdot 10^{-34}\ \text{m}$, rozmiar oczek siatki jest znacznie większy od obliczonej długości fali de Broglie'a.

17.6. Widma emisyjne i absorpcyjne gazu

Zadanie 1. Ze schematu na s. 164: $m = 2$ oraz $n = 4$, zatem: $f = \frac{c}{\lambda} = cR\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) = 6{,}2 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}$

Zadanie 2. $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2}\right)$,

stąd: $\lambda \approx 1280\ \text{nm}$ i $f = \frac{c}{\lambda} \approx 2{,}35 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}$

Zadanie 3. $m = 2$ i $n = 4$, $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$

stąd: $\lambda \approx 485\ \text{nm}$

Uwaga. Odpowiada to częstotliwości obliczonej przez ciebie w zadaniu 1. (dlaczego?).

Zadanie 4. przejście między orbitami 6 i 3 – promieniowanie podczerwone

Zadanie 5. **Wskazówka.** Skorzystaj z zasady zachowania energii.

Zadanie 6. $\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{hc}{\lambda}$, stąd:

$\lambda = \frac{hc}{E_1 - E_2} \approx 637\ \text{nm}$, światło ma barwę czerwoną

17.7. Model atomu Bohra – temat dodatkowy

Zadanie 2. $v(n) = \frac{1}{n} \cdot \frac{e^2}{2\varepsilon_0 h} = \frac{1}{n} \cdot v_1$,

gdzie $v_1 = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 h} = 2{,}2 \cdot 10^6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Uwaga. Wykres ma postać pojedynczych punktów ułożonych na hiperboli $v(n) = \frac{v_1}{n}$, ponieważ numer orbity może być tylko liczbą naturalną.

17.8. Otrzymywanie promieni Röntgena

Zadanie 1. $U = \frac{hc}{e\lambda_{\min}}$, gdzie $\lambda_{\min} = 10^{-12}\ \text{m}$ (umowna granica zakresu rentgenowskiego),

$U = 1{,}2 \cdot 10^6\ \text{V} = 1{,}2\ \text{MV}$

Zadanie 2. $\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU} = 2{,}1 \cdot 10^{-11}\ \text{m} = 21\ \text{pm}$,

$f_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\min}} = 1{,}45 \cdot 10^{19}\ \text{Hz}$,

$E = 60\,000\ \text{eV} = 60\ \text{keV} = 9{,}6 \cdot 10^{-15}\ \text{J}$

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.

C, 2

Zadanie 2.

2.1. Można przyjąć, że cała masa atomu wodoru to masa jego jądra, czyli protonu (masa elektronu jest dużo mniejsza).

$v_1 = \frac{h}{\lambda_1 m_p} = 0{,}92\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$

2.2. $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 3{,}4\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Zadanie 3.

3.3. B

3.4. $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2eUm}} \approx 0{,}039\ \text{nm}$,

$\sin\alpha = \frac{\lambda}{d} = 2{,}6 \cdot 10^{-4}$,

$x = L\,\text{tg}\alpha \approx L\sin\alpha = 2{,}6\ \text{mm}$

Zadanie 4.

4.1. B, D

4.2. $U = \frac{hc}{e\lambda_{\min}} = 12{,}4\ \text{kV}$

4.3. C, 2

Rozdział 18. Fizyka jądrowa

18.1. Jądro atomowe

Zadanie 2. $A = 0{,}76 \cdot 35 + 0{,}24 \cdot 37 = 35{,}48$

18.2. Reakcje jądrowe

Zadanie 1. ${}^{40}_{19}\text{K} \xrightarrow{\beta^-} {}^{40}_{20}\text{Ca} + {}^{0}_{-1}\text{e} + \bar{\nu}_e$,

${}^{40}_{19}\text{K} \xrightarrow{\beta^+} {}^{40}_{18}\text{Ar} + {}^{0}_{1}\text{e} + \nu_e$

Zadanie 3. uranu-229

18.3. Promieniowanie jądrowe

Zadanie 2. **Wskazówka.** Aby obliczyć liczbę atomów w gramie radu, znajdujemy w układzie okresowym jego masę atomową, a w tablicach – liczbę Avogadra.

$1{,}4 \cdot 10^{-11}$ liczby atomów

Zadanie 3. masa ułożonej kostki:

$m = Vd = Shd = 5{,}4 \cdot 10^5$ kg, jej aktywność:

$A = 1000\ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \cdot 5{,}4 \cdot 10^5\ \text{kg} = 5{,}4 \cdot 10^8\ \text{Bq}$

Liczba rozpadów w ciągu 1 h:

$n = 5{,}4 \cdot 10^8$ Bq $\cdot$ 3600 s $= 1{,}94 \cdot 10^{12}$

18.4. Czas połowicznego rozpadu

Zadanie 1. $m = m_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 0{,}57 m_0$, stąd

$t \approx 4650$ lat, faraon zmarł ok. 2700 r. p.n.e.

Zadanie 2. kobieta zmarła ok. 500 r. p.n.e.

Zadanie 3. mógłby zostać zbadany tylko jeden pacjent

Zadanie 4. $\frac{m_{127}}{m_{131}} = \frac{9}{\frac{1}{8}} = \frac{72}{1}$

Zadanie 5. $A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 0{,}6A_0$,

stąd $T_{1/2} = -t\frac{\log 2}{\log 0{,}6} = 5{,}4$ h

18.5. Masa a energia

Zadanie 1.

$\Delta m = \frac{\Delta E_w}{c^2} = \frac{m c_{Fe} \Delta T}{c^2} \approx 4 \cdot 10^{-11}$ kg $= 0{,}04$ µg

Zadanie 2. $E = 2mc^2 = 1{,}8 \cdot 10^{17}$ J, czas wytwarzania energii przez elektrownię: $t = \frac{E}{P} \approx 470$ dni

Zadanie 3. $m = \frac{E}{2c^2} \approx 0{,}28$ g

Zadanie 4. $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$, masy molowe metanu i tlenu cząsteczkowego:

$M_m = 16$ g, $M_t = 32$ g, w reakcji na jedną cząsteczkę metanu przypadają dwie cząsteczki tlenu, czyli na 16 g metanu przypada $2 \cdot 32$ g $= 64$ g tlenu,

zatem: $\frac{64\text{ g}}{16\text{ g}} = \frac{m_o}{1\text{ kg}} \rightarrow m_o = 4$ kg.

Zmiana masy $\Delta m = \frac{E}{c^2} = 6{,}2 \cdot 10^{-10}$ kg, gdzie $E = 56$ MJ, czyli masa produktów: $m' = 5\text{ kg} - 6{,}2 \cdot 10^{-10}\text{ kg} = 4{,}99999999938$ kg.

Zadanie 5. a) $\Delta m = \frac{E}{c^2} = 4{,}4 \cdot 10^9$ kg $= 4{,}4$ mln ton,

gdzie $E = P\,t = 4 \cdot 10^{26}$ J,

b) $t = 5$ mld lat $= 1{,}6 \cdot 10^{17}$ s,

$\Delta M = 4{,}4 \cdot 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{17}\text{ s} = 7 \cdot 10^{26}$ kg,

$\frac{\Delta M}{M} = \frac{7 \cdot 10^{26}\text{ kg}}{2 \cdot 10^{30}\text{ kg}} = 0{,}00035 = 0{,}035\%$

18.6. Energia jądrowa

Zadanie 1. **Wskazówka.** Patrz wskazówka do zadania 2. w temacie 17.4.

$\frac{|\Delta E|}{E_{pocz}} = \frac{4mM}{(m+M)^2}$

a) $\frac{|\Delta E|}{E_{pocz}} = 0{,}999999$, b) $\frac{|\Delta E|}{E_{pocz}} = 0{,}28$

Zadanie 2. a) bar-140,

b) $E = \Delta mc^2 \approx 2{,}8 \cdot 10^{-11}$ J ≈ 173 MeV,

c) $\Delta M = \frac{\Delta m}{m_U} \cdot 0{,}001\text{ kg} \approx 7{,}8 \cdot 10^{-7}$ kg,

wyzwolona energia:

$E_M = \Delta Mc^2 \approx 7{,}1 \cdot 10^{10}$ J $\approx 20\,000$ kWh

Zadanie 4. **Wskazówka.** Rozważ 100 g uranu z dzisiejszych złóż. Ile gramów poszczególnych izotopów zawiera ta masa? Ile gramów tych izotopów było 2 mld lat temu?

Zadanie 5. **Wskazówka.** Możesz skorzystać z zależności $E_p = -2E_k$, obowiązującej dla każdego ciała krążącego po orbicie, lub obliczyć osobno E_p i E_k. Aby obliczyć prędkość Księżyca w jego ruchu wokół Ziemi, znajdź jego odległość od naszej planety oraz okres obiegu.

$\Delta m = \left|\frac{E_k + E_p}{c^2}\right| = \left|\frac{-E_k}{c^2}\right| = 4{,}3 \cdot 10^{11}$ kg $= 430$ mln t,

$\frac{\Delta m}{M_Z + M_K} = 7 \cdot 10^{-14}$

18.7. Energia syntezy termojądrowej

Zadanie 1. Little Boy: $\Delta m = \frac{E}{c^2} \approx 0{,}7$ g,

Car Bomba: $\Delta m = \frac{E}{c^2} \approx 2{,}3$ kg

Zadanie 2. a) 3:2,

b) zmiana masy podczas jednej reakcji $\Delta m = 3{,}14 \cdot 10^{-29}\text{ kg} = 0{,}00376m$, gdzie m jest łączną masą substratów jednej reakcji; stąd $E = 0{,}00376\text{ g} \cdot c^2 \approx 3{,}4 \cdot 10^{11}\text{ J} \approx 94000$ MWh.

18.8. Ewolucja Słońca i innych gwiazd

Zadanie 2. **Wskazówka.** W definicji stałej słonecznej mowa o powierzchni prostopadłej do promieni słonecznych. Jak określić taką powierzchnię w przypadku całej oświetlonej połowy Ziemi? (Nie jest to połowa powierzchni kuli ziemskiej!)

Zadanie 3. a) $\Delta m = 3m_{He} - m_C = 1{,}3 \cdot 10^{-29}$ kg, wydzielona energia:

$E_1 = \Delta mc^2 \approx 1{,}2 \cdot 10^{-12}$ J $\approx 7{,}4$ MeV,

b) $n = \frac{1\text{ kg}}{m_C} = 5{,}02 \cdot 10^{25}$, wydzielona energia:

$E = nE_1 = 5{,}9 \cdot 10^{13}$ J $\approx 1{,}6 \cdot 10^7$ kWh

Zadanie 4. $d = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$,

a) $d \approx 1400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (nieco więcej niż woda),

b) $d \approx 1{,}4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (10 razy mniej niż powietrze),

c) $d \approx 3{,}3 \cdot 10^{8} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (czyli ponad tona na łyżeczkę)

18.9. Galaktyki i Wszechświat

Zadanie 3. a) $d \approx 600$ Mpc,

b) $v = Hd \approx 42\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 0{,}14c$

Analiza tekstu

Zadanie 3.

$m = m_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \approx 0{,}841 m_0$, rozpadowi ulegnie $m_0 - 0{,}841 m_0 = 0{,}159 m_0$, czyli 15,9% początkowej ilości jodu-131.

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.

1.2. $f = \frac{E}{h} = 1{,}07 \cdot 10^{20}$ Hz,

$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E} = 2{,}8 \cdot 10^{-12}\,\text{m} = 2{,}8$ pm

1.3. $m = m_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 38$ g

1.4. o godzinie 8:42

1.5. $\Delta m = 0{,}93 \cdot m_0 \left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}\right) = 9$ g

1.7. Deficyt masy:
$\Delta m = m_\text{I} - m_\text{Xe} = 0{,}0023$ u $= 3{,}819 \cdot 10^{-30}$ kg,
wyzwolona energia: $E = \Delta m c^2 = 2148$ keV. Energia ta zamienia się na energię fotonu, który unosi

$\frac{443\,\text{keV}}{2148\,\text{keV}} \approx 0{,}206 = 20{,}6\%$ całkowitej energii,

energię spoczynkową elektronu, stanowiącą

$\frac{m_e c^2}{2148\,\text{keV}} = \frac{512\,\text{keV}}{2148\,\text{keV}} \approx 0{,}238 = 23{,}8\%$ całej energii

oraz na energię kinetyczną jądra i elektronu, a także energię antyneutrina elektronowego.

Zadanie 2.

2.2. Z teorii względności 612 nm, z klasycznego wzoru 600 nm, czyli o 2% za mało.

2.3. $v = c \frac{\left(\frac{\lambda'}{\lambda}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\lambda'}{\lambda}\right)^2 + 1} \approx 9{,}7 \cdot 10^{7} \frac{\text{m}}{\text{s}}$,

stąd $d \approx 1400$ Mpc

Zadanie 3.

$T_{1/2} \approx 155$ s

Rozdział 19. Elementy fizyki relatywistycznej

19.1. Czasoprzestrzeń

Zadanie 2. A – pocisk, B – armata

19.2. Czasoprzestrzeń w szczególnej teorii względności

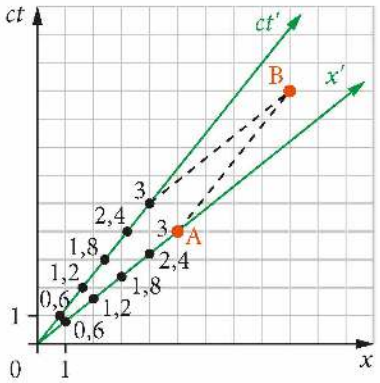
Zadanie 1. $V = 0{,}25c$

Zadanie 2. a) $V = 0{,}8c$,

b) w układzie (x, ct):

$x_\text{A} = 5$, $ct_\text{A} = 4$, $x_\text{B} = 9$, $ct_\text{B} = 9$,

w układzie (x', ct') – patrz rysunek, jednostkę wyznaczamy na podstawie obliczeń, $\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} = 0{,}6$



c) w układzie (x, ct):

$v = \frac{x_\text{B} - x_\text{A}}{t_\text{B} - t_\text{A}} = \frac{x_\text{B} - x_\text{A}}{ct_\text{B} - ct_\text{A}} c = \frac{9-5}{9-4} c = 0{,}8c$,

w układzie (x', ct'): $v = 0$

Zadanie 3. c) $x'_\text{A} = 0$, $ct'_\text{A} = 2{,}8$

Zadanie 4. a) ok. 1,0000000000006,

b) ok. 1,0000000004, c) 1,67

19.3. Względność równoczesności

Zadanie 2.

$v = \frac{s}{t} = \frac{5400\,\text{km}}{\frac{1}{720}\,\text{s}} = 3900000 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 13c$

19.4. Więcej o teorii względności – temat dodatkowy

Zadanie 1. $\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} = 0{,}6$ s

Zadanie 2. a) $V = c\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta x}{\Delta x'}\right)^2} \approx 0{,}063c$,

b) $V \approx 0{,}199c$, c) $V \approx 0{,}866c$

Zadanie 3.

Może.

Wskazówka. Oblicz najpierw, jaki czas upływa w układzie odniesienia laboratorium, zanim cząstka się rozpadnie.

19.5. Energia całkowita

Zadanie 1. a) $E_k = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}-1\right)=\frac{2}{3}mc^2$

$E'_k = 2E_k = \frac{4}{3}mc^2 = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{V'^2}{c^2}}}-1\right)$

stąd $V' = \frac{2\sqrt{10}}{7}c \approx 0{,}904c$

Zadanie 2. $E_k = eU = 2$ MeV $\approx 3{,}2 \cdot 10^{-13}$ J,

z teorii względności: $E_k = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}-1\right)$,

stąd: $v = c\sqrt{1-\frac{1}{\left(\frac{E_k}{mc^2}+1\right)^2}} \approx 0{,}98c$,

z fizyki klasycznej: $E_k = \frac{mv^2}{2}$,

stąd $v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} \approx 2{,}8c$

Zadanie 3. dla elektronów:

$\frac{E_s}{E_c} = \frac{E_s}{E_s + E_k} \approx 0{,}0029\%$,

dla rakiety: $\frac{E_s}{E_c} = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \approx 99{,}99999993\%$

Analiza tekstu

Zadanie 2.

a) $\frac{L_{int}}{\frac{1}{2}\lambda_{cz}} = \frac{4000\text{ m}}{\frac{1}{2}\cdot 700\cdot 10^{-9}\text{ m}} \approx 1{,}1\cdot 10^{10} = 11$ mld,

b) $\frac{\frac{1}{2}\lambda_{cz}}{\frac{1}{1000}d_p} \approx 2{,}1\cdot 10^{11} = 210$ mld

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.

B

Wskazówka. Zauważ, że nie musisz rozważać, jak rozchodził się dźwięk w każdym z układów odniesienia: wiadomo, że w układzie pociągu równoczesne są zdarzenia „pasażerowie pierwszego wagonu usłyszeli konduktora" i „pasażerowie ostatniego wagonu usłyszeli konduktora".

Zadanie 2.

2.2. a) $v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} \approx 1{,}98c$,

b) $E_k = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}-1\right) = eU$,

stąd $v = c\sqrt{1-\frac{1}{\left(\frac{eU}{mc^2}+1\right)^2}} \approx 0{,}94c$

Zadanie 3.

3.2. $p = 1{,}58\cdot 10^{-22}\text{ kg}\cdot\frac{\text{m}}{\text{s}}$,

więc $d \approx 4\cdot 10^{-12}\text{ m} = 4\text{ pm}$

Indeks

A

aberracja chromatyczna 67
– sferyczna 67
absorpcja fotonu 163
anihilacja 195
antymateria 195

B

barwy strukturalne 34
Bohr, N. 168

C

całkowite wewnętrzne odbicie 52
camera obscura 25
ciało doskonale czarne 126
czarna dziura 237
czasoprzestrzeń 264
czas połowicznego rozpadu 212
cząstki elementarne 195

D

dalekowzroczność 74
datowanie radiowęglowe 214
deficyt masy 221
dioptria 67
doświadczenie Younga 26
dualizm korpuskularno-falowy 153
dyfrakcja 22
dylatacja czasu 283

E

efekt cieplarniany 135
Einstein, A. 142, 264
elektronowolt 145
elektrownia jądrowa 224
emisja fotonu 163
– wymuszona 165
energia jonizacji 170
– relatywistyczna 296
– spoczynkowa 218
– wiązania 222
ewolucja gwiazdy 236

F

fala elektromagnetyczna 7
– grawitacyjna 299
– materii 153
– podłużna 43
– poprzeczna 43
– prawdopodobieństwa 158
– radiowa 12
fatamorgana 50
filtr polaryzacyjny 99
fizyka klasyczna 212
fotokomórka 141
foton 148

G

galaktyka 243
globalne ocieplenie 136
gloria 35
grzbiet fali 43
gwiazda neutronowa 237

H

halo 62
hipoteza de Broglie'a 153

I

interferencja 25
iryzacja chmur 34
izotop 192

J

jądro atomowe 192
– niestabilne 197
– stabilne 197
jednostka astronomiczna 244
jonizacja 144

K

kąt graniczny 52
klimat 136
konstrukcja obrazu pozornego 80
– – rzeczywistego 72
– –, soczewka rozpraszająca 81
– –, soczewka skupiająca 72
kreacja 195
krótkofalowa granica promieniowania rentgenowskiego 175
krótkowzroczność 74
kwant 133

L

Lemaître, G. 247
liczba atomowa 192
– masowa 192
licznik Geigera–Müllera 202
logarytm 214
luneta astronomiczna 93
– Galileusza 95

M

masa krytyczna 224
Maxwell, J. Clerk 6
mechanika kwantowa 158
mikrofale 13
mikrofalowe promieniowanie tła 247
mikroskop elektronowy 156–157
– optyczny 95
miraż dolny 49
– górny 50
moderator 225

N

nadfiolet 17
natężenie fali elektromagnetycznej 9
neutron 192
nieprostokątny układ współrzędnych 268
nukleon 192

O

obiektyw lunety 93
odbicie światła 38
oddziaływanie jądrowe 194
odwracalność biegu światła 48
ognisko 66
– pozorne 66
– zwierciadła 85
ogniskowa 66
ogólna teoria względności 290
okno Snelliusa 54
okular lunety 93
optyka falowa 24
– geometryczna 24
oś optyczna 65

P
paradoks bliźniąt 286
paralaksa 245
parsek 245
pęd fotonu 148
Planck, M. 133
podczerwień 13
polaryzacja światła 98
– przy odbiciu 101
polaryzator 99
postulaty Bohra 168
praca wyjścia 144
prawo Hubble'a 246
– Snelliusa 44
– Wiena 132
– załamania 44
pręt kontrolny 225
– paliwowy 225
promieniowanie gamma 18, 201
– hamowania 174
– rentgenowskie 18, 174
– termiczne 124
promień fali 43
proton 192
pryzmat 58

R
reakcja łańcuchowa 224
reaktor jądrowy 225
rok świetlny 244
rozpad alfa 197
– beta minus 198
– – plus 199
– promieniotwórczy 197
rozpraszanie światła 38
rozszczepienie jądra 224
– światła 57
równanie soczewki 72
równoczesność zdarzeń 279
Rutherford, E. 193

S
siatka dyfrakcyjna 31
siły jądrowe 194
skrócenie Lorentza 287
smog 138
soczewka asferyczna 67
– rozpraszająca 65
– sferyczna 67
– skupiająca 65
spektroskop 181
sprzężenie zwrotne 137
stała Hubble'a 246
– siatki dyfrakcyjnej 31
stałość prędkości światła 271
stan podstawowy 164
– wzbudzony 164
supernowa 237
synteza termojądrowa 231

Ś
światło niespolaryzowane 99
– niespójne 26
– spolaryzowane 99
– spójne 26
– widzialne 16
światłowody 53

T
teleskop zwierciadlany 96
teoria względności 264
tęcza 58–61
tokamak 232
tomografia komputerowa 176
trajektoria 265
transformacja Galileusza 267
– Lorentza 273, 275
transformator 6

W
wady wzroku 74
widmo 160
– absorpcyjne 161
– Brockenu 35
– ciągłe 160
– dyskretne (liniowe) 160
– emisyjne 161
Wielki Wybuch 247
wieniec 30
współczynnik załamania światła 47
wygaszenie fali 28
wzmocnienie fali 28
wzór Rydberga 161

Y
Young, Th. 26

Z
załamanie światła 43
zasada Huygensa 24
– względności Einsteina 272
– – Galileusza 272
– zachowania liczby nukleonów 198
– – ładunku elektrycznego 199
zdarzenie 265
zdolność skupiająca 67
zjawisko fotochemiczne 144
– fotoelektryczne wewnętrzne 143
– – zewnętrzne 141
– Tyndalla 39

Spis rozdziałów w pozostałych częściach

Część 1

1. Wprowadzenie
2. Ruch prostoliniowy
3. Ruch krzywoliniowy
4. Ruch i siły
5. Energia i pęd
6. Bryła sztywna

Część 2

7. Hydrostatyka i wstęp do zjawisk cieplnych
8. Termodynamika
9. Ruch drgający
10. Fale mechaniczne

Część 3

11. Grawitacja i elementy astronomii
12. Pole elektryczne
13. Prąd stały
14. Pole magnetyczne
15. Indukcja elektromagnetyczna i prąd przemienny

Rysunki:
Ewelina Baran – s. 58g, 113 (pryzmat); **Elżbieta Buczkowska** – s. 58g, 113 (pryzmat); **Joanna Ptak** – s. 40, 41 (ziemia), 71, 74, 79, 81 (margines), ilustracja oka (s. 71, 81, 87, 94, 95), 135, 145, 182, 267, 268 (wózek), 271, 281, 288 (pociąg); **Marcin Ptak** – s. 59g, 60, 61, **Wioleta Herczyńska** – s. 50; **Andrzej Dukata** – s. 7, 22a, 24g, 25–28, 31, 38, 45, 53, 55, 84, 86, 87gd, 88, 98 (margines), 99 (dolna, margines), 100, 101, 102 (margines), 110p, 111d, 112ś, 113 (polaryzacja światła), 136, 167, 179, 209 (margines), 245; **Zuzanna Dudzic** – s. 267; **Laura Maziewska** – s. 73g, 75 (dolna a), 95, 96, 295 (rakiety); **Paulina Jarmusik** – s. 62g, 65, 66 (margines), 67, 68g, 70–72, 75g, 79, 81 (margines), 82, 90b, 94, 109d, 110l, 113 (soczewka), 114g, 139, 202, 242, 252; **Paulina Podolska** – s. 12, 44, 46, 48, 49 (pustynia), 56, 58d, 63, 64g, 75 (dolna b), 80, 81, 97, 98g, 99g, 112gd, 114śd, 310g; **Ewa Sowulewska** – s. 17, 22b, 24ab, 25, 31, 32, 36, 39, 40, 41, 45, 49d, 52, 54, 58g, 59d, 62gd, 64 (dwie dolne), 66, 68 (margines), 69gś, 73d, 76, 83, 85, 86 (a, margines), 89d, 90 (a, c, d), 91, 92, 102, 103, 109g, 111g, 112ś, 113gd (pryzmat), 115–119, 121, 122, 128, 129, 132, 135, 139, 141, 142, 145, 149, 150, 161, 163, 164, 166, 174, 181–185, 187, 188, 193, 209b, 221, 222, 224, 232, 234, 240, 241, 258, 259, 262, 265 (a,b,d,e), 266, 267, 269–271, 273, 274, 276, 277, 279–285, 287, 288, 292, 297, 301, 310d, 315; **Klaudia Jarocka-Ciok** – s. 201; **Rafał Buczkowski** – s. 156, 192, 222, 234, 241, 255, 226–227 (modele3d); **Justyna Studzińska** – s. 92(2); **Wojciech Sendal** – s. 104, 105 (główna, wektory po lewej), 176, 177; **Marcin Oleksak** – s. 105 (górna i „piksel"); **Przemysław Kłosin** – s. 244; **Adam Król** – s. 156.

Wydawnictwo Nowa Era oświadcza, że podjęło starania mające na celu dotarcie do właścicieli i dysponentów praw autorskich wszystkich zamieszczonych utworów. Wydawnictwo Nowa Era, przytaczając w celach dydaktycznych utwory lub ich fragmenty, postępuje zgodnie z art. 29 ustawy o prawie autorskim. Jednocześnie Nowa Era oświadcza, że jest jedynym podmiotem właściwym do kontaktu autorów tych utworów lub innych podmiotów uprawnionych w przypadkach, w których twórcy przysługuje prawo do wynagrodzenia.

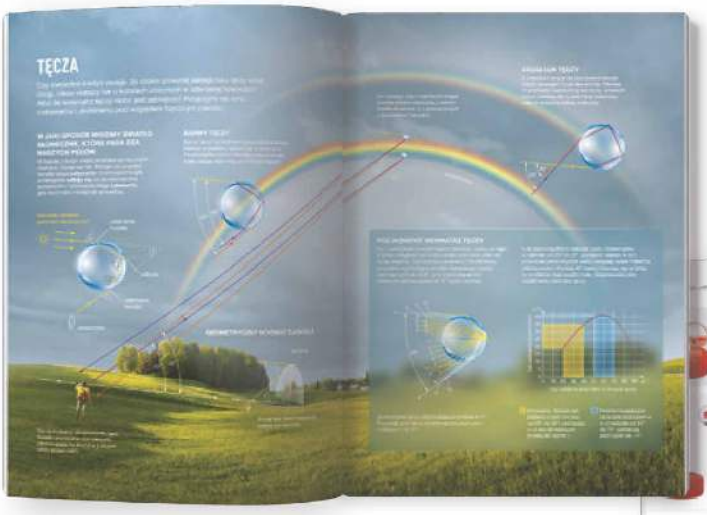
Zdjęcie na okładce: Getty Images/Moment Open/MirageC.

Zdjęcia: BE&W: Alamy Stock Photo – Anna Hristova s. 95 (dom Galileusza), GL Archive s. 250 (antena), Historic Images s. 295 (Eötvös Loránd Morelli), Jupe s. 239 (supernowa), Matteo Chinellato s. 35 (sfaleryt), Matteo Omied s. 237 (supernowa 2021 r.), Michael Kemp s. 87, NASA Image Collection s. 21 (promieniowanie gamma), NASA Photo s. 286, Penta Springs LLP s. 295 (doświadczenia z mechaniki), Radek Detinsky s. 50, The History Collection s. 204 (balon Hessa), Universal Images Group North America LLC s. 294 (drugie prawo Newtona), IAM Ltd/World History Archive s. 294 (doświadczenie Kartezjusza), Science Photo Library s. 238–239 (warstwy Słońca), Science Source – E.R. Degginger s. 154 (dyfrakcja elektronów na kryształe), GIPhotoStock s. 142, GIPhotoStock s. 160 (widmo świetlówki), NASA s. 222, Omikron s. 154 (dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego na polikryształe), Ullsteinbild Axel Springer Syndication GmbH s. 264, Werner Forman Archive s. 214; East News: Reporter/Wojciech Stróżyk s. 174; Forum: Interfoto/Sammlung Dieter Meinhardt s. 35 (doświadczenie Maxa von Laue), Mary Evans Picture Librar s. 39 („Gwiezdne wojny: Część II – Atak klonów"), SSPL/Daily Herald Archive/National Science & Media Museum s. 237 (Jocelyn Bell), Sueddeutsche Zeitung Photo/Scherl s. 133; Getty Images: 500px/David Meucci s. 14 (biedronka), Bettmann s. 168, Brand X Pictures/Science Photo Library – NASA/ESA/STSCI/J. HESTER & A. LOLL, ASU s. 238 (mgławica), STEVE GSCHMEISSNER s. 15 (bakteria), Corbis/Alan Schein Photography s. 14 (wieżowce), DigitalVision Vectors – Grafissimo s. 294 (Kartezjusz), ilbusca s. 294 (Krzywa Wieża w Pizie), Nastasic s. 294 (Izaak Newton), ZU_09 s. 294 (Arystoteles, Galileusz), DigitalVision/Jonathan Knowles s. 33, E+ – ferrantraite s. 20–21 (radioteleskop), Freder s. 34 (mandryl), Six_Characters s. 164–165 (pomiar laserowy), EyeEm – Jaap Kranenburg s. 34 (iryzacja), Jakob Radlgruber s. 60–61 (pole, góry), Lima Gregory s. 15 (tęcza), Xrrth Choti Thaen Sila s. 226–227 (wybuch), Harald WENZEL-ORF s. 49 (miraż na pustyni), Image Source/Callista Images s. 177 (obrazy mózgu z TK), iStock/Getty Images Plus – Elen11 s. 40, Fred Chaveton s. 105, iStock/Laine_N s. 218, JazzIRT s. 219, johan63/Johan Swanepoel s. 200, Meindert van der Haven s. 34 (wieniec), mr.suphachai praserdumrongchai s. 177 (obraz 3D mózgu z TK), ZU_09 s. 162, Moment – Dneutral Han s. 35 (gloria), Douglas Sacha s. 131 (światła), Faba-Photograhpy s. 209, Light Thru My Lens Photography s. 14 (autobus), Maya Karkalicheva s. 35 (widmo Brockenu), Mike Danneman s. 14 (pociąg), Photographer's Choice RF/Thierry Dosogne s. 152, Stockbyte/Comstock s. 206–207 (DNA), ullstein bild s. 291 (Stanisław Lem); Indigo: Mary Evans Picture Library Ltd/Natural History Museum s. 156–157 (oko owada), Science Photo Library RF – s. 157 (skórka pomidora), Nanoclustering/SPL s. 206 (jonizacja atomu), Steve Gschmeissner s. 157 (bakterie), Science Photo Library – s. 153, s. 20 (promieniowanie radiowe 408 Hz), s. 234, Collection Abecasis s. 295 (Leonhard Euler), ETH-Bibliothek Zurich s. 295 (Albert Einstein), Eye of Science/ s. 157 (kryształy azotanu sodu), Eye of Science/Science s. 157 (osteoporoza), Laguna Design s. 206 (naprawa uszkodzeń), lanck Collaboration/European Space Agency s. 248, 250 (mikrofalowe promieniowanie tła), Royal Astronomical SO s. 295 (mechanika Eulera), World History Archive/Image Asset Management s. 294 (układ geocentryczny Ziemi); Shutterstock: Abrar Sharif s. 60–61 (krajobraz), Aerovista Luchtfotografie s. 233 (plac budowy ITER), Aleksandr Merkushev s. 221 (łódź podwodna), Alex Staroseltsev s. 126 (kostki lodu), Alexandr III s. 15 (ikona – pilot do TV), Anatolir s. 15 (ikona – radiochirurgia), angellodeco s. 165 (czytnik kodów paskowych), AnotherPerfectDay s. 126 (dłoń), A-Pro s. 211, Artco s. 15 (ikona – tester), Artsiom P s. 134, AVIcon s. 22 (wykrzyknik), Batechenkofff s. 129, Benvenuto Cellini s. 20–21 (ikony – satelita, radar), Billion Photos s. 43, bsd studio s. 15 (ikona – noktowizor), CeltStudio s. 204 (piramida Cheopsa), Colorlife s. 14 (ikony – kuchenka mikrofalowa, telefon), cosma s. 131 (rozgrzana spirala), Couperfield s. 163, CulombioArt s. 15 (ikona – solarium), Dai Mar Tamarack s. 9, Davooda s. 14 (ikona – karty zbliżeniowe), Dean Drobot s. 125 (słuchanie muzyki), DedMityay s. 136, Diego Grandi s. 228 (Czarnobyl), Dizfoto s. 165 (wycinanie w metalu), Dmitry Kalinovsky s. 130 (obraz z kamery termowizyjnej wewnątrz), Eightstock s. 131 (żarówka), Eliott Roocroft s. 140, encierro s. 60 (postać), Eugene Partyzan s. 17, Everett Collection s. 231 Freedom Life s. 157 (monitor), Gelpi JM s. 10, goldyg s. 18 (rentgen), Greens and Blues s. 228 (elektrownie), Gualberto Becerra s. 204 (ciężarówka), HN Works s. 14 (ikony – radio, radar), horyd yury s. 191, howcolour s. 14 (ikona – rezonans magnetyczny), s. 15 (ikona – zdjęcie RTG), illion Photos s. 15 (wirus), Ivan Smuk s. 130 (obraz z kamery termowizyjnej z zewnątrz), janispalulis s. 60–61 (tęcza), Julen Arabaolaza s. 123, Kevin Key s. 243 (Droga Mleczna widziana z Ziemi), Kim Christensen s. 49 (miraż na szosie), Kolonko s. 207 (znak skażenia), koya979 s. 15 (atom), Lukasz Pawel Szczepanski s. 236, Maheshdethliya s. 22 (bańka mydlana), Mary_Morgan s. 248–249 (tło), MrMR s. 265, Nadiinko s. 15 (ikona – światłowód), NASA images s. 237 (Mgławica Krab), Natali Eina s. 23 (światła samochodu), Nicku s. 124 (James Clerk Maxwell), Oleg Krugliak s. 131 (chili), Parilov s. 225, Perutskyi Petro s. 144, photraveller s. 217, ppk3000 s. 39 (efekt Tyndalla), Raimundo79 s. 16 (obraz z noktowizora), Rost9 s. 206 (zerwanie DNA), Rvector s. 15 (ikona – skaner bagażu), Sacho films s. 165 (płyta CD), sakkmesterke s. 263, schankz s. 106 (pszczoła), Scubadesign s. 54, siriwat wongchana s. 278, sruilk s. 205 (oddziaływanie promieniowania na skórę), Steve Allen s. 224, Tata Donets s. 208 (symbol Radura), Terelyuk s. 165 (korekcja wzroku), Vector Tradition s. 15 (ikona – konserwacja zabytków), Viktar Malyshchyts s. 245 (Galaktyka Andromedy), Violart s. 65, VladKol s. 13 (radar ręczny), Volodymyr Klimov s. 205 (kopalnia uranu), vvoe s. 124 (klocki), Wirestock Creators s. 203 (złoto), WitR s. 216, YAKOBCHUK V s. 15 (czerwona krwinka); Thinkstock/Getty Images: Hemera/Valentina Vasilieva s. 89 (lusterko samochodowe), iStockphoto – Bet_Noire s. 6, CARVALHO_BRASIL s. 94, Dorit Jordan Dotan s.89 (lustro drogowe), heibaihui s. 62, jbk_photography s. 85, JoeFotoIS s. 53 (szlifowanie diamentu), Milanapronic s. 88, TonyYao s. 5, Photodisc/Spike Mafford s. 53 (światłowód), Stockbyte/Comstock s. 34 (DNA); Captain Einstein/Ghent University Department of Physics&Astronomy, link: https://www.youtube.com/watch?v=i6AouFHLb2g s. 289 (Świat widziany przez osobę poruszającą z bardzo dużą prędkością – klatka z filmu); Hitachi Research Center s. 155 (tworzenie obrazu interferencyjnego przez elektrony); Kelli-Ann Bliss/NOAA s. 16 (balon meteorologiczny); Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku/NCBJ/OR_POLATOM s. 253 (artykuł „Jod ze Świerka", link: https://www.ncbj.gov.pl/aktualnosci/jod-swierka-pol-miliona-pacjentow-tygodniowo); NASA/ESA: ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO s. 20 (promieniowanie widzialne), ESA/JAXA s. 20 (daleka i średnia podczerwień), ESA/NASA/Planck Collaboration s. 21 (promieniowanie mikrofalowe), Courtesy of Dr. T.H. Jarrett (IPAC/Caltech) s. 20 (bliska podczerwień), LAMBDA Archive Team s. 21 (promieniowanie radiowe 1420 Hz), MPE/S. Digel and S. Snowden (GSFC), ROSAT Project s. 21 (promieniowanie rentgenowskie), NASA s. 149, NASA/UMass/Q.D.Wang et al. s. 178 (Galaktyka Sombrero w promieniach X), NASA/STScI/AURA/Hubble Heritage s. 178 (Galaktyka Sombrero w świetle widzialnym), NASA/JPL-Caltech/Univ. AZ/R.Kennicutt/SINGS Team s. 178 (Galaktyka Sombrero w podczerwieni), NASA/Robert D. Loss s. 227 (naturalny reaktor jądrowy, Gabon, Oklo), NASA/ESA/2004 HUDF – S. Beckwith, M. Stiavelli, A. Koekemoer (STScI), R. Thompson (University of Arizona), and the STScI HUDF Team; 2009 HUDF – G. Illingworth, R. Bouwens (University of California, Santa Cruz), and the HUDF09 Team; 2012 HUDF – R. Ellis (Caltech), R. McLure, J. Dunlop (University of Edinburgh), B. Robertson (University of Arizona), A. Koekemoer (STScI), and the HUDF12 Team; 2012 XDF – G. Illingworth, D. Magee, P. Oesch (University of California, Santa Cruz), R. Bouwens (Leiden University), and the HUDF09 Team; 2014 HUDF/UV-UDF – H. Teplitz, M. Rafelski (IPAC/Caltech), A. Koekemoer (STScI), R. Windhorst (Arizona State University), and Z. Levay (STScI) s. 243 (Ekstremalnie Głębokie Pole Hubble'a); NASA s. 243 (Droga Mleczna w przestrzeni kosmicznej), NASA/Apollo Image Gallery s. 281 (Buzz Aldrin przed lotem na Księżyc); National Academy of Sciences, U.S.A. Copyright 2004, (link: https://www.pnas.org/content/101/1/8) z artykułu „Hubble's diagram and cosmic expansion" autorstwa Roberta P. Kirshnera (PNAS nie ponosi odpowiedzialności za dokładność tłumaczenia) s. 246 (wykres zależności między odległością do galaktyki a prędkością jej oddalania się od nas); U.S. Department of Energy s. 233 (ITER – przekrój reaktora); Marcin Braun s. 97; Anna Budzyńska s. 18 (banknoty), s. 19, 31, 45, 57, 58, 70, 71, 72, 75, 78, 80, 84, 89, 93, 95 (doświadczenie), s. 96, 100, 101, 102, 106 (doświadczenia), s. 108, 208 (doświadczenia), s. 213, 291 (membrana); Miłosz Budzyński s. 23 (doświadczenie), s. 27, 30, 37, 39 (doświadczenie), s. 41, 42, 55, 56, 127, 128, 160 (doświadczenie), s. 203 (licznik Geigera), s. 221 (magnesy); Maciej Wróbel s. 245 (doświadczenie); Agnieszka Żak s. 125 (żelazko), s. 247.

nowa era *Twoje mocne strony*

Zrozumieć fizykę

Podręcznik *Zrozumieć fizykę 4* do zakresu rozszerzonego zawiera przystępnie opracowane treści, skupione wokół zagadnień związanych z falami elektromagnetycznymi i optyką, fizyką atomową, relatywistyczną i jądrową. Szczególny nacisk położono na ułatwienie zrozumienia kolejno omawianych tematów, a także na kształcenie umiejętności rozwiązywania różnych typów zadań oraz wykonywania, opisu i analizowania doświadczeń. Podręcznik zawiera elementy wspierające uczniów w nauce, m.in. w zakresie umiejętności matematycznych.



Czytelne infografiki i ilustracje

W podręczniku znajdują się liczne ilustracje i infografiki ułatwiające uczniom zrozumienie trudnych, lecz ważnych zagadnień.

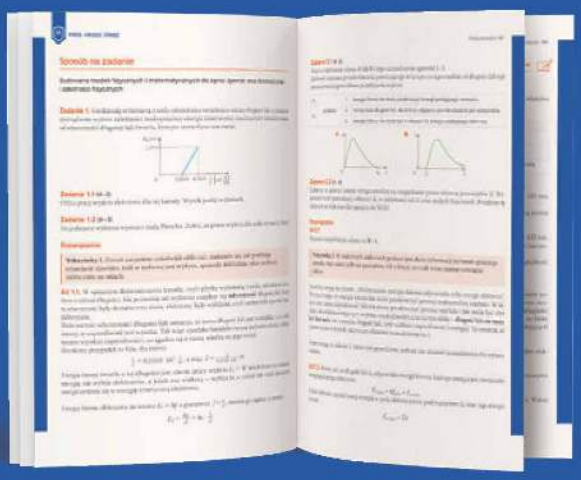
Doświadczenia

Wszystkie doświadczenia, w tym obowiązkowe, są zilustrowane, rozpisane kroku po kroku, opatrzone wskazówkami i komentarzem, aby łatwiej było zrozumieć ich przebieg.



WIESZ, UMIESZ, ZDASZ

W podręczniku *Zrozumieć fizykę 4* znajduje się szereg rozwiązań umożliwiających wykształcenie kluczowych umiejętności zawartych w podstawie programowej. Jednym z nich jest blok *Wiesz, umiesz, zdasz,* porządkujący wiadomości i kształcący umiejętności z danego działu. Zawiera *Podsumowanie*, *Sposób na zadanie* oraz *Zadania powtórzeniowe*.



Nowa Era Sp. z o.o.

www.nowaera.pl nowaera@nowaera.pl

Centrum Kontaktu: 58 721 48 00

ISBN 978-83-267-4393-1