

WYDANIE
AKTUALNE

FIZYKA

PODRĘCZNIK • LICEUM I TECHNIKUM • ZAKRES PODSTAWOWY

NOWA
EDYCJA

WSiP

2

Autorzy: **Ludwik Lehman, Witold Polesiuk, Grzegorz F. Wojewoda**

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: **dr. Jerzego Brojana, mgr. Waldemara Reńdy, prof. dr. hab. Jerzego Podrackiego**.

Etap edukacyjny: III

Typ szkoły: szkoła ponadpodstawowa (liceum ogólnokształcące i technikum)

Zakres kształcenia: rozszerzony

Rok dopuszczenia: 2023

Numer ewidencyjny w wykazie: **999/2/2023/z1**

Podręcznik wpisany do wykazu podręczników MEiN dopuszczonych do użytku szkolnego, uwzględniających podstawę programową kształcenia ogólnego określoną w rozporządzeniu z dnia 30 stycznia 2018 (Dz.U. z 2018 r. poz. 467, z 2020 r. poz. 1248, z 2021 r. poz. 1537, z 2022 r. poz. 622 i 1705 oraz z 2023 r. poz. 314).

Cyfrowe odzwierciedlenie podręcznika jest dostępne na eduranga.pl

© Copyright by Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne
Warszawa 2020, 2023

Wydanie III zmienione, 1/2025

ISBN 978-83-02-21310-6 – podręcznik w wersji elektronicznej (flipbook)

ISBN 978-83-02-22944-2 – podręcznik w wersji drukowanej

Opracowanie merytoryczne i redakcyjne: **Agnieszka Drzazgowska** (redaktor koordynator, redaktor merytoryczny), **Agnieszka Gawryszczak** (redaktor koordynator, redaktor merytoryczny), **Marta Buza** (współpraca redakcyjna)

Redakcja językowa: **Zespół WSiP, Jolanta Kucharska**

Redakcja techniczna: **Agnieszka Przysiańska**

Projekt okładki: **Ewa Pawińska**

Projekt graficzny: **Ewa Pawińska, Hanna Michalska-Baran**

Opracowanie graficzne: **Stefan Drewiczewski**

Fotoedycja: **Ignacy Skłodowski**

Skład i łamanie: **TomMaster Studio**

Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna

00-807 Warszawa, Aleje Jerozolimskie 96

KRS: 0000595068

Infolinia: **801 220 555**

www.wsip.pl

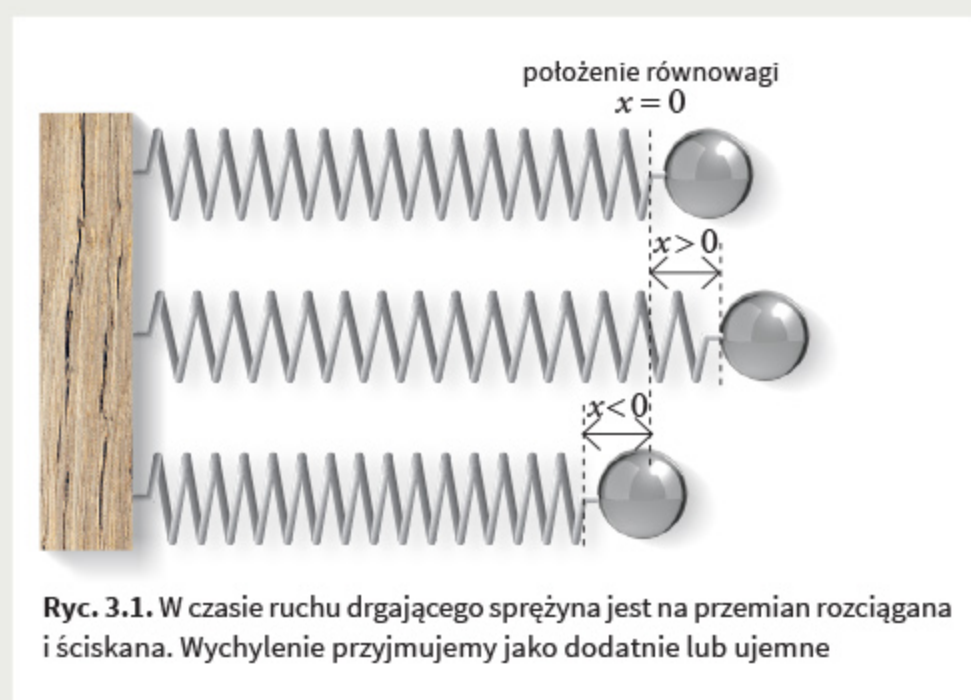
Spis treści

Jak korzystać z podręcznika	4
Drgania	5
1. Ruch drgający	6
2. Siły w ruchu drgającym	13
3. Energia w ruchu drgającym	18
4. Wahadło	25
5. Drgania tłumione i drgania wymuszone	30
Powtórzenie działu	40
Fale i optyka	45
6. Rodzaje fal	46
7. Wielkości opisujące fale	54
8. Fale dźwiękowe	60
9. Zjawisko Dopplera	65
10. Dyfrakcja i nakładanie się fal	74
11. Interferencja fal	82
12. Światło jako fala	89
13. Odbicie światła	96
14. Załamanie światła	102
15. Całkowite wewnętrzne odbicie	110
16. Zjawiska optyczne w atmosferze	116
Powtórzenie działu	124
Termodynamika	129
17. Cząsteczkowa budowa materii	130
18. Rozszerzalność cieplna	138
19. Przekaz energii w postaci ciepła	144
20. I zasada termodynamiki	151
21. Ciepło właściwe i bilans cieplny	158
22. Topnienie i krzepnięcie	164
23. Parowanie i skraplanie	171
24. Bilans cieplny – przykłady	178
25. Własności fizyczne wody	186
Powtórzenie działu	194
Scenariusze doświadczeń	199
Niezbędnik matematyczny	209
Teksty popularnonaukowe	218
Odpowiedzi i wskazówki do zadań	226
Stałe fizyczne i astronomiczne	233
Indeks rzeczowy polsko-angielski	236

JAK KORZYSTAĆ Z PODRĘCZNIKA

Pamiętaj: odpowiedzi do wszystkich zadań zamieszczonych w podręczniku zapisuj w zeszyte przedmiotowym.

Przeczytaj, zrozum, dowiedz się więcej



zasadnicza część wykładu

Ciepło topnienia danej substancji określa, ile ciepła potrzeba do stopienia jednostki masy substancji w temperaturze topnienia.

$$F_d = m \frac{v^2}{r}$$

ważne wnioski, prawa oraz definicje sformułowane słownie lub za pomocą wzorów

WARTO WIEDZIEĆ

ciekawostki i materiały rozszerzające podstawową wiedzę

Ćwicz i rozwiązuj zadania

PRZYKŁAD 1.

Na rysunku przedstawiono schematycznie falę wytworzoną na sznurze, biegnącą w prawo, w dwóch krótko po sobie następujących momentach. Punkty A i B sznura, znajdujące się początkowo w położeniu równowagi, wyróżniono kolorem. W którą stronę poruszają się fragmenty sznura w punktach A oraz B?

szczegółowo rozwiązane zadania

PYTANIA I ZADANIA

1. Promień światła pada na powierzchnię wody pod kątem 60° do tej powierzchni. Naskicuj w zeszyte bieg promienia w wodzie.
2. Na szklany graniastosłup trójkątny (tzw. pryzmat) pada promień światła w sposób przedstawiony na rysunku. Narysuj dalszy bieg światła w pryzmacie i po jego opuszczeniu.

pytania i zadania na zakończenie rozdziału

Uporządkuj swoją wiedzę i sprawdź umiejętności

POWTÓRZENIE DZIAŁU

powtórzenie wiadomości – teoria

POWTÓRZENIE DZIAŁU

ćwiczenie umiejętności – pytania i zadania

Korzystaj z oznaczeń kolorystycznych

SCENARIUSZE DOŚWIADCZEŃ

TEKSTY POPULARNONAUKOWE

NIEZBĘDNIK MATEMATYCZNY

ODPOWIEDZI I WSKAZÓWKI DO ZADAŃ

Energia sprężystości w ruchu drgającym

Energię sprężystości można obliczyć ze wzoru:

$$E_s = \frac{1}{2} kx^2$$

gdzie:

k – współczynnik sprężystości sprężyny,

x – odkształcenie sprężyny.

Z użyciem tego wzoru można bardziej szczegółowo opisać energię w ruchu drgającym. Maksymalne odkształcenie podczas ruchu drgającego jest równe amplitudzie drgań, zatem maksymalna energia sprężystości jest wprost proporcjonalna do kwadratu amplitudy drgań:

materiał rozszerzający wiedzę

s. 211

odniesienia do stron
ze Scenariuszami
doświadczeń

s. 216

odniesienia do stron
Niezbędnika
matematycznego

s. 77

s. 16

odniesienia
do stron
rozdziału



treści usunięte wg podstawy
programowej 2024



treści fakultatywne wg podstawy
programowej 2024



DRGANIA

Czy można rozbić szklankę śpiewem? W jaki sposób drgająca kula chroni wieżowiec przed skutkami trzęsień ziemi? Dowiesz się, gdy poznasz RUCH DRGAJĄCY.



1. Ruch drgający

- Wielkości opisujące ruch drgający
- Prędkość w ruchu drgającym

→ Przypomnij sobie wielkości opisujące ruch.



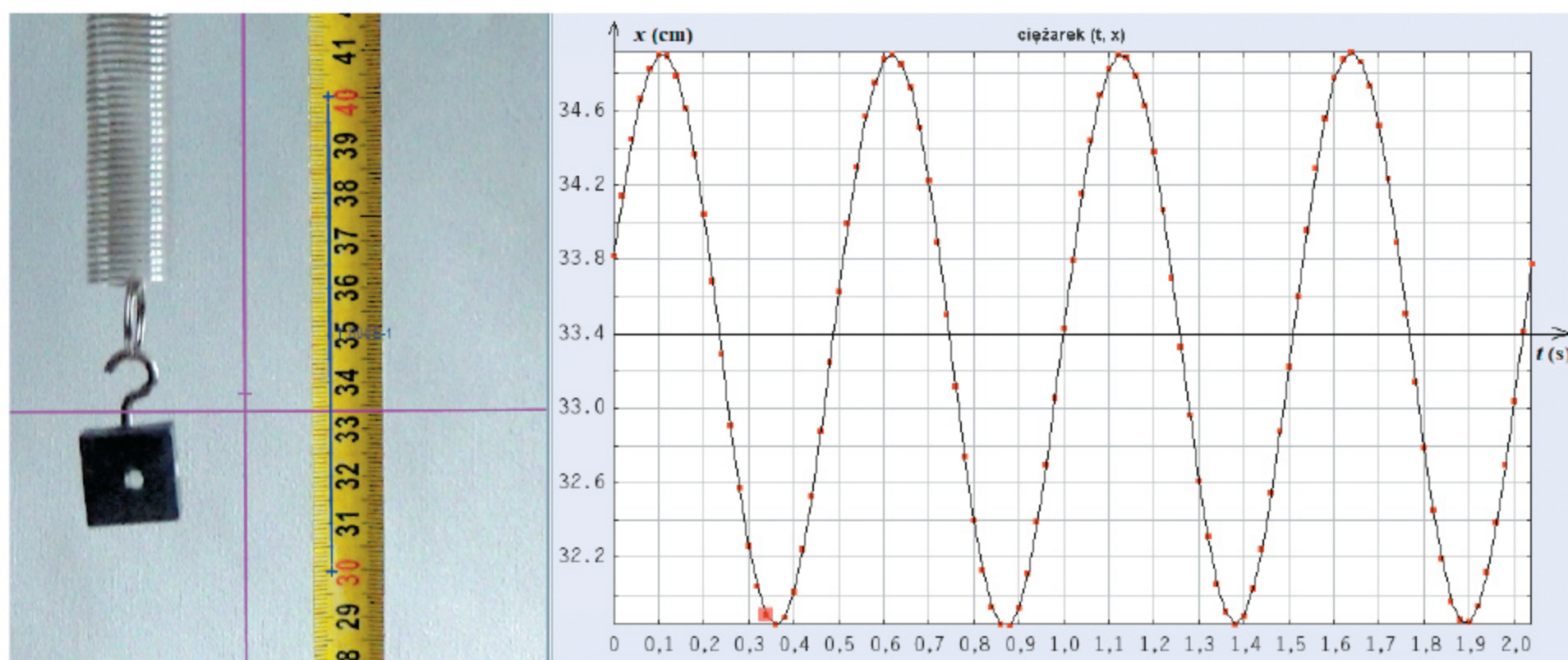
Szarpnięta stuna gitary, dziecko huśtające się na placu zabaw, trawa kołysząca się na wietrze czy atomy w ciałach stałych to przykłady ciał wykonujących ruch drgający.

Ryc. 1.1. Dziecko na koniku sprężynowym porusza się ruchem drgającym

Opis ruchu drgającego

s. 214

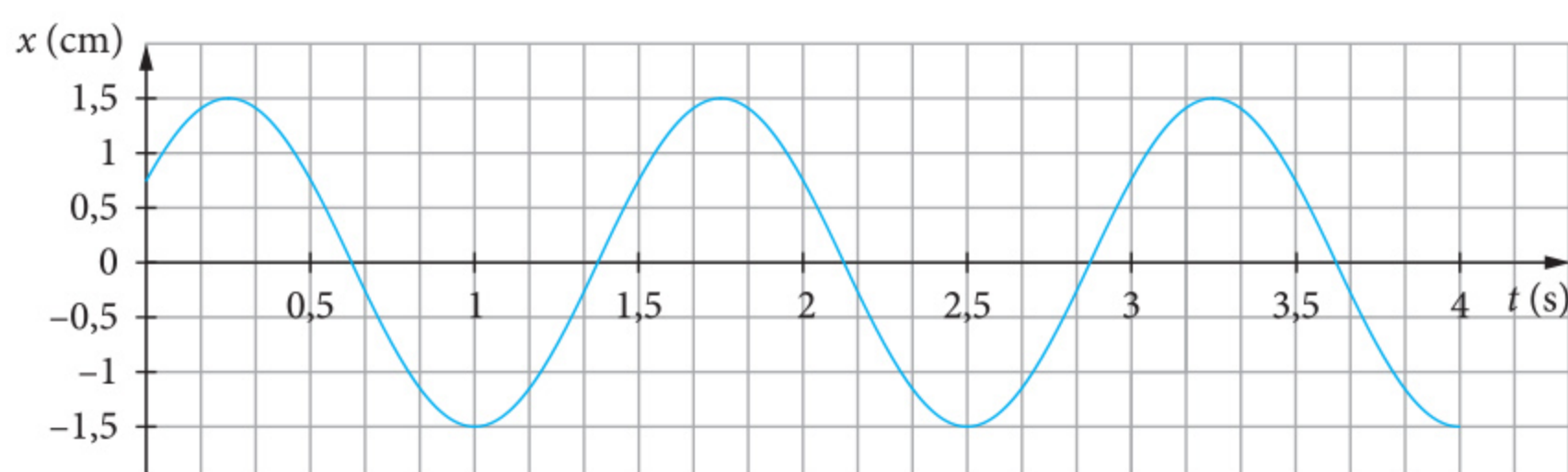
Przeanalizujemy wynik pewnego eksperymentu. Na sprężynie zawieszono ciężarek, a następnie wprowadzono go w ruch drgający. Drgania ciężarka zostały sfilmowane, a uzyskany plik wideo został przeanalizowany za pomocą programu Tracker. W programie tym utworzono wykres zależności położenia ciężarka od czasu (ryc. 1.2).



Ryc. 1.2. Wykres zależności położenia ciężarka od czasu, utworzony w programie Tracker. Czerwone kropki na wykresie to położenia ciężarka w poszczególnych chwilach

Pozioma linia na fotografii z ciężarkiem została poprowadzona przez punkt, w którym ciężarek był nieruchomy przed rozpoczęciem drgań. Jest to tzw. **położenie równowagi**. Drgania ciężarka odbywają się wokół tego punktu. Na wykresie na ryc. 1.2 x określa położenie ciała. Odległość od położenia równowagi do położenia skrajnego nazywamy **amplitudą**. Amplitudę oznaczamy literą A . Wygodnie jest przedstawiać zależność po-

łożenia ciężarka od czasu tak, by położenie równowagi miało współrzędną równą zero (ryc. 1.3). Wtedy x określa wychylenia ciała z położenia równowagi. Przyjmujemy, że wychylenia są dodatnie, gdy ciężarek znajduje się powyżej położenia równowagi, i ujemne, gdy znajduje się on poniżej. Gdy ruch odbywa się w kierunku poziomym, jako dodatnie wychylenia na ogół przyjmuje się te, gdy ciężarek znajduje się na prawo od położenia równowagi.



Ryc. 1.3. Zależność położenia od czasu, gdy położenie równowagi ma współrzędną zero

Czas jednego pełnego cyklu zmian nazywamy **okresem T** . **Częstotliwość f** to liczba pełnych drgań wykonanych w jednostce czasu. Częstotliwość jest równa odwrotności okresu drgań:

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

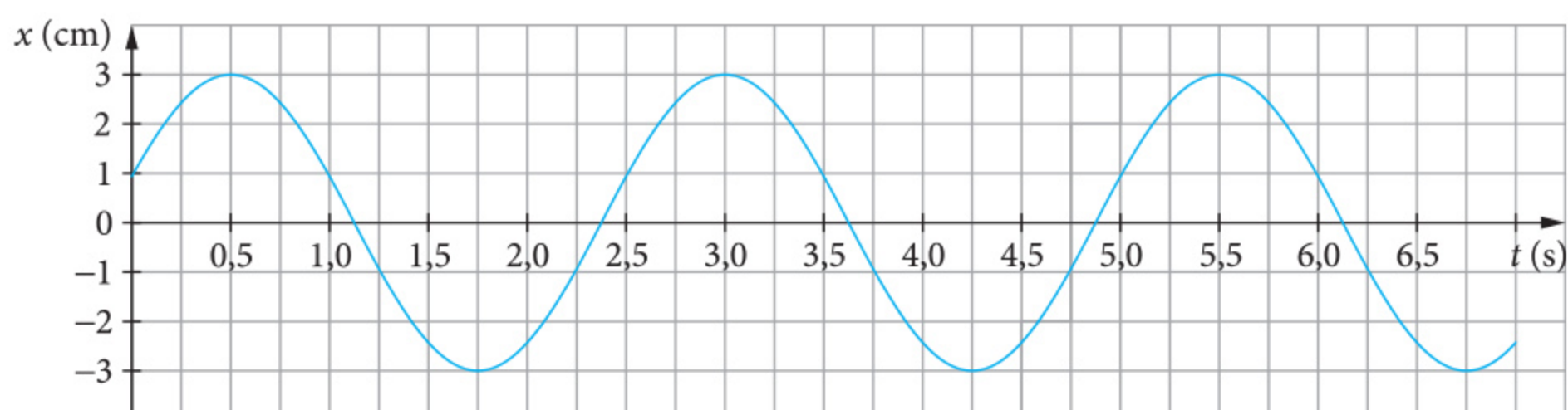
Jednostką częstotliwości jest herc (Hz).

Z wykresu na ryc. 1.2 można odczytać, że okres drgań ciężarka jest równy $(0,51 \pm 0,02)$ s (program Tracker odczytuje położenie ciała w odstępie 0,02 s – stąd taka dokładność wyznaczania okresu). Wobec tego częstotliwość drgań ciężarka jest równa prawie 2 Hz.

Ruch drgający to ruch okresowy wokół położenia równowagi.

PRZYKŁAD 1.

Na wykresie przedstawiono uproszczoną zależność położenia od czasu szałwika, który unosząc się na falach, wykonuje drgania. Odczytajmy z wykresu amplitudę oraz okres drgań.



Amplituda to maksymalna odległość drgającego ciała od położenia równowagi. W przypadku opisanych drgań wynosi ona 3 cm. Gdy $t = 0,5$ s, szałwik osiąga skrajne górne położenie. Taka sama faza ruchu występuje również w chwili $t = 3,0$ s i później w chwili $t = 5,5$ s. Wobec tego w czasie 5 s szałwik wykonuje dwa pełne drgania. Oznacza to, że okres drgań jest równy 2,5 s.

**DOŚWIADCZENIE 1.**

Przytwierdź jeden koniec „miękkiej” sprężyny (możesz użyć również gumki recepturki) do krawędzi stołu. Na drugim końcu sprężyny zamocuj spory kawałek plasteliny lub inny niezbyt lekki przedmiot. Unieś lekko obciążony koniec sprężyny w górę (ale tak, aby sprężyna była wciąż naprężona) i puść swobodnie. Zaobserwuj ruch plasteliny w górę i w dół, a następnie wyznacz okres jej drgań. Najlepiej zmierz czas dziesięciu pełnych drgań – to zwiększy dokładność pomiaru. Teraz zmień początkowe wychylenie plasteliny z położenia równowagi i ponownie wyznacz okres drgań. Pomiarów powtórz dla kilku różnych położań początkowych. Oszacuj niepewność pomiarową okresu.

Czy po uwzględnieniu niepewności pomiarowych możesz stwierdzić, że okres drgań plasteliny zależy od amplitudy?

Dla niezbyt dużych wychyleń z położenia równowagi okres drgań ciała nie zależy od amplitudy. Skoro okres drgań pozostaje stały, to wraz ze wzrostem amplitudy drgań rośnie prędkość średnia ciała w ruchu pomiędzy skrajnymi położeniami.

Prędkość w ruchu drgającym

Wartość prędkości obliczamy jako stosunek przebytej drogi do czasu, w którym została ona przebyta. Wobec tego wartość prędkości chwilowej drgającego ciała można obliczyć ze wzoru:

$$v = \frac{|\Delta x|}{\Delta t}$$

gdzie:

Δx – różnica wychyleń,

Δt – odstęp (przyrost) czasu, który powinien być bardzo mały.

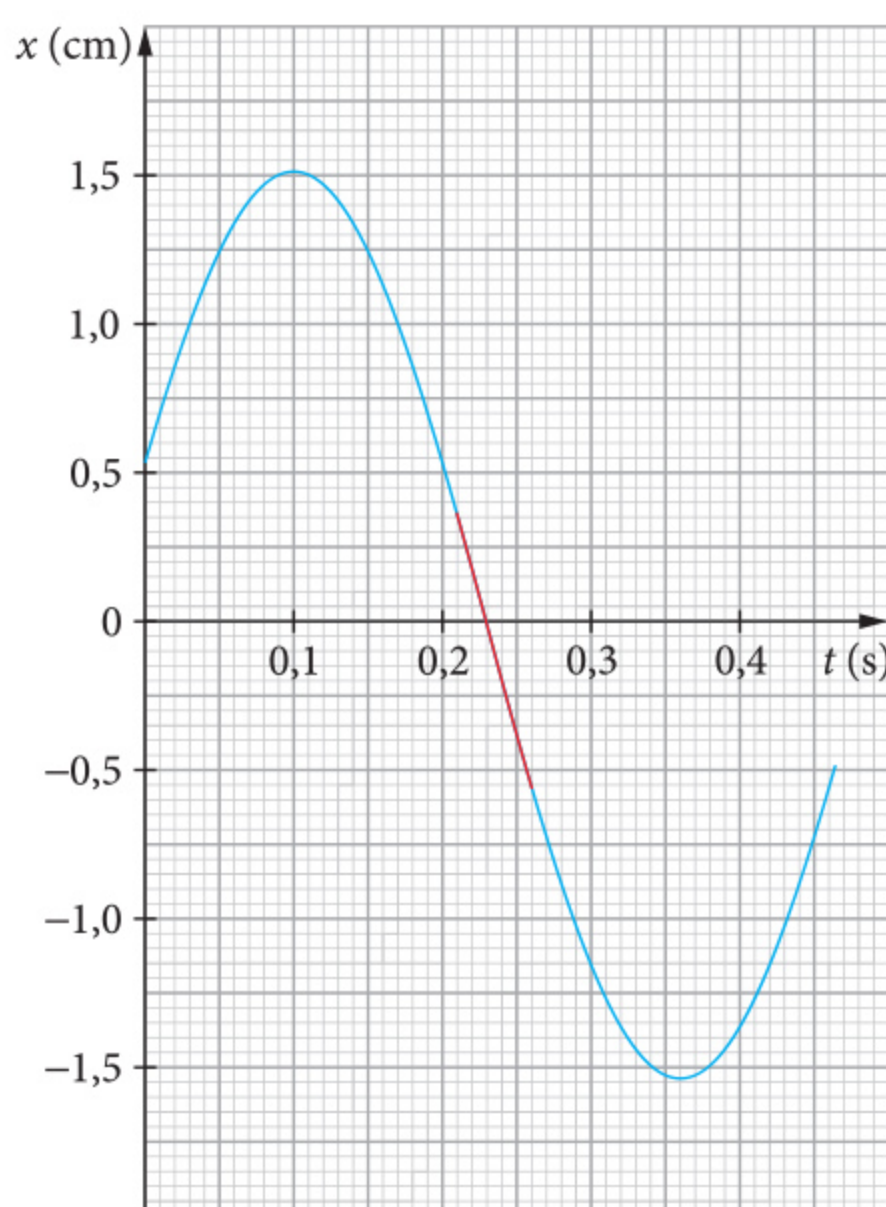
Spójrzmy jeszcze raz na rycinę 1.2. Odstępy czasu, w których rejestrowano kolejne położenia ciężarka, były jednakowe i wynosiły 0,02 s. Im dalej od położenia równowagi znajduje się ciężarek, tym mniejsze są odległości między sąsiednimi położeniami. Oznacza to, że w pobliżu skrajnych wychyleń ciężarek porusza się wolniej niż w pobliżu położenia równowagi. Gdy ciężarek mija skrajne położenie, zmienia się zwrot wektora jego prędkości. Wobec tego w punktach $x = \pm A$ ciężarek ma prędkość równą zero. Po minięciu skrajnego położenia ciężarek porusza się z coraz większą prędkością, a największą prędkość osiąga w położeniu równowagi. Od tego momentu jego prędkość maleje aż do zera w położeniu krańcowym. Ruch ciężarka jest zatem niejednostajny: prędkość jest maksymalna podczas przechodzenia przez położenie równowagi i maleje do zera w położeniach skrajnych. Z tego powodu zależność położenia ciężarka od czasu nie jest liniowa. Jednak odpowiednio mały fragment ruchu drgającego można z dobrym przybliżeniem potraktować jako ruch jednostajny. Na rycinie 1.4 przedstawiono zależność położenia od czasu tylko dla jednego cyklu drgań ciężarka. Od chwili $t = 0,21$ s do chwili $t = 0,26$ s wykres zależności położenia od czasu można przybliżyć odcinkiem linii prostej i ruch potraktować jako jednostajny. W tym czasie ciężarek przebył drogę około 0,9 cm, więc

jego prędkość chwilowa w momencie mijania położenia równowagi wynosi:

$$v = \frac{|\Delta x|}{t} = \frac{0,9 \text{ cm}}{0,05 \text{ s}} \approx 18 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Warto zwrócić uwagę na jeszcze jeden fakt. Gdyby przy niezmienionej amplitudzie okres drgań był dwukrotnie krótszy, to wyznaczony przez nas czas przebycia takiego samego odcinka drogi też byłby dwukrotnie krótszy, a więc wyznaczona prędkość byłaby dwa razy większa. Oznacza to, że prędkość, z jaką drgające ciało mija położenie równowagi, jest tym większa, im krótszy jest okres drgań ciała (i im większa jest częstotliwość drgań).

Ruch drgający, w którym położenie i prędkość zmieniają się tak jak w przypadku opisanego przez nas ciężarka na sprężynie, nazywamy **ruchem harmonicznym**.



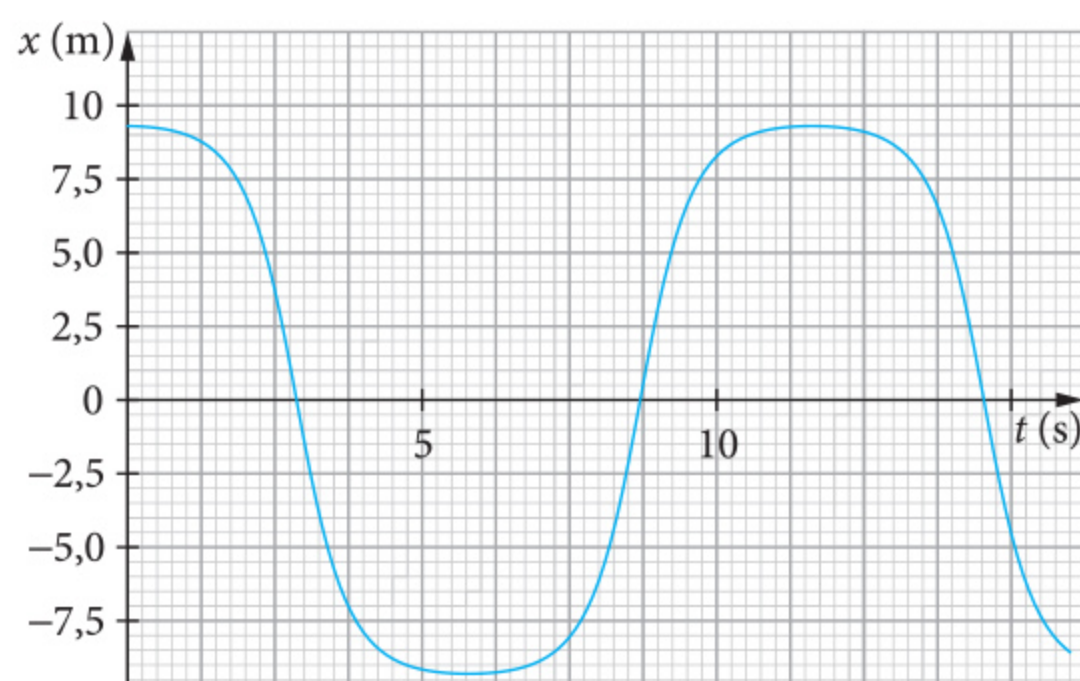
Ryc. 1.4. Zaznaczony kolorem czerwonym fragment ruchu ciężarka zawieszonego na sprężynie można uznać za ruch jednostajny



WARTO WIEDZIEĆ

Ekstremalna huśtawka

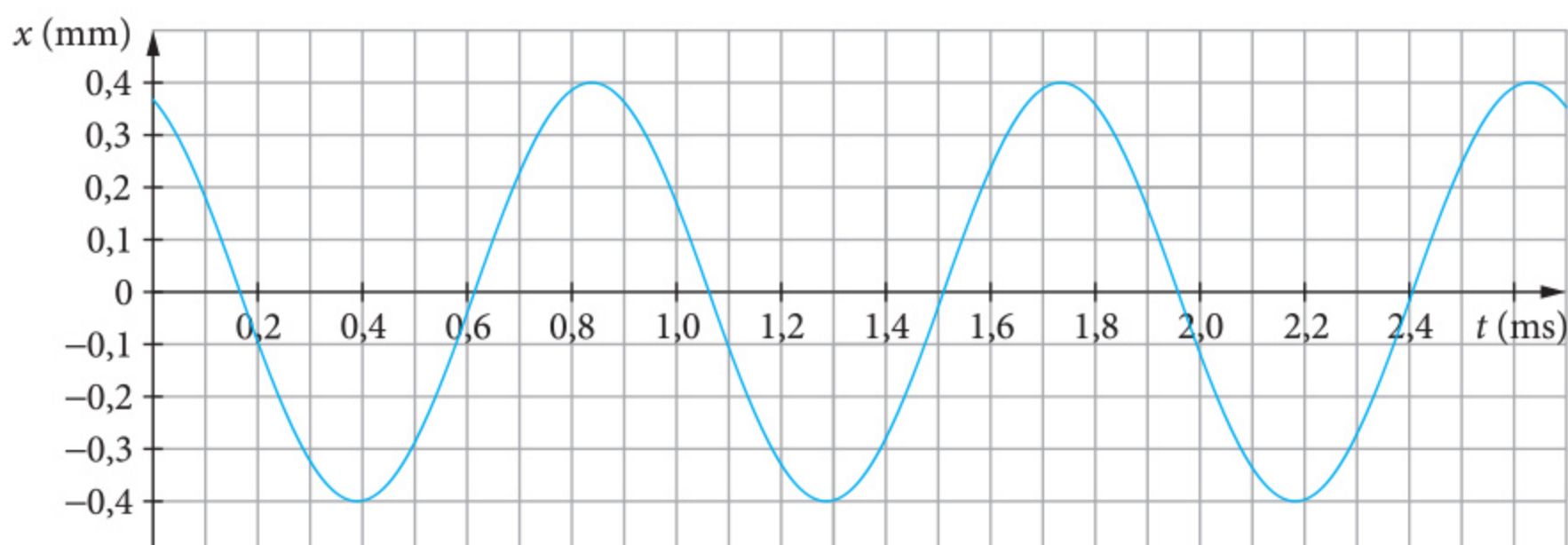
Jednak nie wszystkie drgania są harmoniczne. Spójrzmy na przykład na ruch ekstremalnie huśtającej się osoby. Przy dużych wychyleniach, gdy huśtawka przyjmuje pozycję prawie pionową, jej prędkość przez dłuższy czas jest bardzo mała. Wykres zależności wychylenia (mierzonego wzdłuż toru ruchu) huśtawki od czasu (ryc. 1.5) jest inny niż wykres dla ciężarka przedstawiony na rycinie 1.2. Wobec tego huśtawka porusza się ruchem drgającym, ale nieharmonicznym.



Ryc. 1.5. Huśtawka poruszająca się z bardzo dużą amplitudą i wykres zależności jej wychylenia od czasu. Nie jest to ruch harmoniczny

PRZYKŁAD 2.

Na wykresie przedstawiono zależność położenia od czasu dla fragmentu struny wytrąconej z położenia równowagi.



Na podstawie tego wykresu wyznaczmy:

- amplitudę, okres i częstotliwość drgań;
- maksymalną prędkość fragmentu struny w tym ruchu.

a) Z wykresu odczytujemy, że:

$$A = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

$$T \approx 0,9 \text{ ms}.$$

- b) Z wykresu wynika, że w chwili 0,1 ms fragment struny znajdował się w odległości około $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ w górę od położenia równowagi, a w chwili 0,25 ms w odległości około $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ w dół od położenia równowagi. Oznacza to, że w czasie 0,15 ms fragment struny przebył odległość $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Wobec tego jego maksymalna prędkość wynosi:

$$v = \frac{0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,15 \cdot 10^{-3} \text{ s}} \approx 2,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



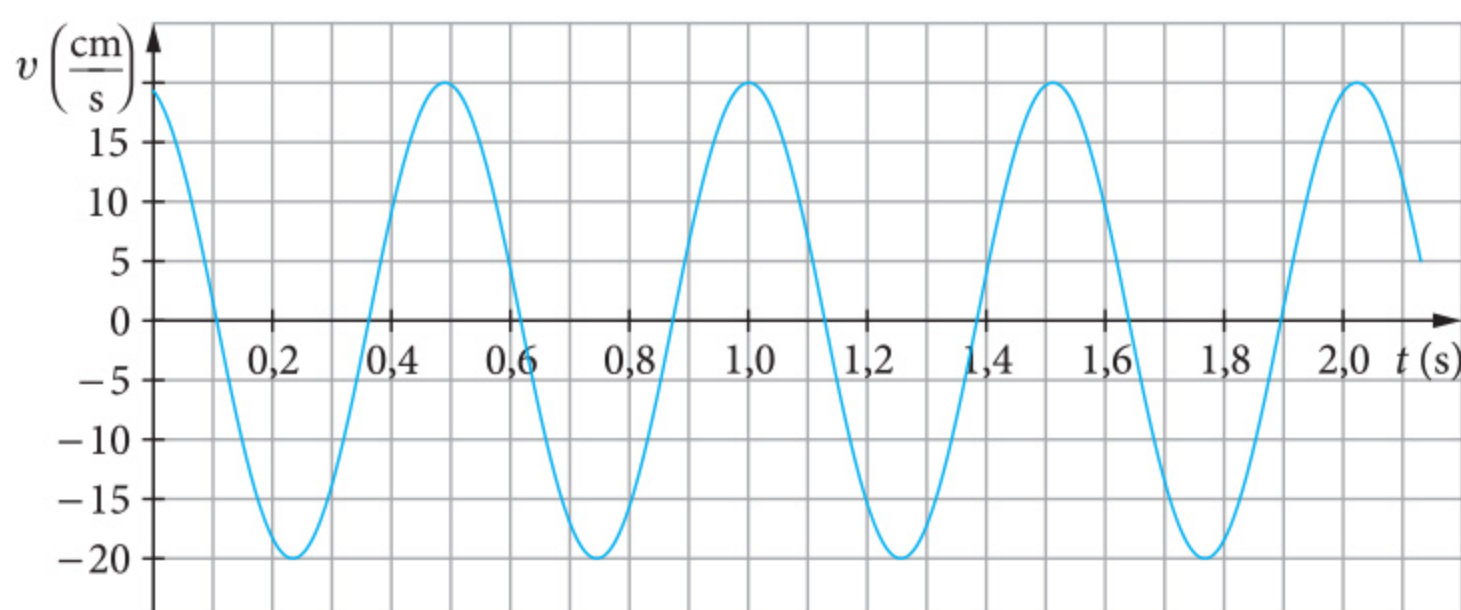
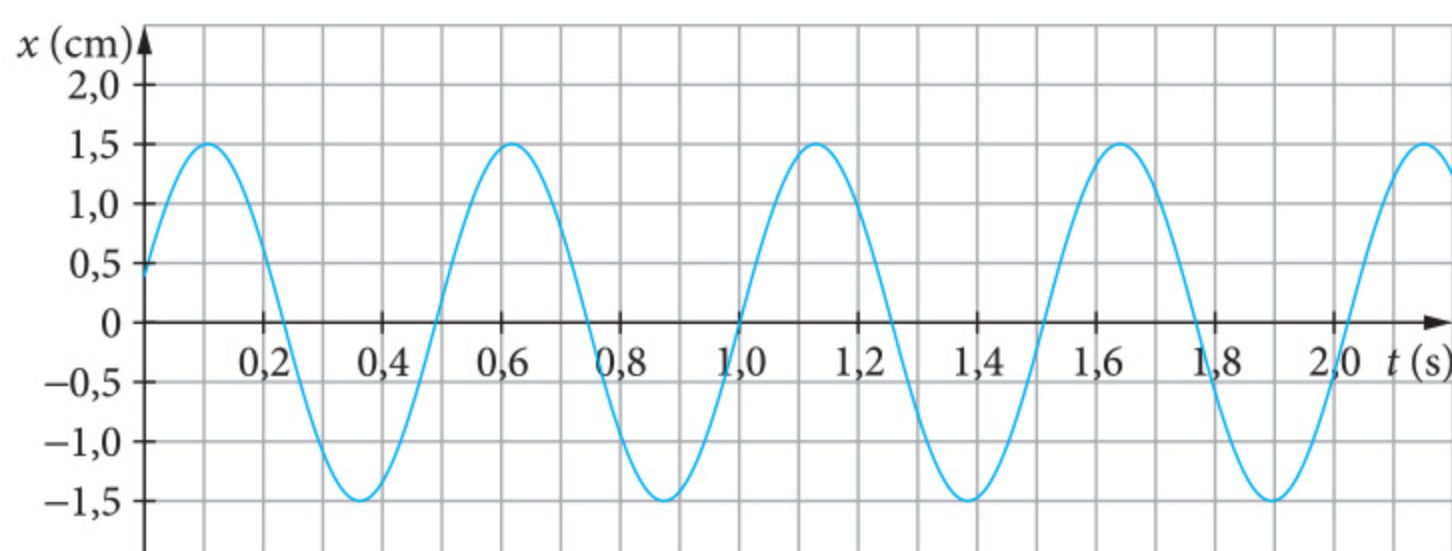


WARTO WIEDZIEĆ

Wykresy $x(t)$ i $v(t)$ w ruchu drgającym

Gdy dokonamy analizy ruchu drgającego za pomocą programu Tracker, to oprócz wykresu zależności położenia od czasu możemy otrzymać wykres zależności prędkości od czasu. W chwilach, w których położenie zmienia się wolno, prędkość jest bliska zeru. Natomiast gdy zmiany położenia są duże, osiąga ona największe wartości. Na takim wykresie ujemna prędkość oznacza ruch w dół, dodatnia – ruch w górę.

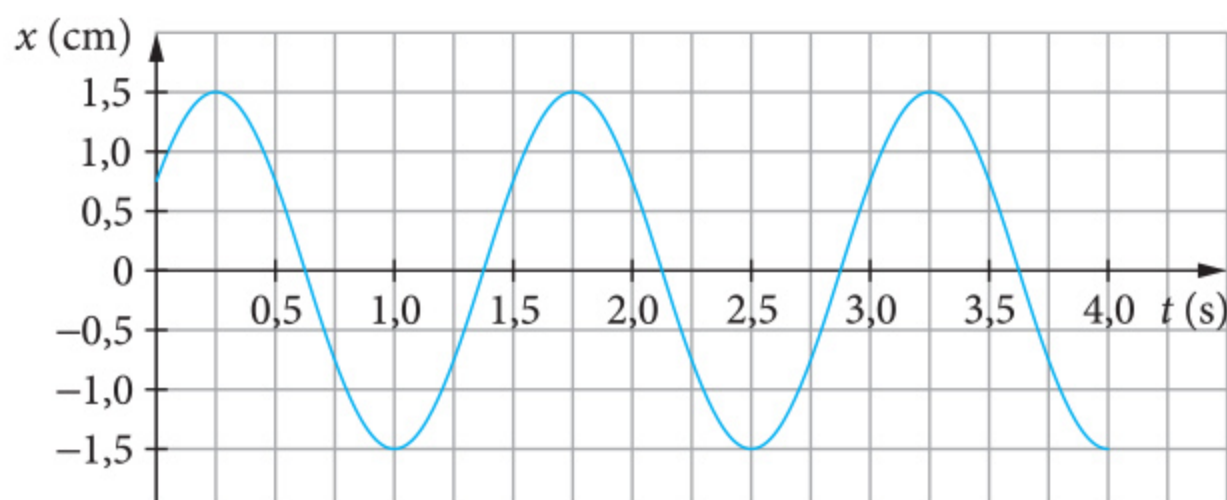
Warto zwrócić uwagę na to, że w ruchu drgającym zależność prędkości od czasu jest bardzo podobna do zależności położenia od czasu, tyle że wykres prędkości jest przesunięty w lewo o jedną czwartą okresu w stosunku do wykresu położenia.

**PODSUMOWANIE**

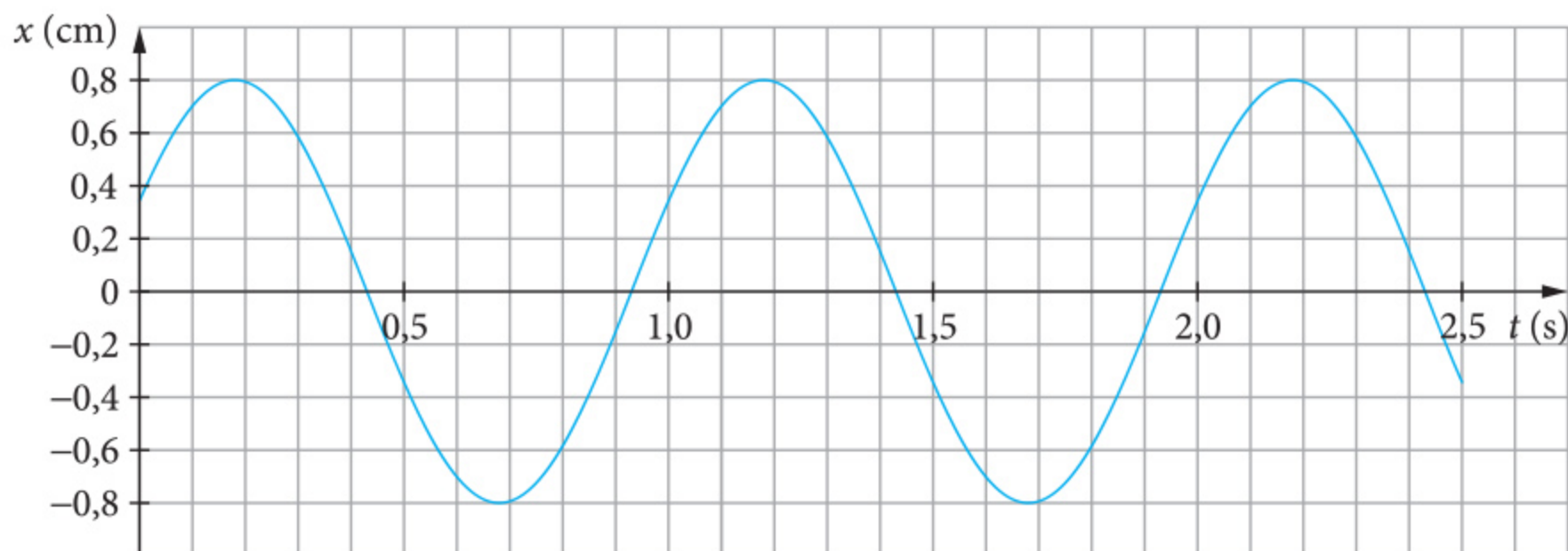
- ▶ **Ruch drgający** jest ruchem okresowym wokół położenia równowagi (czyli miejsca, w którym znajdowałoby się ciało, gdyby nie drgało).
- ▶ **Okres drgań T** to czas jednego pełnego drgania.
- ▶ **Częstotliwość drgań f** to liczba pełnych drgań wykonanych w jednostce czasu.
- ▶ **Amplituda A** to odległość skrajnego wychylenia od położenia równowagi.
- ▶ Prędkość ciała w ruchu drgającym jest maksymalna, gdy ciało przechodzi przez położenie równowagi, i jest równa zero w skrajnych wychyleniach.

PYTANIA I ZADANIA

1. Na wykresie przedstawiono zależność położenia od czasu dla pewnego ciała.



- Z wykresu odczytaj i zapisz w zeszycie amplitudę oraz okres drgań.
 - Oblicz częstotliwość tych drgań.
2. Muchy pewnego gatunku machają skrzydłami z częstotliwością 64 Hz. Załóżmy, że ruch końców skrzydeł muchy można uznać za harmoniczny. Oblicz czas, w jakim końce skrzydeł tej muchy przemieszczają się od dolnego skrajnego wychylenia do górnego skrajnego wychylenia.
3. Kulka zawieszona na sprężynie porusza się ruchem drgającym o amplitudzie 0,75 cm. Okres drgań tej kulki jest równy 1,6 s. Oblicz:
- drogę pokonaną przez kulkę w czasie jednego pełnego okresu drgań;
 - czas, w jakim kulka przebędzie odległość między skrajnymi położeniami.
4. Na sprężynie zawieszono ciężarek i wprowadzono go w drgania o amplitudzie 2,4 mm oraz częstotliwości 0,9 Hz. Jaka będzie częstotliwość drgań tego ciężarka, gdy amplituda drgań będzie równa 1,2 mm? Uzasadnij odpowiedź.
5. Na wykresie przedstawiono zależność położenia od czasu dla ciężarka zawieszonego na sprężynie. Na podstawie wykresu wyznacz prędkość ciężarka, gdy przechodzi on przez położenie równowagi.





2. Siły w ruchu drgającym

- Sprężystość ciał
- Siły w ruchu drgającym
- Okres drgań ciała zawieszonego na sprężynie

→ **Przypomnij sobie** zasady dynamiki i wiadomości o sile sprężystości.

Ruch drgający jest ruchem zmiennym. Ciało porusza się ruchem zmiennym, gdy wypadkowa działających na nie sił jest różna od zera. W tym rozdziale przyjrzymy się bliżej siłom powodującym drgania ciał.

Sprężystość ciał

Gdy rozciągniemy sprężynę, a później ją puścimy, sprężyna sama wraca do stanu przed rozciągnięciem. Takie odkształcenie nazywamy **sprężystym**.

Odkształcone sprężyste ciało działa siłą na inne ciało do niego przymocowane. Wartość tej siły jest wprost proporcjonalna do odkształcenia. Na przykład rozciągnięta sprężyna ciągnie ciężarek w stronę umożliwiającą powrót sprężyny do stanu nieodkształconego (ryc. 2.1).

Zauważmy, że zgodnie z III zasadą dynamiki sile $\vec{F}$, jaką sprężyna ciągnie ciężarek, towarzyszy siła $-\vec{F}$, jaką ciężarek ciągnie sprężynę. Siły te oczywiście mają taką samą wartość.

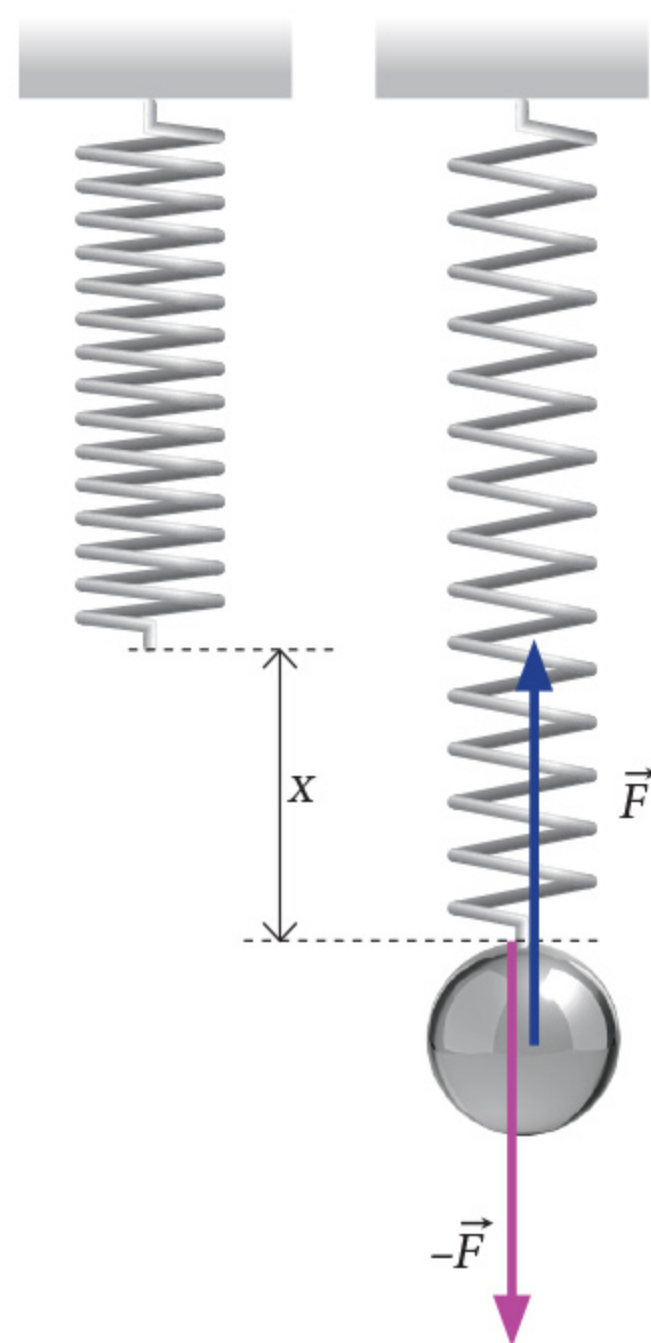
Odkształcenie sprężyny i siła powodująca to odkształcenie są do siebie proporcjonalne (dla niewielkich odkształceń). Można to przedstawić za pomocą wzoru:

$$F = k \cdot x \quad (1)$$

gdzie:

k – współczynnik sprężystości sprężyny,

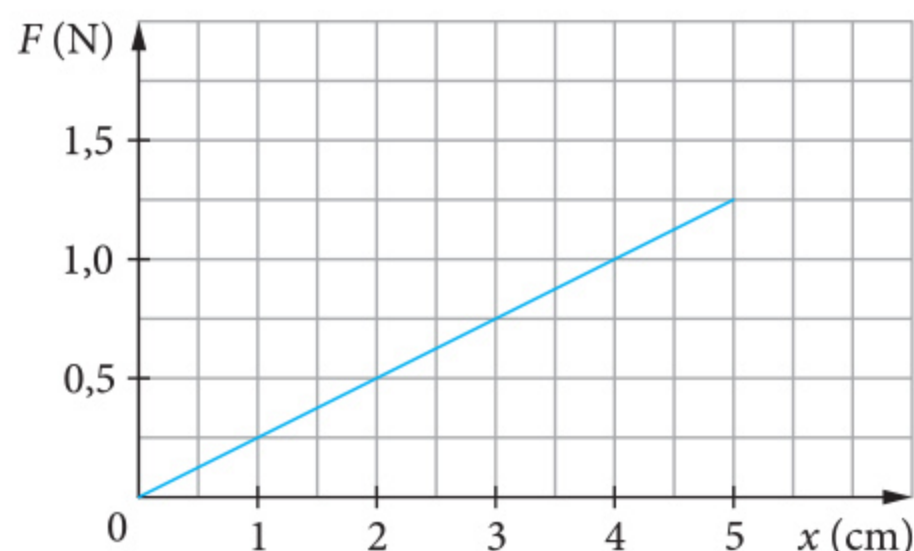
x – odkształcenie sprężyny (wydłużenie lub skrócenie).



Ryc. 2.1. Ciężarek działa na sprężynę siłą powodującą jej wydłużenie. Sprężyna działa na ciężarek siłą o tej samej wartości, skierowaną w górę

PRZYKŁAD 1.

Na wykresie przedstawiono zależność wartości siły od odkształcenia dla pewnej sprężyny. Na podstawie tego wykresu wyznaczmy współczynnik sprężystości sprężyny.



Z wykresu odczytujemy, że siłę 1,0 N odpowiada odkształcenie 4,0 cm. Po podstawieniu danych do przekształconego wzoru (1) otrzymujemy:

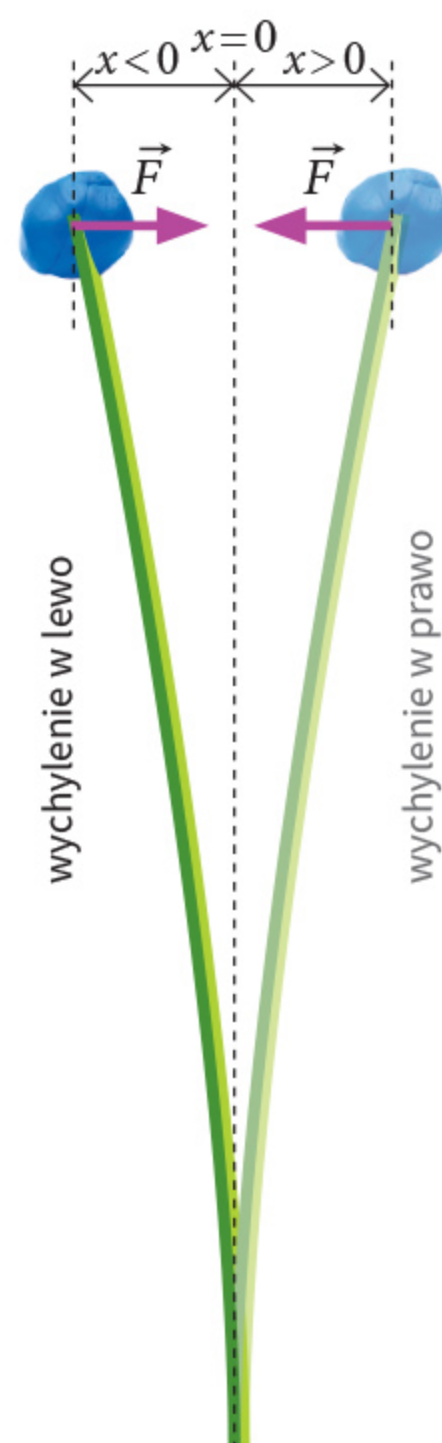
$$k = \frac{F}{x} = \frac{1 \text{ N}}{4 \text{ cm}} = 0,25 \frac{\text{N}}{\text{cm}}$$

Siły w ruchu drgającym

Przeanalizujmy ruch sporego kawałka plasteliny umieszczonego na końcu sprężystej linijki zamocowanej pionowo (ryc. 2.2). W tej pozycji siły działające na plastelinę się równoważą. Jeżeli lekko odchylimy koniec linijki z plasteliną w prawą stronę, linijka dzięki swej sprężystości będzie działać na plastelinę siłą w lewo. Gdy puścimy plastelinę, to rozpoczną się drgania wokół położenia równowagi. W każdym położeniu, z wyjątkiem położenia równowagi, siła działająca na plastelinę będzie skierowana przeciwnie do jej wychylenia.

Siła wypadkowa powodująca ruch drgający ciała jest skierowana przeciwnie do wychylenia ciała z położenia równowagi.

W opisanym przykładzie, a także w wielu innych, gdy **ruch drgający jest skutkiem odkształcenia sprężystego jakiegoś ciała**, **wartość siły wypadkowej jest wprost proporcjonalna do odległości ciała od położenia równowagi**. Jest to cecha ruchu harmonicznego.



Ryc. 2.2. Kulka z plasteliny porusza się ruchem drgającym pod działaniem siły pochodzącej od odkształconej linijki

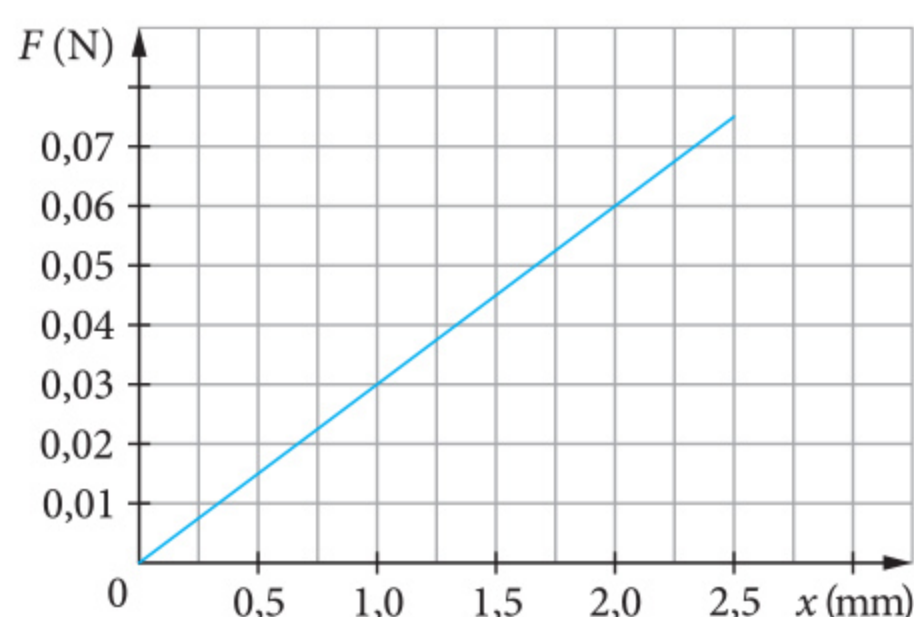
Zgodnie z II zasadą dynamiki, gdy wypadkowa sił działających na ciało jest różna od zera, to ciało porusza się z przyspieszeniem. Siła pochodząca od wygiętej linijki jest zarazem siłą wypadkową, bo ciężar plasteliny jest zrównoważony siłą nacisku lub tarcia pochodzącą od linijki (pomijamy skutki niewielkiego odchylenia od pionu). Wobec tego plastelina ma pewne przyspieszenie. Skoro siła zmienia swoją wartość, zmienia się również przyspieszenie plasteliny.

PRZYKŁAD 2.

Na końcu linijki zamocowano plastelinę o masie 12 g. Wykres przedstawia zależność wartości siły wypadkowej działającej na plastelinę od jej wychylenia z położenia równowagi (dla uproszczenia rozważamy tylko wychylenia dodatnie). Siła i wychylenie mogą się zmieniać tylko w granicach przedstawionych na wykresie.

a) Jakie jest maksymalne przyspieszenie plasteliny?

b) Kiedy przyspieszenie jest równe zeru?



a) Z wykresu odczytujemy, że maksymalna siła powodująca ruch plasteliny ma wartość 0,075 N, więc maksymalne przyspieszenie jest równe:

$$a_{\max} = \frac{F_{\max}}{m} = \frac{0,075 \text{ N}}{12 \cdot 10^{-3} \text{ kg}} \approx 6,3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Plastelina osiąga maksymalne przyspieszenie $6,3 \text{ m/s}^2$ w skrajnym wychyleniu.

b) Przyspieszenie jest równe zeru, gdy plastelina przechodzi przez położenie równowagi. W tym położeniu siła wypadkowa jest równa zeru.

Ruch ciała zawieszonego na sprężynie

DOŚWIADCZENIE 1.

Przygotuj rozciągliwą sprężynę (możesz zastąpić ją gumką recepturką), kilka stalowych nakrętek oraz nić i stoper. Za pomocą nici przymocuj kilka nakrętek do sprężyny, a sprężynę przyczep do stołu. Wprowadź nakrętki w ruch drgający w kierunku pionowym. Wyznacz okres tych drgań. Najlepiej zmierz czas dziesięciu pełnych drgań – to zwiększy dokładność pomiaru. Następnie przymocuj do sprężyny kolejną porcję nakrętek i ponownie wyznacz okres drgań. Porównaj uzyskane wyniki. Czy okres drgań się zmienił, czy pozostał taki, jak poprzednio?



Z doświadczenia wynika, że **okres drgań ciężarka na sprężynie jest tym dłuższy, im większa jest jego masa**. Zależy on również od współczynnika sprężystości sprężyny. Im większy jest współczynnik sprężystości, tym krótszy jest okres drgań (scenariusz doświadczenia 1, s. 199).

s. 199

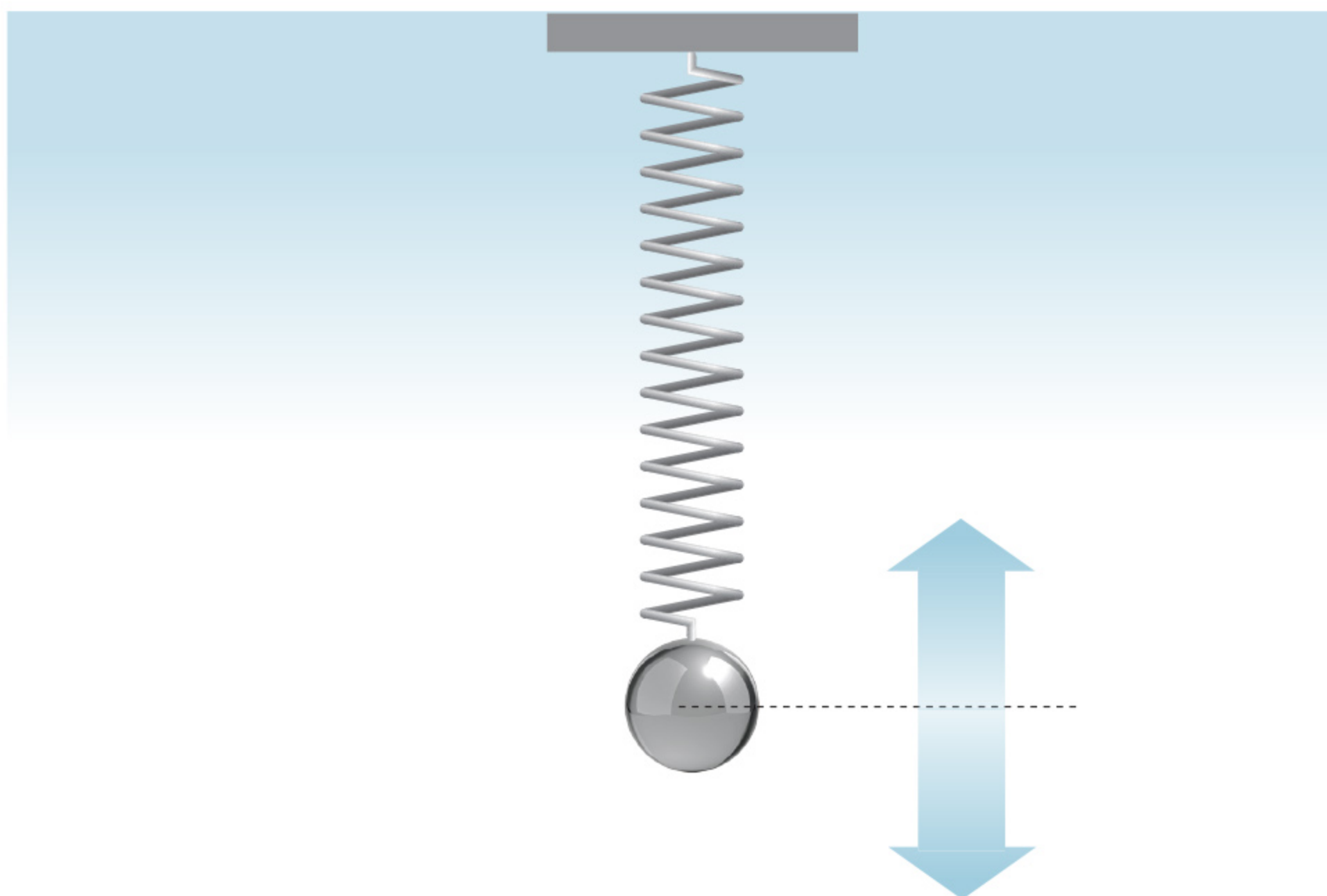
s. 211

Na zawieszony na sprężynie ciężarek cały czas działa siła ciężkości. Nie ma ona wpływu na okres drgań ciężarka, zmienia jedynie jego położenie równowagi.

Gdy masę sprężyny można pominąć, okres drgań ciała o masie m zawieszonego na sprężynie o współczynniku sprężystości k można obliczyć ze wzoru:

s. 209

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2)$$



Ryc. 2.3. Ruch ciężarka zawieszonego na sprężynie

PRZYKŁAD 3.

Na sprężynie zawieszono ciężarek o masie 50 g i wprowadzono go w drgania. Okres tych drgań był równy 0,6 s. Wyznaczmy współczynnik sprężystości sprężyny.

Przekształcamy wzór (2) na okres drgań ciała zawieszonego na sprężynie do postaci:

$$k = 4\pi^2 \cdot \frac{m}{T^2}$$

Po podstawieniu danych do wzoru otrzymujemy:

$$k = 4\pi^2 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{(0,6 \text{ s})^2} \approx 5,5 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

PODSUMOWANIE

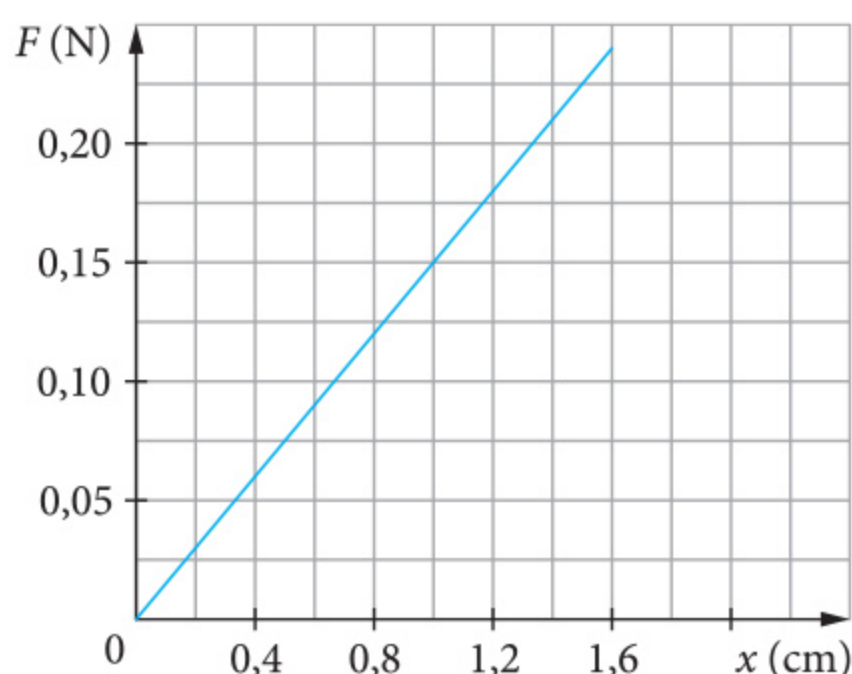
- ▶ Odształcenie ciała sprężystego jest wprost proporcjonalne do działającej siły.

$$F = k \cdot x$$

- ▶ Siła wypadkowa powodująca ruch drgający ciała ma zwrot przeciwny do wychylenia ciała z położenia równowagi; w przypadku ruchu harmonicznego jej wartość jest wprost proporcjonalna do odległości ciała od położenia równowagi.

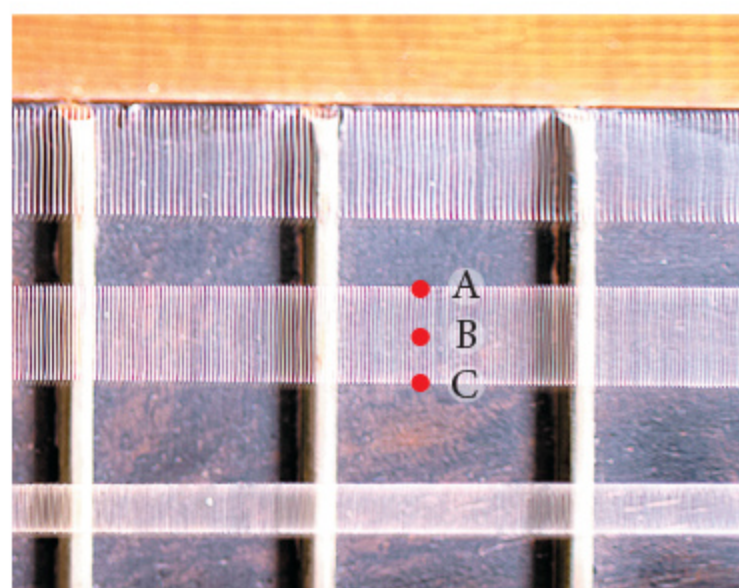
PYTANIA I ZADANIA

1. Na wykresie przedstawiono zależność siły wypadkowej działającej na drgający ciężarek o masie 40 g, przymocowany do sprężystej linijki, od jego wychylenia (w jedną stronę).



Na podstawie wykresu:

- a) wyznacz amplitudę drgań ciężarka oraz maksymalną siłę działającą na ciężarek;
 - b) oblicz maksymalne przyspieszenie ciężarka;
 - c) oblicz współczynnik sprężystości linijki.
2. Okres drgań ciężarka na sprężynie na Ziemi wynosi 1,8 s. Ile wynosi okres drgań tego samego ciężarka na tej samej sprężynie na Księżycu? Przyspieszenie grawitacyjne na Księżycu jest ok. 6 razy mniejsze niż na Ziemi.
 3. Małgosia zawiesiła ciężarek na sprężynie i wprawiła go w ruch drgający o amplitudzie 0,5 cm. Jak zmieni się maksymalna siła wypadkowa działająca na ciężarek, gdy amplituda drgań ciężarka wzrośnie do 1 cm?
 4. Na fotografii przedstawiono drgające struny gitary. W którym położeniu (A, B, C) przyspieszenie struny jest największe, a w którym najmniejsze?
 5. Gdy Adam powiesił na sprężynie ciężarek o masie 40 g, okres drgań tego ciężarka wynosił 1,2 s. Następnie Adam zawiesił na sprężynie jeszcze jeden ciężarek o masie 40 g. Czy okres drgań po dwukrotnym zwiększeniu masy również wzrośnie dwukrotnie? Uzasadnij odpowiedź. *Wskazówka:* Przeanalizuj wzór (2) zamieszczony na s. 16.





3. Energia w ruchu drgającym

- Energia kinetyczna w ruchu drgającym
- Energia sprężystości w ruchu drgającym
- Zachowanie energii w ruchu drgającym

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o energii grawitacji, kinetycznej, mechanicznej i sprężystości oraz zasadę zachowania energii.

Zasada zachowania energii jest prawem mającym zastosowanie we wszystkich zjawiskach fizycznych. Przeanalizujemy przemiany energii występujące w ruchu drgającym z wykorzystaniem tej zasady.

Energia kinetyczna w ruchu drgającym

Każde poruszające się ciało ma energię kinetyczną. Energię kinetyczną obliczamy ze wzoru:

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

gdzie:

m – masa poruszającego się ciała, v – prędkość ciała.

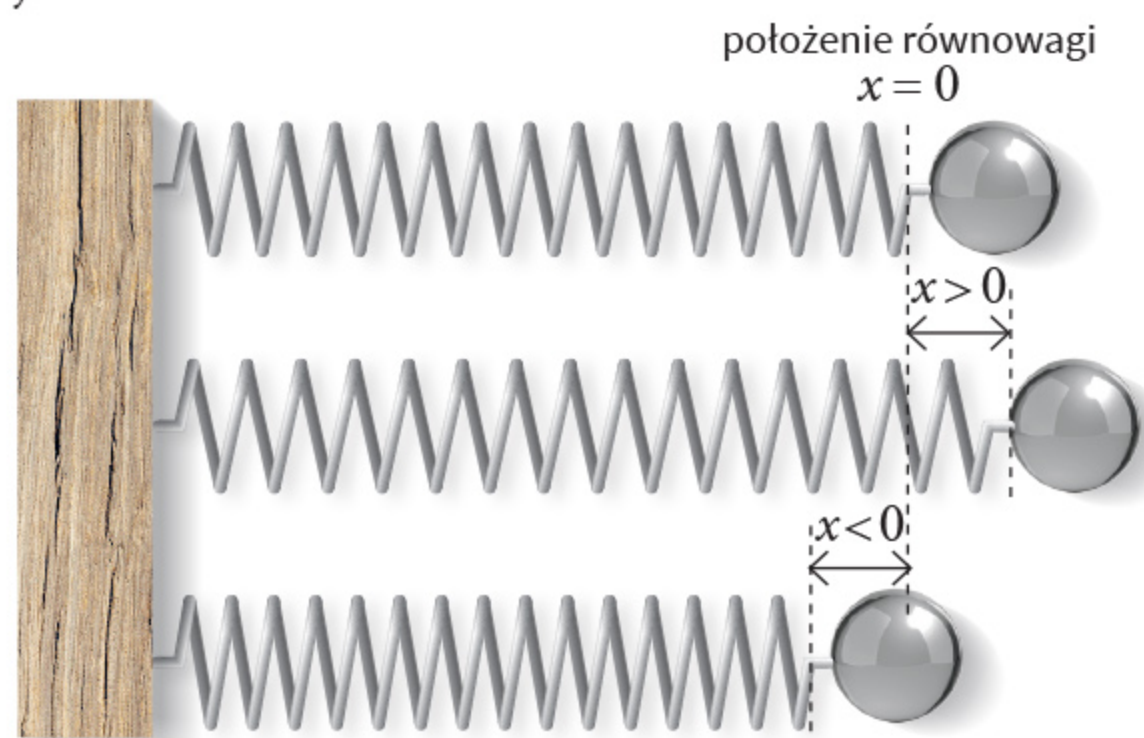
Podczas ruchu drgającego zmieniają się wartość oraz zwrot wektora prędkości poruszającego się ciała. Prędkość jest największa, gdy ciało przechodzi przez położenie równowagi, a równa zero, gdy ciało znajduje się w skrajnym położeniu. Stąd wynika, że energia kinetyczna ciała jest równa zero w punktach maksymalnego wychylenia, a największa – w momencie przejścia przez położenie równowagi.

Energia sprężystości w ruchu drgającym

Ciężarek przymocowany do sprężyny i wychylony z położenia równowagi wykonuje drgania. Podczas ruchu sprężyna jest na przemian rozciągana i ściskana (ryc. 3.1). Działa ona na przymocowany do niej ciężarek siłą zwróconą w stronę położenia równowagi, ponieważ dąży do przywrócenia pierwotnego kształtu. Odkształcona sprężyna ma energię potencjalną sprężystości, której wartość zależy od rodzaju tej sprężyny oraz od wielkości odkształcenia. **Im większe odkształcenie, tym większa energia sprężystości.**

W czasie, gdy sprężyna drga, jej odkształcenie jest równe wychyleniu i nieustannie się zmienia. Energia sprężystości zmienia się wraz z odkształceniem. Energia ta jest największa dla największych odkształceń, natomiast jest równa zero wówczas, gdy sprężyna nie

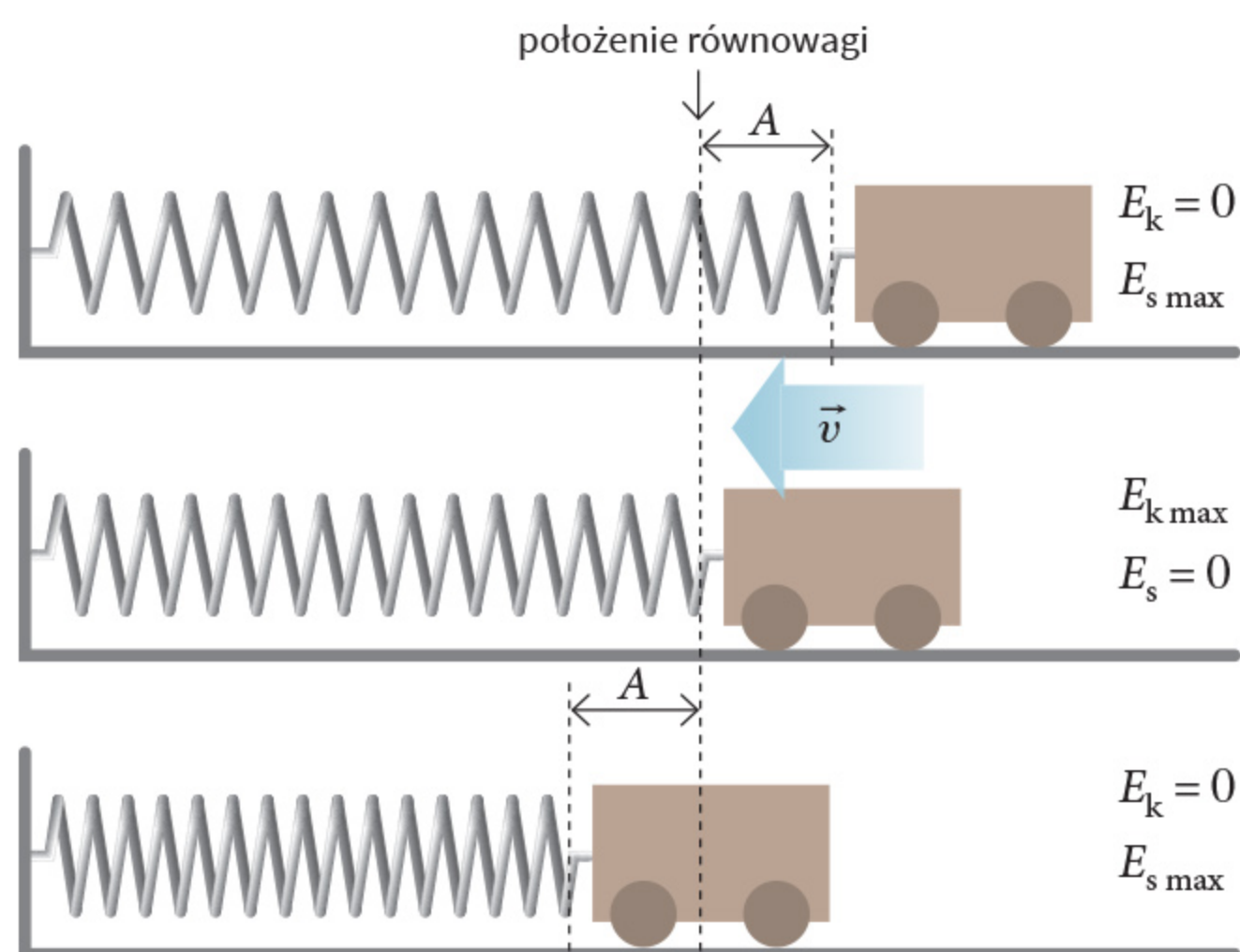
jest odkształcona. Wobec tego energia sprężystości jest największa, gdy wychylenie jest największe ($x = \pm A$). Gdy ciało mija położenie równowagi ($x = 0$), energia sprężystości jest równa zero.



Ryc. 3.1. W czasie ruchu drgającego sprężyna jest na przemian rozciągana i ściskana. Wychylenie przyjmujemy jako dodatnie lub ujemne

Przemiany energii w ruchu drgającym

Przeanalizujemy przemiany energii występujące podczas drgań wózka przymocowanego do sprężyny (ryc. 3.2). Gdy wózek jest wychylony maksymalnie w prawo, jego energia kinetyczna jest równa zero. Sprężyna jest wtedy maksymalnie rozciągnięta, więc jej energia sprężystości jest maksymalna. Gdy wózek zaczyna poruszać się w lewo, rośnie jego energia kinetyczna, a jednocześnie maleje energia sprężystości. Gdy wózek mija położenie równowagi, jego energia kinetyczna jest największa. W tym położeniu energia sprężystości jest równa zero, gdyż sprężyna nie jest odkształcona. Podczas dalszego ruchu w lewo maleje prędkość, a rośnie odkształcenie – maleje więc energia kinetyczna, a rośnie energia sprężystości. W skrajnym lewym położeniu energia kinetyczna jest równa zero, a energia sprężystości jest maksymalna.



Ryc. 3.2. Przemiany energii podczas ruchu wózka zamocowanego na końcu sprężyny

Energia mechaniczna wózka ze sprężyną jest równa sumie energii kinetycznej oraz energii sprężystości. **Jeśli pomijamy opory ruchu, energia mechaniczna drgającego układu nie zmienia się.** Gdy energia kinetyczna jest równa zero, energia mechaniczna jest równa energii sprężystości. Zatem na podstawie zasady zachowania energii można stwierdzić, że energia mechaniczna ciężarka ze sprężyną jest równa maksymalnej energii sprężystości (wówczas energia kinetyczna wynosi zero). Gdy energia sprężystości jest równa zero, energia mechaniczna składa się tylko z energii kinetycznej. Innymi słowy energia mechaniczna jest także równa maksymalnej energii kinetycznej.

PRZYKŁAD 1.

Energia drgań plasteliny na linijce jest równa 7,8 J. Ustalmy maksymalną energię kinetyczną oraz maksymalną energię sprężystości. Następnie obliczmy energię sprężystości w chwili, gdy energia kinetyczna wynosi 3,4 J.

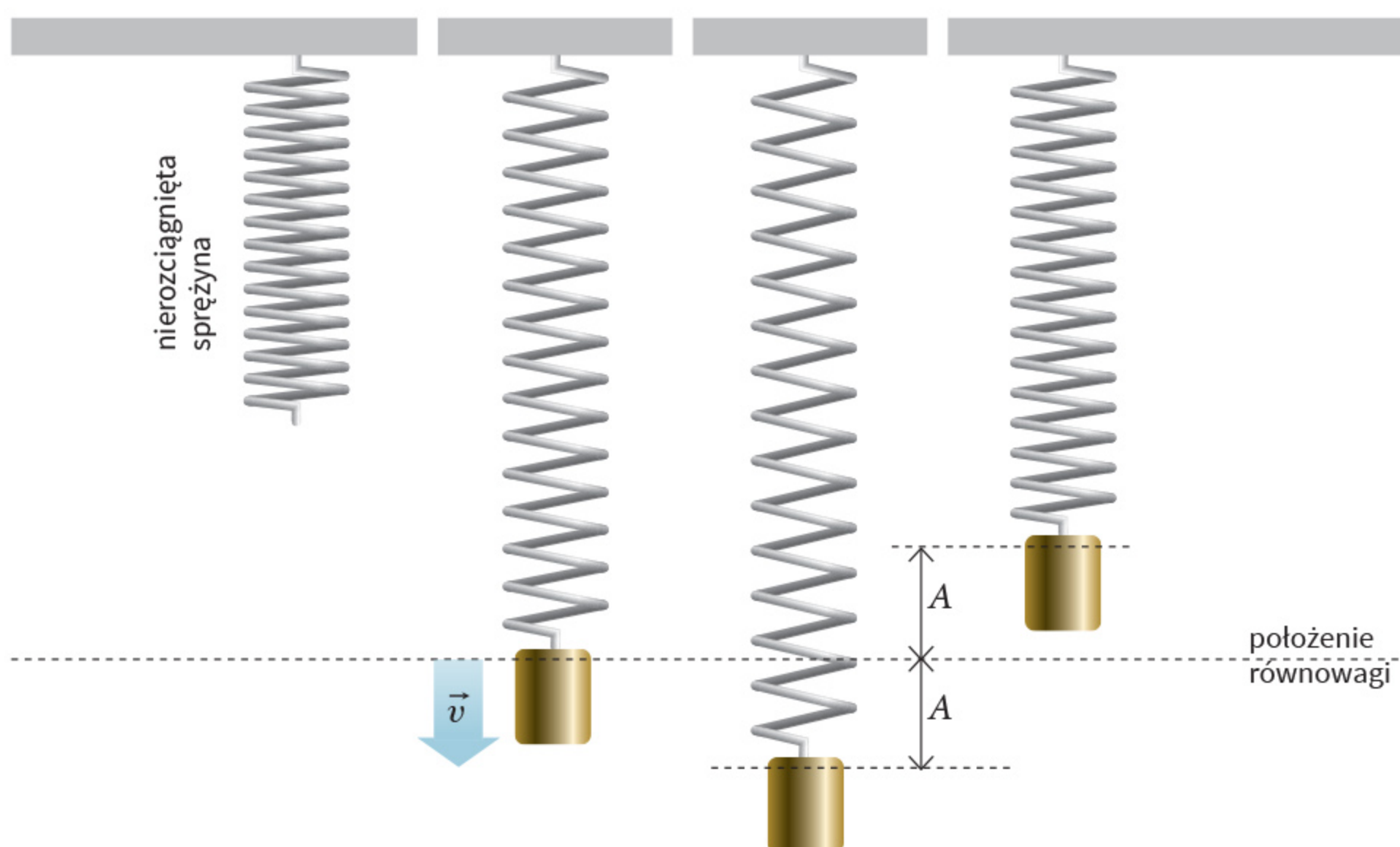
Obie energie (kinetyczna i sprężystości) są największe, gdy druga z nich jest równa zero. Wobec tego maksymalna energia kinetyczna oraz maksymalna energia sprężystości jest równa 7,8 J.

Suma energii kinetycznej i sprężystości jest w każdym momencie drgań równa 7,8 J.

Zatem w chwili, gdy $E_k = 3,4 \text{ J}$, to: $E_s + 3,4 \text{ J} = 7,8 \text{ J}$.

Stąd: $E_s = 7,8 \text{ J} - 3,4 \text{ J} = 4,4 \text{ J}$.

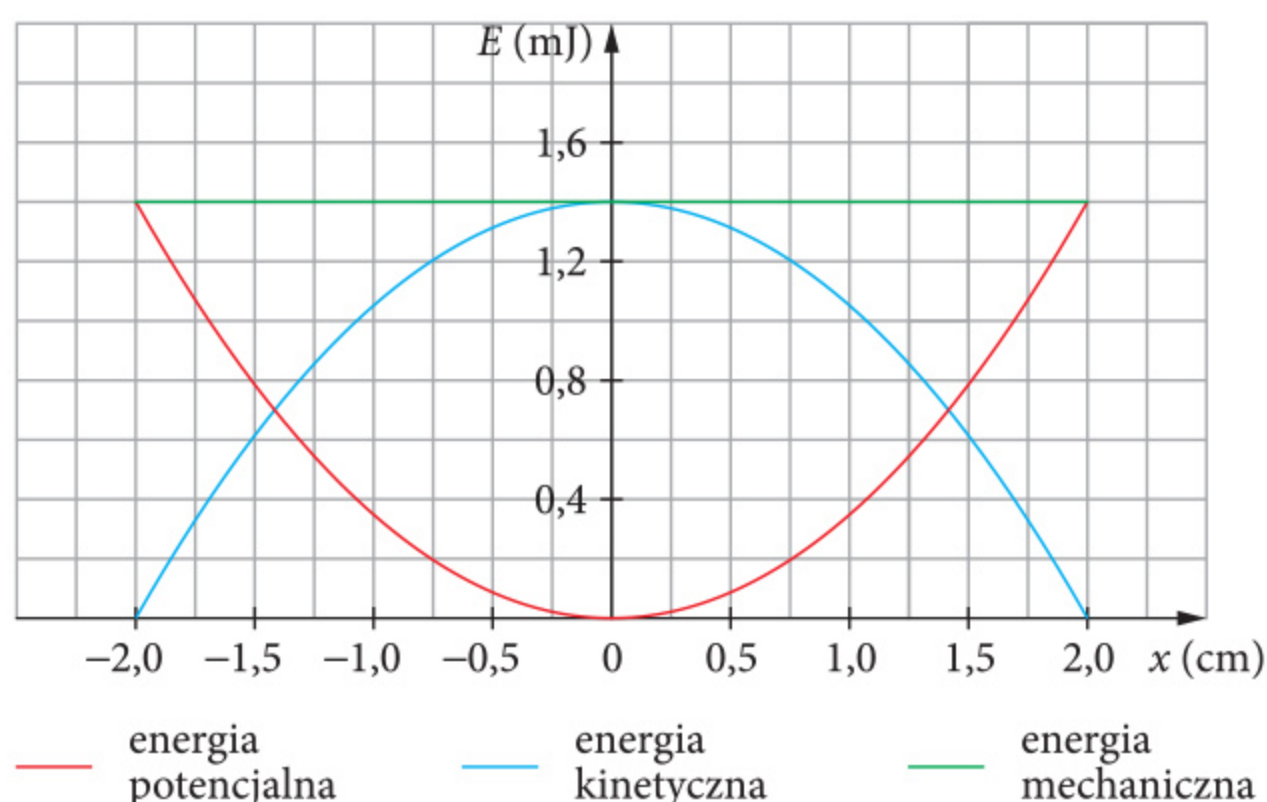
Ciało drgające może w trakcie drgań zmieniać energię potencjalną grawitacji. Tak jest w przypadku ciężarka zawieszonego na sprężynie i wykonującego drgania pionowe – w czasie ruchu zmieniają się zarówno energia sprężystości, jak i energia grawitacji układu (ryc. 3.3). W tym przypadku energia mechaniczna układu jest sumą trzech składników: energii kinetycznej, sprężystości oraz grawitacji.



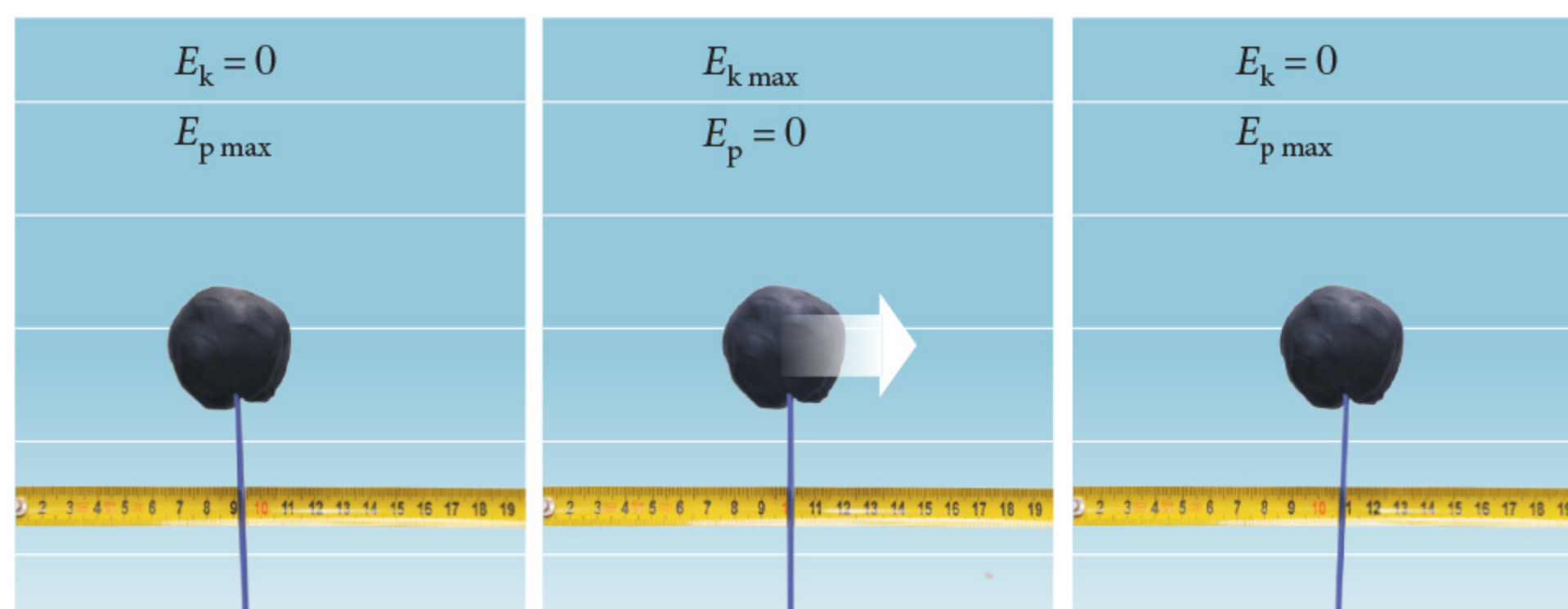
Ryc. 3.3. Drgania pionowe ciężarka na sprężynie

Żeby przemieścić ciężarek w dół lub w górę od położenia równowagi, musimy wykonać pewną pracę. Zwiększamy wtedy energię potencjalną, czyli sumę energii sprężystości i grawitacji układu. Im większe przemieszczenie, tym większa praca. Wobec tego energia potencjalna jest największa w maksymalnym wychyleniu ciężarka. Wtedy z kolei jego energia kinetyczna jest najmniejsza i równa zero. Gdy ciężarek wraca do położenia równowagi, energia potencjalna zamienia się w kinetyczną. W położeniu równowagi układ ma najmniejszą energię potencjalną, a największą energię kinetyczną. Później następuje przemiana energii kinetycznej w potencjalną i tak dalej.

Na rycinie 3.4 przedstawiono wykresy zależności wartości poszczególnych rodzajów energii od wychylenia dla drgającej plasteliny (ryc. 3.5) o masie 85 g, przymocowanej do linijki. Częstotliwość drgań ciężarka wynosiła 4 Hz. Zauważmy, że energia mechaniczna jest w każdym miejscu taka sama.



Ryc. 3.4. Zależność energii potencjalnej i energii kinetycznej od wychylenia dla ruchu drgającego



Ryc. 3.5. Przemiany energii podczas ruchu plasteliny zamocowanej na końcu linijki

PRZYKŁAD 2.

Odczytajmy z wykresu na ryc. 3.4, przy jakim wychyleniu:

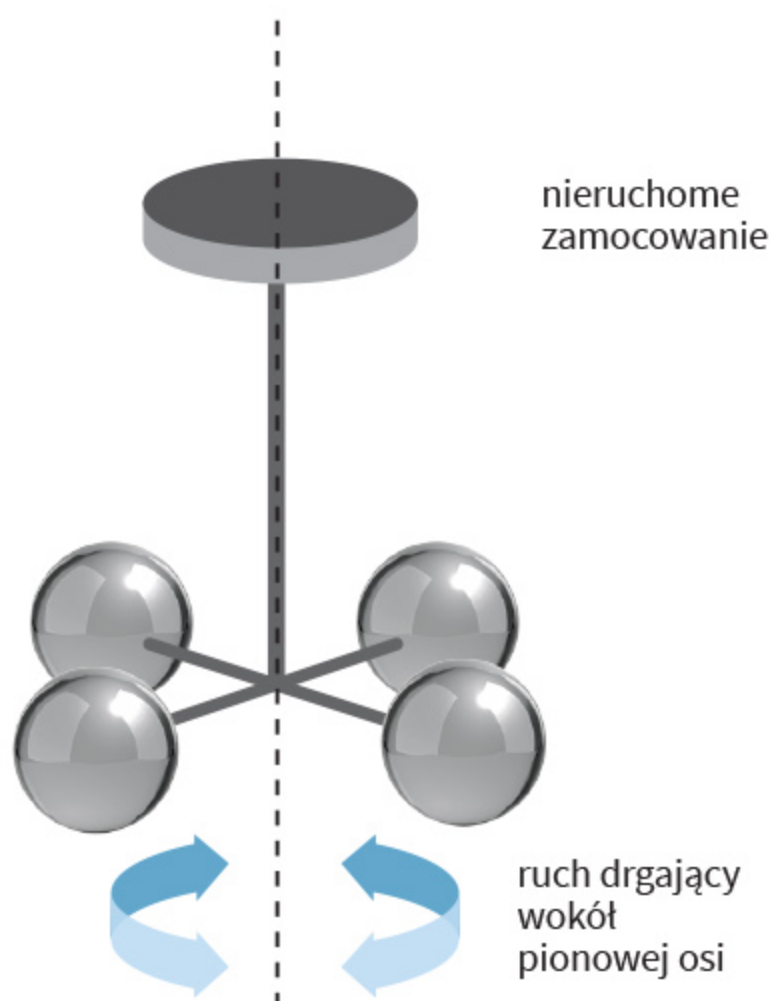
- a) energia potencjalna stanowi połowę energii mechanicznej drgań,
- b) energia kinetyczna jest dwukrotnie mniejsza od energii potencjalnej.

Energia potencjalna stanowi połowę energii mechanicznej drgań wtedy, gdy jest równa energii kinetycznej. Z wykresu odczytujemy, że przy wychyleniu $\pm 1,4$ cm oba rodzaje energii są równe 0,7 J. Zwróćmy uwagę, że wówczas wychylenie nie jest równe połowie amplitudy.

Gdy $E_s = 2E_k$, to napiszemy, że $E_m = E_k + E_s = E_k + 2E_k = 3E_k$. Odczytujemy, że energia kinetyczna w szukanym wychyleniu jest równa $\frac{1,4}{3} \approx 0,47$ J. Jest tak mniej więcej dla wychylenia równego $\pm 1,6$ cm.

**WARTO WIEDZIEĆ****Wahadło torsyjne**

Jednym z przykładów ruchu drgającego jest ruch układu kulek zamocowanych na końcu sprężystego pręta. Gdy układ ten obrócimy zgodnie z ruchem wskazówek zegara, to skręcony pręt spowoduje, że na poprzeczki z kulkami będzie działała siła dążąca do ich obrotu w przeciwną stronę. Wartość tej siły jest wprost proporcjonalna do kąta, o jaki został skręcony pręt. Drgania układu kulek są drganiami harmonicznymi o okresie niezależnym od kąta, o jaki skręcono pręt. Fakt ten został wykorzystany do budowy zegarów, w których wzorcem odstępu czasu jest okres drgań wahadła torsyjnego. Energia potencjalna skręconego pręta zamienia się w energię kinetyczną poruszających się kulek, potem energia kinetyczna kulek zamienia się w energię potencjalną pręta itd.



Energia sprężystości w ruchu drgającym

Energię sprężystości można obliczyć ze wzoru:

$$E_s = \frac{1}{2}kx^2$$

gdzie:

k – współczynnik sprężystości sprężyny,

x – odkształcenie sprężyny.

Z użyciem tego wzoru można bardziej szczegółowo opisać energię w ruchu drgającym. Maksymalne odkształcenie podczas ruchu drgającego jest równe amplitudzie drgań, zatem maksymalna energia sprężystości jest wprost proporcjonalna do kwadratu amplitudy drgań:

$$E = \frac{1}{2}kA^2$$

gdzie A to amplituda drgań.

Ponieważ dla $x = \pm A$ energia kinetyczna jest równa zero, powyższy wzór opisuje energię mechaniczną drgań. Jeśli na przykład amplituda drgań wzrośnie dwukrotnie, to maksymalna energia potencjalna tych drgań wzrośnie czterokrotnie.

PRZYKŁAD 3.

Podczas ruchu ciężarka zamocowanego do sprężyny zauważono, że na początku amplituda jego drgań wynosiła 6 mm, a później 2 mm. Ile razy zmniejszyła się energia mechaniczna drgań tego ciężarka?

Obliczamy iloraz energii mechanicznej na początku oraz w późniejszej fazie drgań:

$$\frac{E_{\text{końc}}}{E_{\text{pocz}}} = \frac{\frac{1}{2}kA_{\text{końc}}^2}{\frac{1}{2}kA_{\text{pocz}}^2} = \frac{(2 \text{ mm})^2}{(6 \text{ mm})^2} = \frac{1}{9}$$

Przy trzykrotnym zmniejszeniu amplitudy drgań energia mechaniczna zmalała 9 razy.

PRZYKŁAD 4.

Ciężarek o masie 0,3 kg zawieszony na sprężynie o współczynniku sprężystości 200 N/m wykonuje drgania o amplitudzie 8 cm. Ile wynosi jego energia kinetyczna, gdy wychylenie wynosi 4 cm?

Energia mechaniczna drgań wynosi:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2} \cdot 200 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot (0,08 \text{ m})^2 = 0,64 \text{ J}$$

Energia sprężystości dla wychylenia 4 cm wynosi:

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2} \cdot 200 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot (0,04 \text{ m})^2 = 0,16 \text{ J}$$

Energię kinetyczną obliczymy, gdy odejmiemy energię potencjalną od energii mechanicznej:

$$E_k = E - E_p = 0,48 \text{ J}$$

PODSUMOWANIE

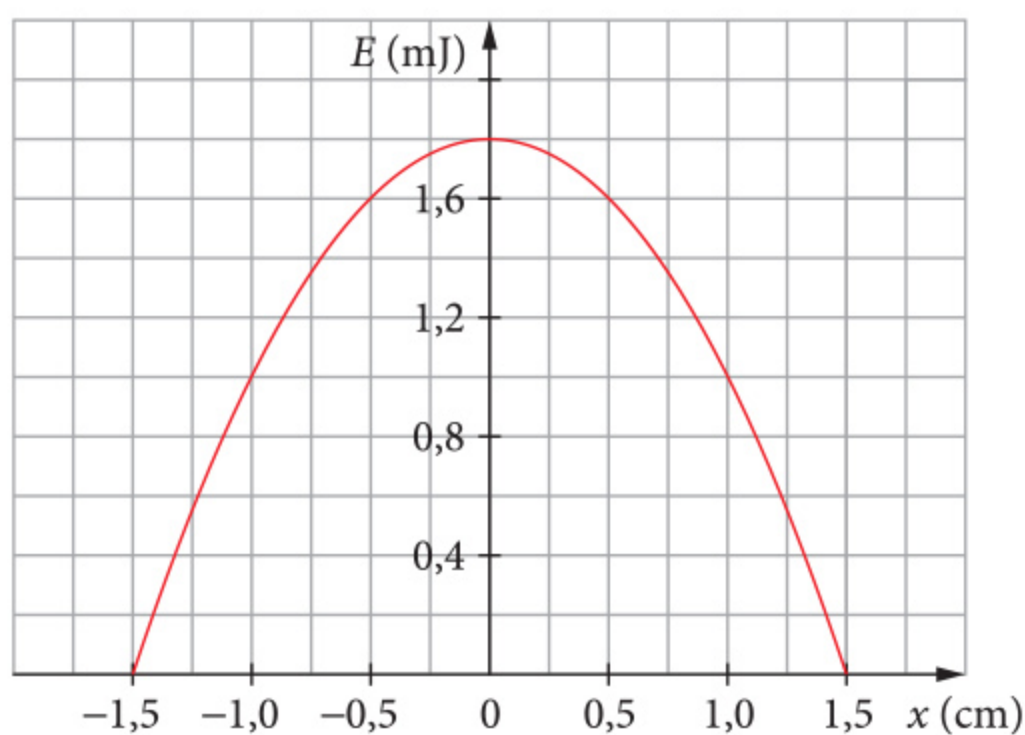
- ▶ Podczas ruchu drgającego następują przemiany energii kinetycznej w energię potencjalną oraz energii potencjalnej w energię kinetyczną. W każdym położeniu suma tych energii jest stała, pod warunkiem braku oporów ruchu.
- ▶ Gdy energia kinetyczna jest równa zero, energia potencjalna jest maksymalna. Gdy energia potencjalna jest minimalna, energia kinetyczna jest maksymalna.

PYTANIA I ZADANIA

1. Na wykresie przedstawiono zależność energii kinetycznej ciężarka o masie 65 g od wychylenia z położenia równowagi podczas ruchu drgającego.

Na podstawie wykresu wyznacz:

- a) amplitudę drgań;
- b) maksymalną prędkość ciężarka;
- c) energię potencjalną ciężarka w odległości 0,5 cm od położenia równowagi.



2. Z wykresu na rycinie 3.4 odczytaj:
 - a) amplitudę drgań;
 - b) energię kinetyczną ciała w odległości 0,6 cm od położenia równowagi.
3. Ciężarek zawieszony na gumowej linie poruszał się ruchem drgającym. Energia mechaniczna jego drgań była równa 28 mJ. W pewnym momencie energia kinetyczna ciężarka wynosiła 0,008 J. Ile wynosiła w tym momencie energia potencjalna?
4. Wózek został rozpędzony za pomocą napiętej gumki do prędkości 2,5 m/s. Ten sam wózek został ponownie rozpędzony za pomocą czterech takich samych gumek zaczepionych obok siebie. Gumki były takie same i zostały rozciągnięte tak samo w obu przypadkach. Oblicz, jaką prędkość osiągnie ten wózek rozpędzony za pomocą czterech gumek.
5. Franek podskakuje na drążku pogo. Po odbiciu się od podłoża wyskakuje na pewną wysokość nad powierzchnię gruntu, a później ląduje. Podczas lądowania następuje skrócenie znajdującej się wewnątrz drążka sprężyny. Opisz przemiany energii podczas jednego cyklu skoków.





4. Wahadło

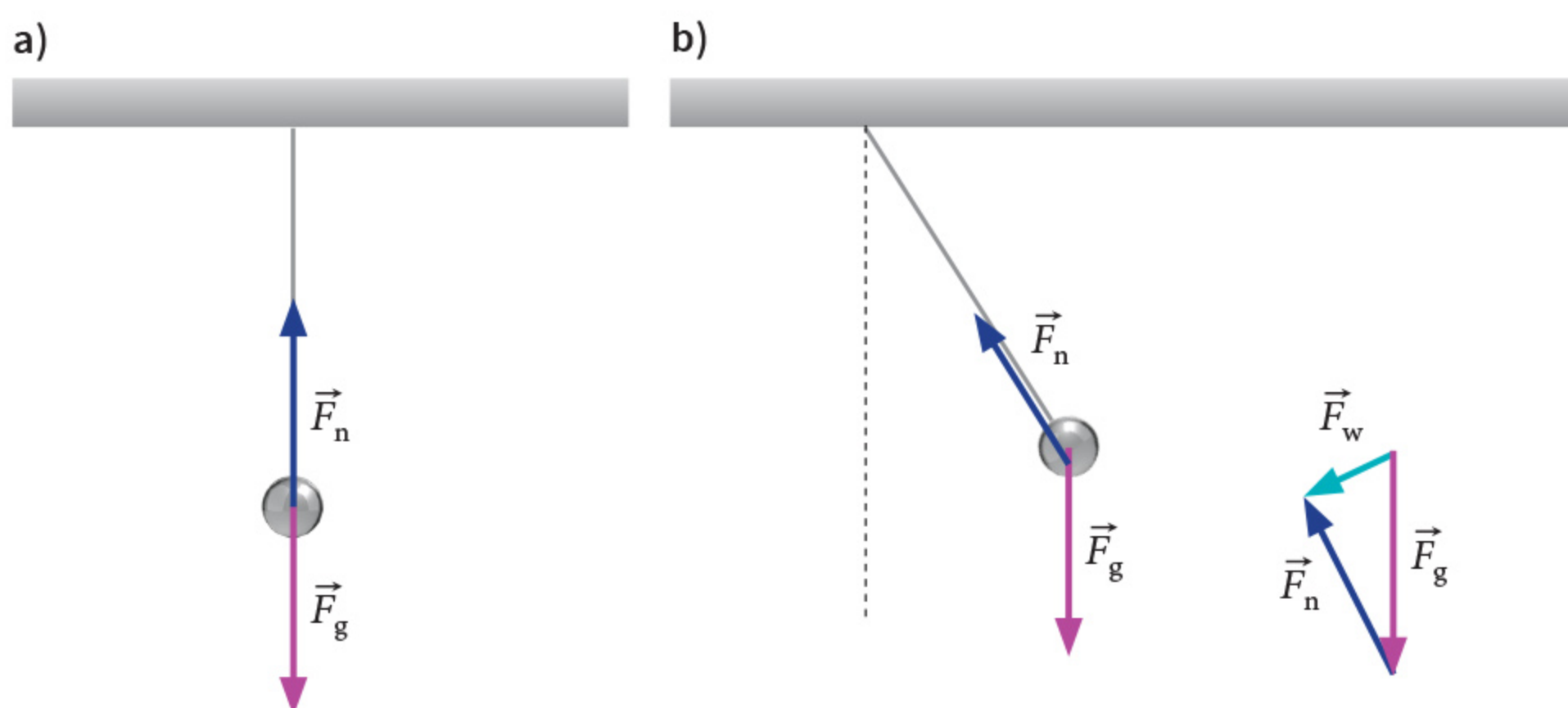
- Siły działające na wahadło
- Okres drgań wahadła
- Wahadło Foucaulta
- Energia mechaniczna wahadła

→ **Przypomnij sobie** wielkości opisujące ruch drgający.

W naszym otoczeniu znajdziemy wiele obiektów, które mogą poruszać się ruchem drgającym nie pod wpływem siły sprężystości, tylko pod działaniem siły ciężkości. Są to np. huśtawka na placu zabaw, wahadło w zegarze, bombka wisząca na choince czy jakikolwiek przedmiot zawieszony na lince. Tego typu obiekty noszą wspólną nazwę – wahadło.

Siły działające na wahadło

Rozpatrzmy kulkę zawieszoną na nierozciągliwej lince. Kulka pozostaje w spoczynku, gdy linka jest w położeniu pionowym. Wówczas działająca na kulkę siła ciężkości jest równoważona przez siłę, którą linka działa na kulkę (ryc. 4.1a).



Ryc. 4.1. a) Na wiszącą w spoczynku kulkę działają dwie siły: siła ciężkości $\vec{F}_g$ i siła naprężenia linki $\vec{F}_n$; obie siły się równoważą. b) Siły działające na odchyloną kulkę w momencie rozpoczęcia wahań. Siła wypadkowa $\vec{F}_w$ jest skierowana w stronę położenia równowagi

Gdy wahadło zostanie wychylone z położenia równowagi i puszczone swobodnie, zacznie poruszać się ruchem drgającym. W momencie rozpoczęcia ruchu siła ciężkości działająca na kulkę nie jest zrównoważona siłą naprężenia linki, która zawsze działa wzdłuż linki (ryc. 4.1b). Wypadkowa obu sił jest skierowana wówczas prostopadle do linki i powoduje powrót wahadła do położenia równowagi.

Podczas ruchu kulki zmienia się jej prędkość. W chwili, gdy kulka mija położenie równowagi, uzyskuje maksymalną prędkość. Od tego momentu jej prędkość maleje. Gdy kulka osiągnie maksymalne wychylenie, zaczyna poruszać się w przeciwną stronę.

Okres drgań wahadła

Okazuje się, że okres drgań wahadła nie zależy od jego masy, a jedynie od odległości środka masy od punktu zaczepienia. Tę odległość nazywamy długością wahadła. Dodatkowo, gdy odchylenia od pionu są nieduże, okres drgań jest taki sam, niezależnie od amplitudy drgań. Te cechy ruchu wahadła odkryto doświadczalnie już w XVII wieku. Zostały one wykorzystane do budowy zegarów wahadłowych (ryc. 4.2).

Okres drgań wahadła, gdy odchylenia wahadła od pionu są niewielkie, można w przybliżeniu obliczyć ze wzoru:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1)$$

gdzie:

l – długość wahadła, g – przyspieszenie ziemskie.

Wyniki obliczeń wykonanych z zastosowaniem tego wzoru będą poprawne, gdy długość wahadła będzie co najmniej kilka razy większa od rozmiarów wiszącego ciała. W innych sytuacjach wzór ten pozwala tylko szacować okres drgań.

PRZYKŁAD 1.

Bombka choinkowa o średnicy 4 cm wisi na nitce o długości 12 cm. Obliczmy, korzystając z przybliżonego wzoru (1), jaki będzie okres jej drgań, gdy ją lekko popchniemy.

Długość wahadła, jakie tworzy bombka wisząca na nitce:

$$l = r + d = 2 \text{ cm} + 12 \text{ cm} = 14 \text{ cm} = 0,14 \text{ m}$$

Podstawiamy dane do wzoru (1):

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \approx 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{0,14 \text{ m}}{9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \approx 0,75 \text{ s}$$

Okres drgań bombki wynosi około 0,75 s.



Ryc. 4.2. Zegary wahadłowe jeszcze w latach trzydziestych XX wieku były najbardziej precyzyjnym sposobem mierzenia czasu



Energia mechaniczna wahadła

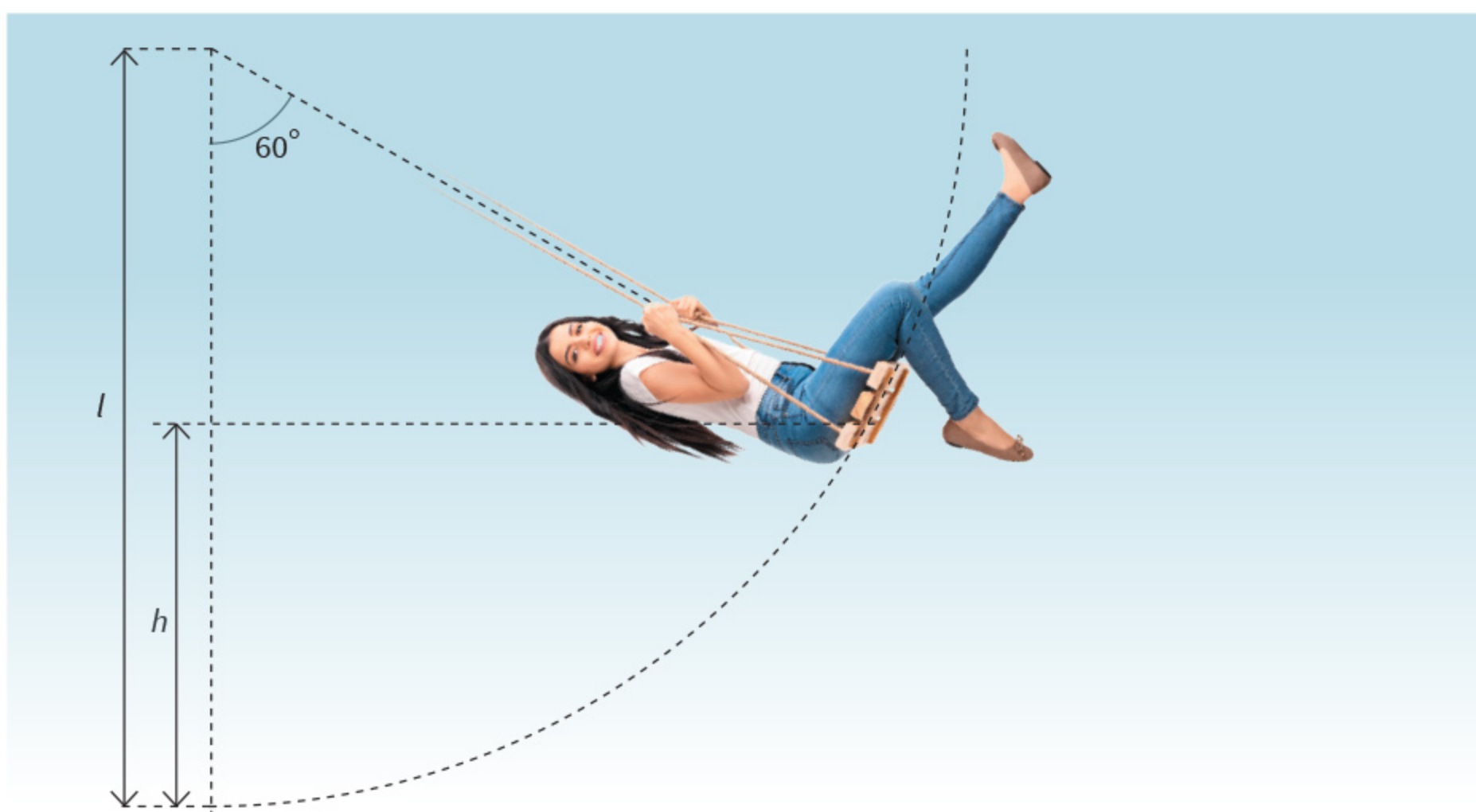
W czasie ruchu, gdy wahadło oddala się od położenia równowagi, nieco unosi się do góry, a więc zwiększa swoją energię potencjalną grawitacji. W tym samym czasie prędkość wahadła maleje, a zatem zmniejsza się jego energia kinetyczna. Gdy wraca do położenia równowagi, sytuacja jest odwrotna: energia grawitacji maleje, natomiast rośnie energia kinetyczna. Siła naprężenia linki nie wykonuje pracy, gdyż działa zawsze prostopadle do chwilowego przemieszczenia, i dlatego właśnie **energia mechaniczna wahadła** (suma energii kinetycznej i potencjalnej) **się nie zmienia**. Jeśli przyjmujemy, że w położeniu równowagi energia grawitacji jest równa zero, wówczas w skrajnym wychyleniu, kiedy wahadło jest najwyżej, ma ono tylko energię potencjalną grawitacji, a gdy mija położenie równowagi – tylko energię kinetyczną.

s. 211

PRZYKŁAD 2.

Oszacujmy największą prędkość, jaką można uzyskać na huśtawce. Przyjmijmy, że huśtawka ma długość 2,4 m i odchyła się od pionu maksymalnie o kąt 60° .

Z zasady zachowania energii mechanicznej wiemy, że energia mechaniczna huśtawki w położeniu równowagi E_1 jest równa jej energii mechanicznej przy maksymalnym wychyleniu E_2 . Pomijamy energię podtrzymujących prętów czy łańcuchów, bo są dużo lżejsze od krzeselka z pasażerem. Wysokość mierzymy od najniższego położenia huśtawki. Wobec tego:



$$E_1 = E_2$$

$$0 + E_{k1} = E_{g2} + 0$$

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

Przekształcamy równanie tak, by otrzymać wzór na prędkość podczas przechodzenia przez położenie równowagi:

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

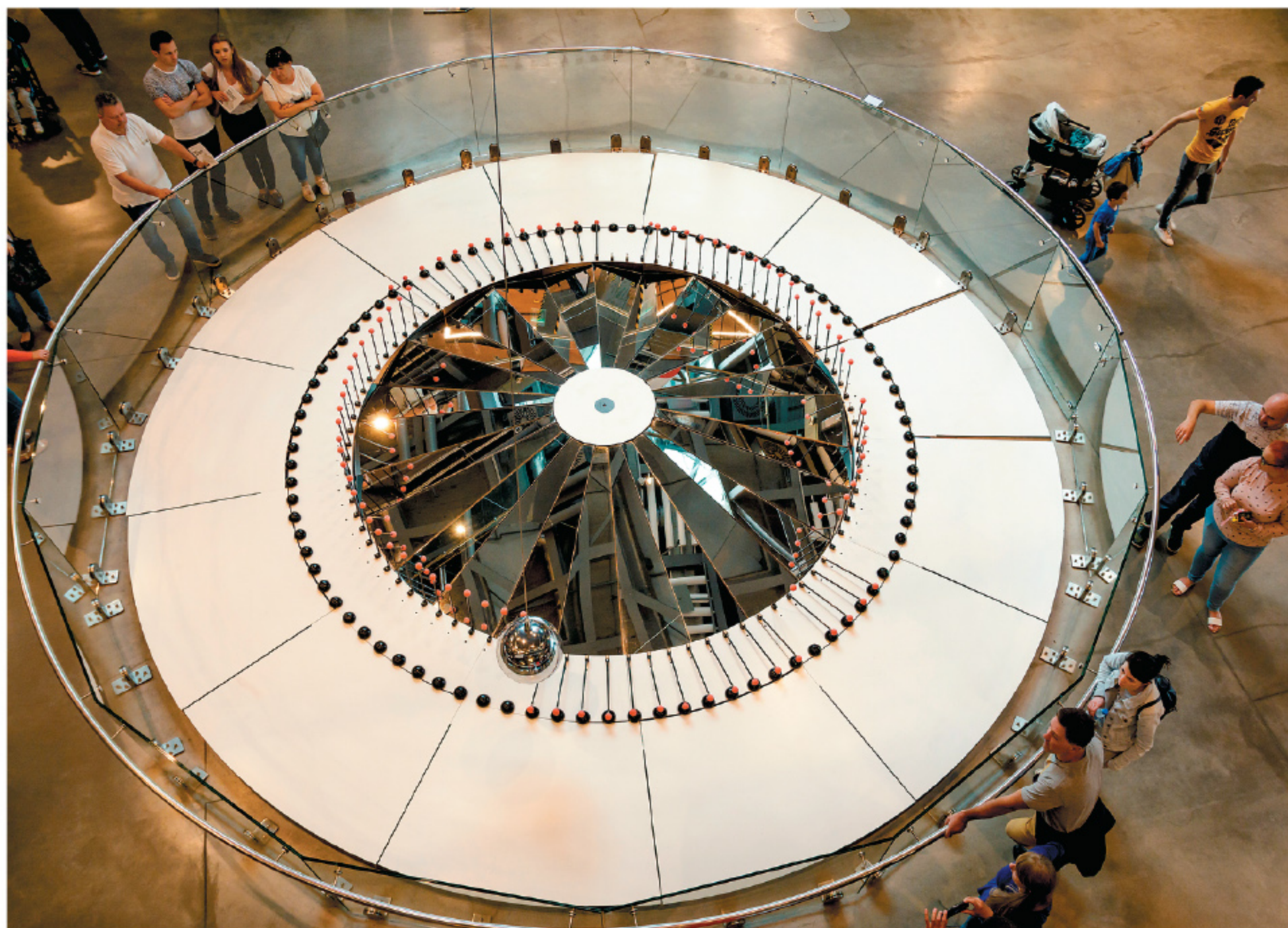
Z rysunku wnioskujemy, że skoro huśtawka odchyła się o 60° , to unosi się na wysokość równą połowie jej długości (wynika to z własności trójkąta o kątach: 30° , 60° , 90°), czyli $h = 1,2 \text{ m}$. Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$v = \sqrt{2 \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 4,85 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 17 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Największa prędkość, jaką można uzyskać na opisanej huśtawce, to około 17 km/h.

Wahadło Foucaulta

Francuski fizyk Léon Foucault przeprowadził w 1851 roku eksperyment potwierdzający ruch obrotowy Ziemi, przewidziany już przez Kopernika. Długie i ciężkie wahadło zostało wprowadzone w ruch drgający. Energia wahadła była na tyle duża, że poruszało się ono przez kilka godzin. Dzięki temu można było zaobserwować, że płaszczyzna ruchu wahadła obraca się powoli wokół pionowej osi przechodzącej przez punkt mocowania. Jak to wyjaśnić? Wszystkie siły działające na wahadło – ciężkości, oporu i naprężenia liny – leżą w jednej płaszczyźnie. Wobec tego **drgania wahadła odbywają się cały czas w tej samej płaszczyźnie w przestrzeni**. Obserwowana zmiana płaszczyzny ruchu wahadła wynika z tego, że to obserwatorzy i całe otoczenie obracają się wraz z Ziemią wokół wahadła. W Polsce znajdziemy wiele miejsc, w których zawieszone są wahadła Foucaulta i przeprowadza się ten eksperyment. Warto go zobaczyć. Jest to jedyny sposób, aby bez podróży w Kosmos na własne oczy przekonać się, że Ziemia wiruje wokół własnej osi.



Ryc. 4.3. Wahadło Foucaulta w Centrum Nauki Kopernik w Warszawie

PODSUMOWANIE

- ▶ Wahadło porusza się ruchem drgającym pod działaniem wypadkowej dwóch sił: siły ciężkości i siły naprężenia linki.
- ▶ **Okres drgań wahadła** obliczamy ze wzoru:

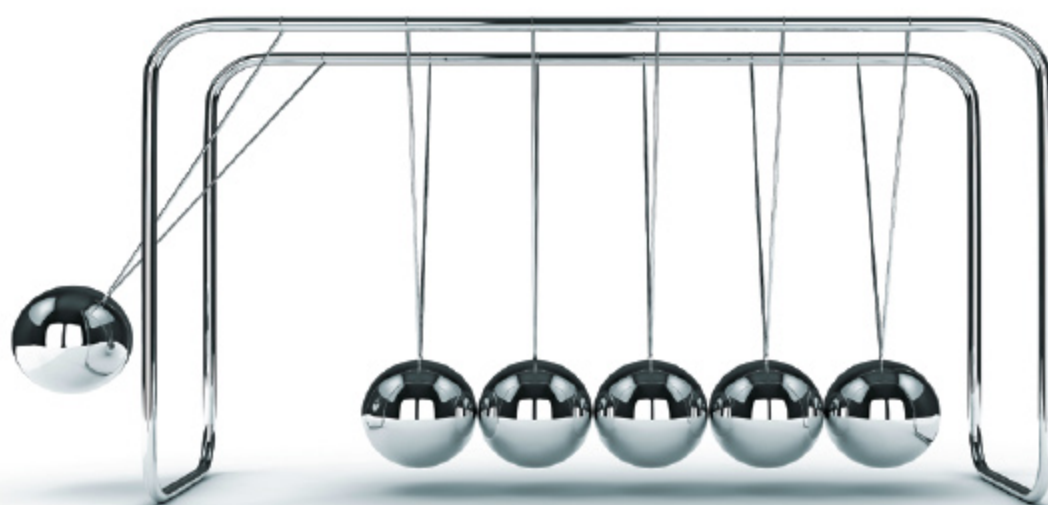
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Im większa długość l wahadła, tym większy okres jego drgań.

- ▶ Energia mechaniczna wahadła jest sumą jego energii grawitacji i energii kinetycznej.

PYTANIA I ZADANIA

1. Okres drgań kulki zawieszanej na nitce wynosi 1,2 s. Jaki będzie okres drgań takiego wahadła, gdy kulkę zastąpimy inną o tej samej średnicy, ale 4 razy cięższą?
2. Na placu zabaw stoją obok siebie dwie jednakowe huśtawki. Na jednej z nich huśta się Zosia, siedząca na krzeselku, a na drugiej Kazio, stojący na krzeselku. Czy okresy drgań obojga dzieci są jednakowe, przy założeniu że dzieci ważą tyle samo?
3. Najdłuższe w Polsce wahadło Foucaulta znajduje się w Krakowie. Ma ono długość 46,5 m i waży 25 kg. Oblicz okres jego drgań.
4. Na zdjęciu przedstawiono tzw. kotyskę Newtona. Gdy odchylimy skrajną kulkę i ją puścimy, ta kulka po uderzeniu w pozostałe spowoduje, że po drugiej stronie odskoczy tylko jedna kulka (wydaje się, że natychmiast). Odległość środka każdej z kulek od punktu zawieszenia wynosi około 6 cm. Ile uderzeń na sekundę będziemy słyszeć, gdy uruchomimy kotyskę?



5. Na linie o długości 8 m wisi deseczka. Karol posadził na niej swojego młodszego brata Filipa i pchnął tak mocno, że linka odchyliła się o kąt 30° od pionu. Oszacuj prędkość, jaką Karol nadał Filipowi, i pracę, jaką przy tym wykonał. Filip waży 20 kg.



5. Drgania tłumione i drgania wymuszone

- Drgania tłumione
- Drgania wymuszone
- Rezonans mechaniczny

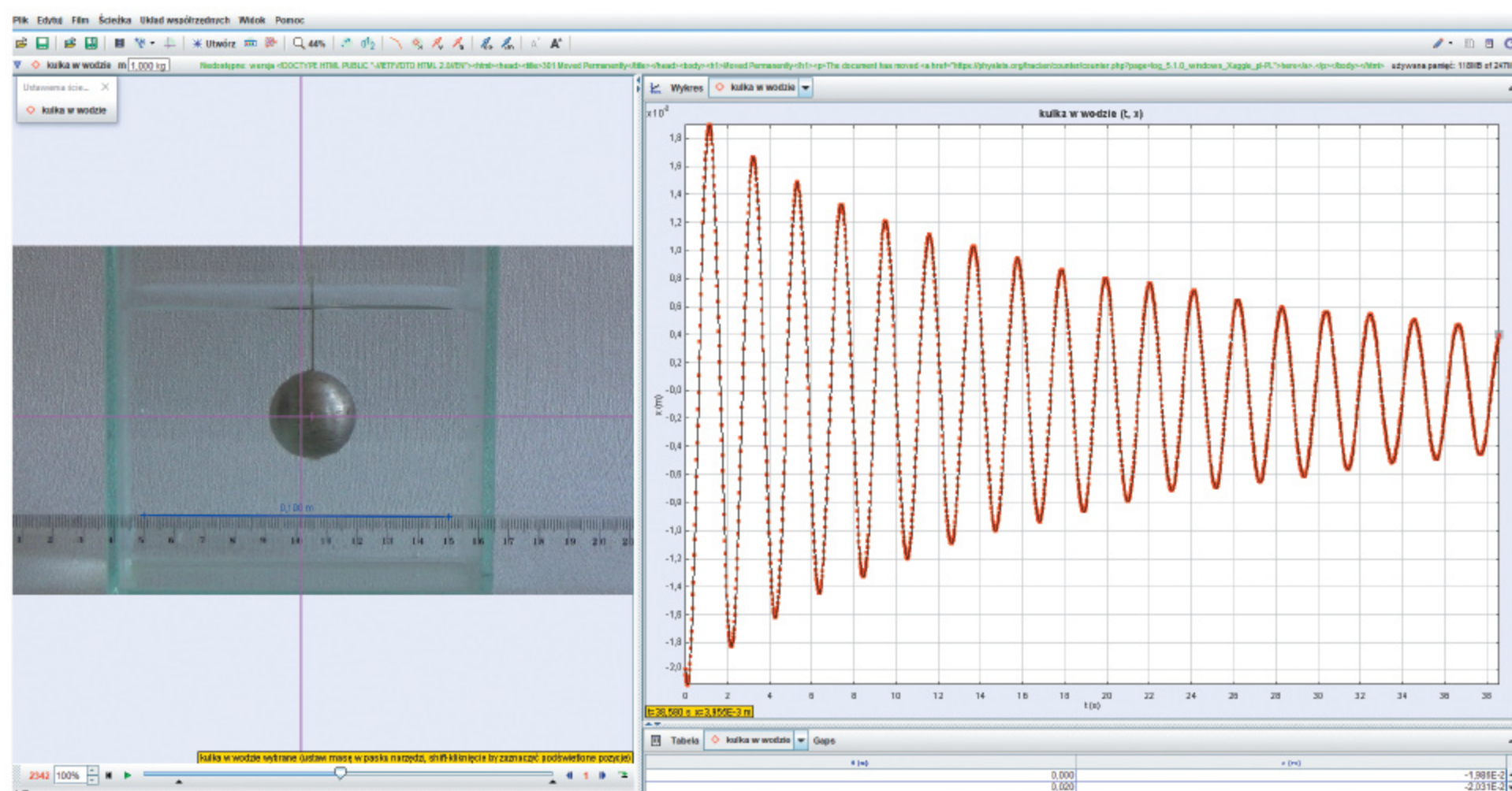
→ **Przypomnij sobie** zasadę zachowania energii i wiadomości o tym, od czego zależy okres drgań ciała zawieszonego na sprężynie oraz okres drgań wahadła.

Do tej pory analizowaliśmy drgania o stałej amplitudzie. W naszym otoczeniu można jednak znaleźć wiele przykładów drgań, w których amplituda rośnie lub maleje. Przyjrzyjmy się bliżej takim drganiom.

Drgania tłumione

Gdy stalową kulkę zawieszoną na mocnej nici umieścimy w pojemniku z wodą i wychylimy z położenia równowagi, będzie poruszała się ruchem drgającym z coraz mniejszą amplitudą.

Na rycinie 5.1 przedstawiono wykres zależności położenia kulki od czasu, uzyskany za pomocą programu Tracker. Z wykresu wynika, że amplituda drgań maleje. Siła oporu zmniejsza energię mechaniczną kulki. Siła ta jest znacznie większa w wodzie niż w powietrzu, dlatego w krótszym czasie możemy zaobserwować zmiany amplitudy drgań kulki.



Ryc. 5.1. Kulka zanurzona w wodzie drga z coraz mniejszą amplitudą. Sfilmowany ruch kulki poddano analizie w programie Tracker. Wykres przedstawia zależność położenia kulki od czasu

Okazuje się, że bez względu na amplitudę **okres drgań pozostaje stały**. Można również zauważyć, że amplituda drgań maleje szybciej na początku ruchu, a potem coraz wolniej. Wynika to z faktu, że im większa jest prędkość ciała, tym większa jest siła oporu ruchu. Przy większej amplitudzie maksymalna prędkość drgającego ciała jest większa i dlatego tłumienie drgań jest bardziej skuteczne.

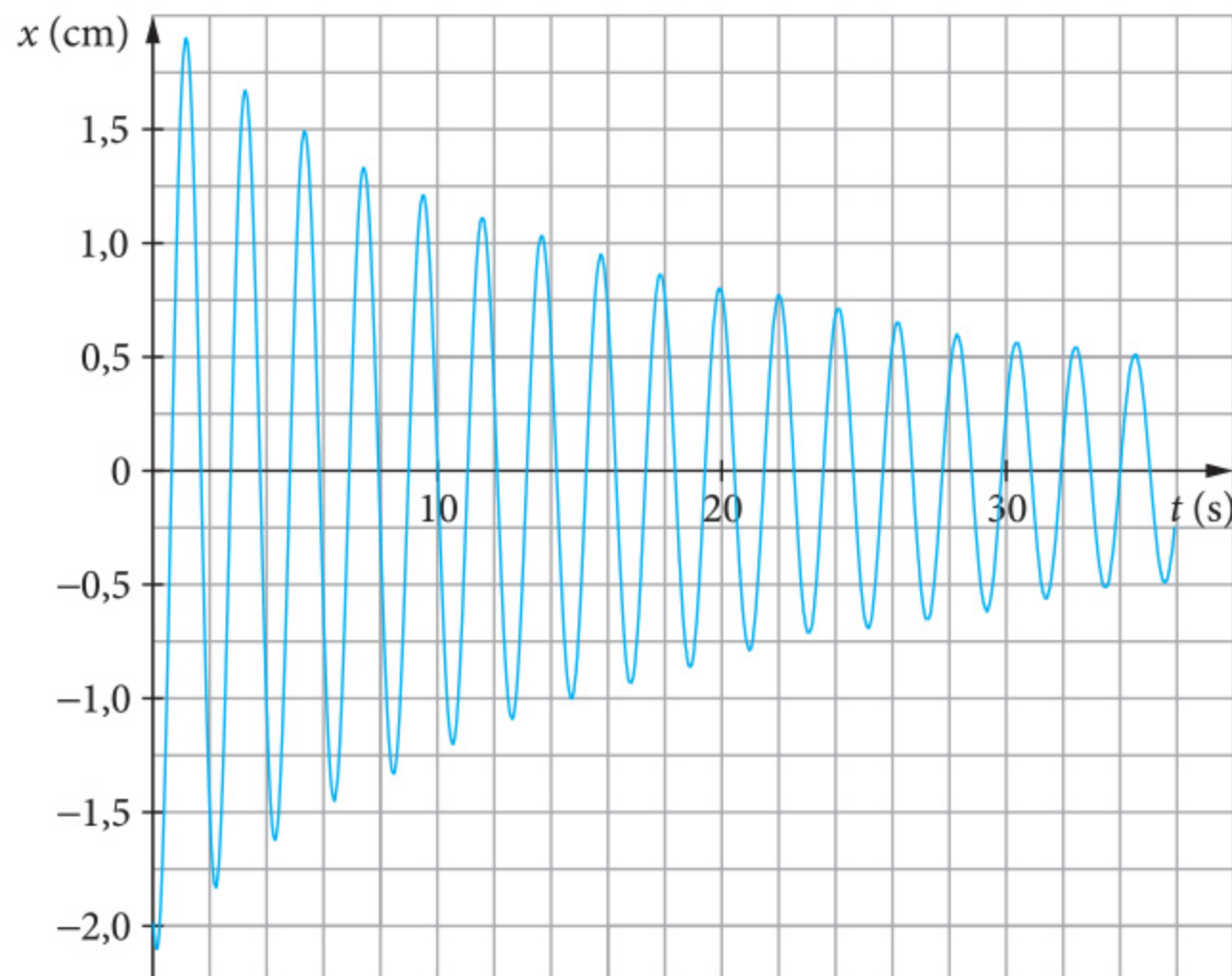
Drgania, których amplituda maleje pod wpływem zewnętrznej siły, nazywamy **drganiami tłumionymi**.

Podczas ruchu kulki zanurzonej w wodzie energia mechaniczna ruchu drgającego jest przekazywana cząsteczkom wody. Energia kulki maleje, co widzimy jako spadek amplitudy.

PRZYKŁAD 1.

Na wykresie przedstawiono zależność wychylenia od czasu dla kulki zanurzonej w wodzie.

Na podstawie wykresu wyznaczmy czas, po którym energia drgań zmalała czterokrotnie.



Energia drgań jest wprost proporcjonalna do kwadratu amplitudy, zatem czterokrotnie mniejsza energia drgań odpowiada czterokrotnie mniejszemu kwadratowi amplitudy:

$$E_k = \frac{1}{4} E_0$$

$$A_k^2 = \frac{1}{4} \cdot A_0^2$$

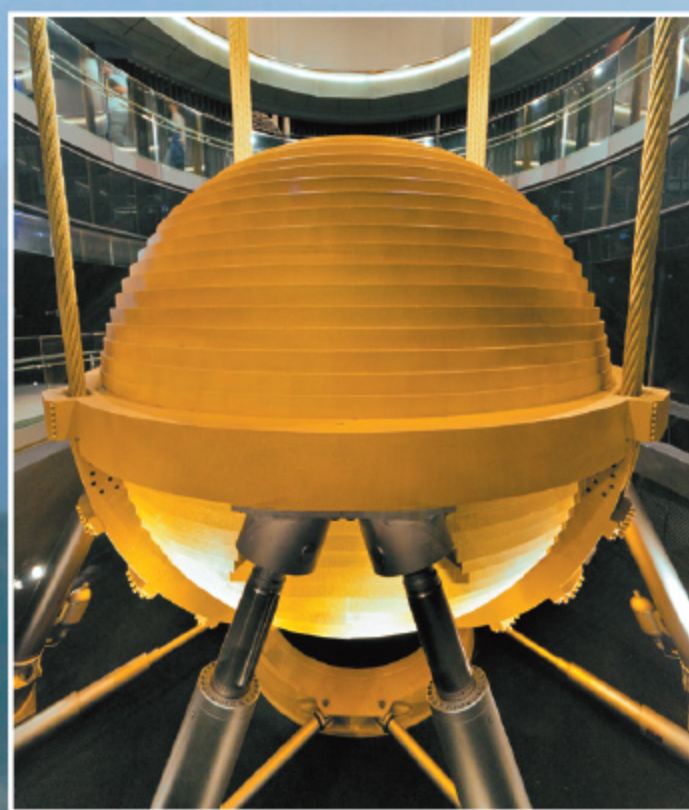
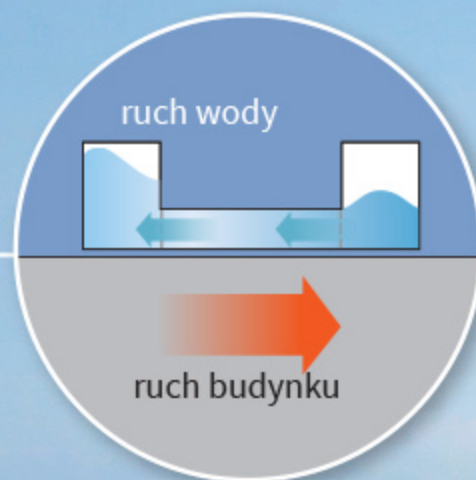
Stąd szukana amplituda końcowa:

$$A_k = \frac{1}{2} \cdot A_0$$

Amplituda początkowa była równa mniej więcej 2 cm, więc szukana przez nas amplituda końcowa jest równa około 1 cm. Z wykresu odczytujemy, że drgania kulki osiągają amplitudę 1 cm mniej więcej po 15 sekundach.

Tłumienie drgań

Każda konstrukcja i każdy budynek drgają pod wpływem wiatru, przemieszczających się ludzi lub pojazdów. Przeważnie nie prowadzi to do powstawania drgań o dużej amplitudzie, grożących uszkodzeniami. Czasem jednak architekci muszą zastosować dodatkowe zabezpieczenia tłumiące nadmierne drgania.



One Wall Centre (Vancouver)

One Wall Centre to wieżowiec o wysokości prawie 160 metrów. Budynek jest narażony na działanie silnych wiatrów, które mogą go rozkołysać. Zainstalowany w pobliżu szczytu budynku układ zbiorników z wodą pochłania energię ruchu drgającego wieżowca.

Taipei 101 (Tajpej)

Wieżowiec Taipei 101 jest jedną z najwyższych budowli na Ziemi (509,2 m) i stoi w odległości około 200 m od uskoku tektonicznego, w związku z czym jest bardzo narażony na trzęsienia ziemi. Aby przeciwdziałać ewentualnym uszkodzeniom podczas takich zdarzeń, wewnątrz budynku między 88. a 92. piętrem zamocowano na 16 stalowych linach kulę o masie 660 ton (około 0,1 % masy całego budynku). W czasie trzęsienia ziemi energia drgań budynku jest pochłaniana przez kołyszącą się kulę, a jej energia z kolei jest powoli wytracana przez zespół zamocowanych do niej siłowników hydraulicznych.





Grand Canyon Skywalk (Eagle Point)

Grand Canyon Skywalk to kładka widokowa znajdująca się około 1100 m nad dnem Wielkiego Kanionu Kolorado. Kładka jest zbudowana z dwóch stalowych belek, pomiędzy którymi zainstalowano szklany chodnik. Wewnątrz belek zamocowano układ masywnych elementów na sprężynach, które pochłaniają energię drgań wywoływanych przez spacerujących oraz przez wiatr, a także mają zabezpieczyć konstrukcję w przypadku trzęsienia ziemi.



Linie energetyczne

Linie energetyczne wysokich napięć są narażone na drgania wywołane wiatrem oraz przepływem prądu przemiennego. W wyniku rezonansu przewody mogłyby drgać z dużą amplitudą, co naraziłoby konstrukcję na nadmierne obciążenia. Dlatego trzy przewody stanowiące jedną linię są połączone ze sobą za pomocą elementu tłumiącego te drgania.

Millenium Bridge (Londyn)

Millennium Bridge to kładka dla pieszych. Gdy idzie się po tym moście, można wyczuć delikatne kotysania wywołane mimowolnym dopasowywaniem się przechodniów do poprzecznych drgań kładki. Masywne elementy zamocowane za pomocą układu sprężyn do filarów mostu nie pozwalają na powstanie zbyt dużej amplitudy drgań.





WARTO WIEDZIEĆ

Amortyzatory

Jednym z przykładów wykorzystania zjawiska tłumienia drgań jest amortyzator rowerowy. Dzięki zastosowaniu amortyzatorów jazda rowerem jest bezpieczniejsza oraz bardziej komfortowa, szczególnie podczas pokonywania nierówności. Najważniejszymi elementami amortyzatorów są sprężyny oraz tłumik drgań – najczęściej cylinder z tłokiem, wypełniony powietrzem lub olejem.



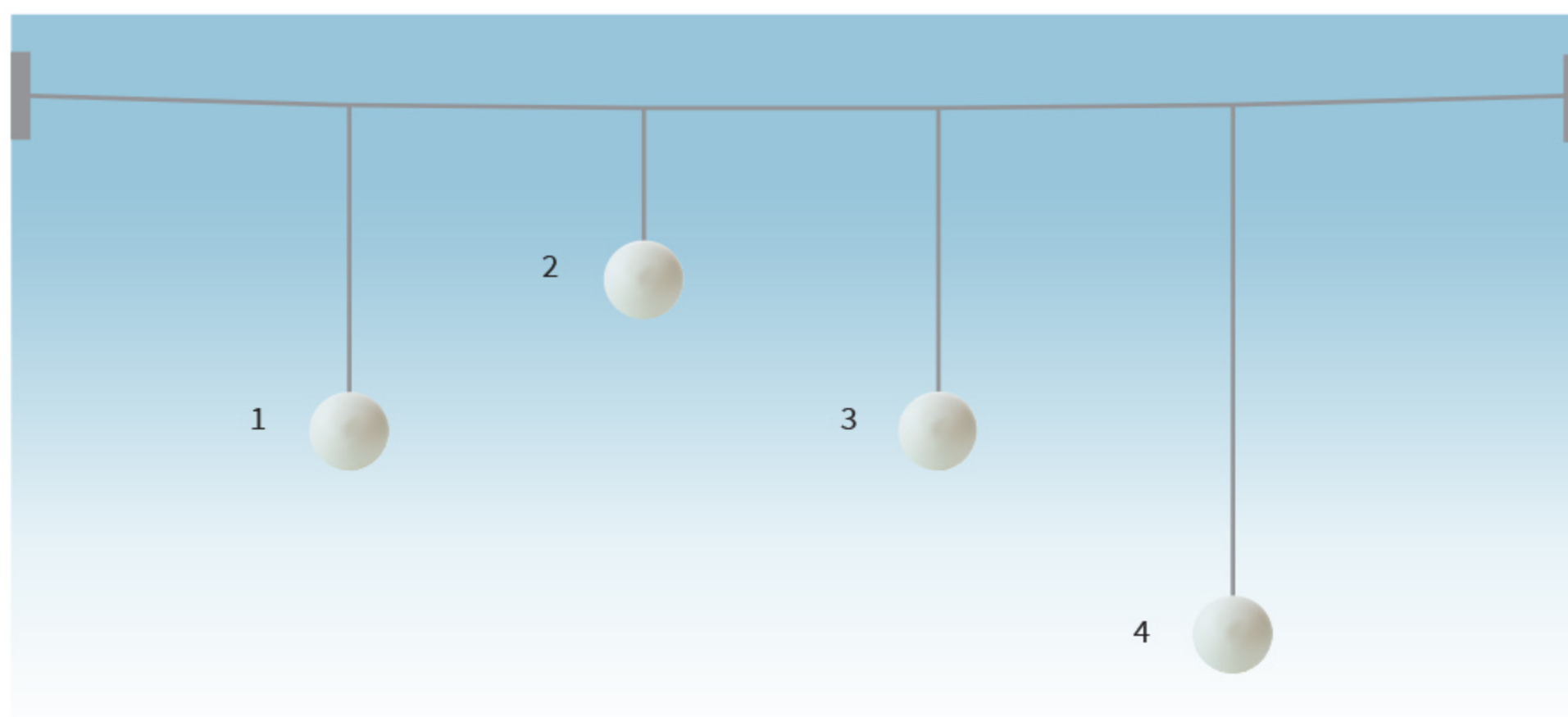
Gdy w czasie jazdy koło trafia na nierówności, sprężyna amortyzatora jest ściskana. W tym momencie płyn (powietrze lub olej) jest przepychany przez otwór do górnej części amortyzatora. Gdy ustępuje siła ściskająca, sprężyna wraca do stanu poprzedniego, a płyn wraca do dolnej części amortyzatora. Zastosowanie przegrody z otworami powoduje, że ciecz podczas przepływu między zbiornikami napotyka duże opory ruchu, więc drgania sprężyny są silnie tłumione.

W podobny sposób działają amortyzatory w samochodach – zapewniają stały kontakt kół z podłożem. W przypadku niesprawnych amortyzatorów (lub ich braku) koła w czasie jazdy mogą podskakiwać na nierównościach jezdni, a nawet odrywać się od niej – wówczas tracą przyczepność oraz wydłuża się droga hamowania samochodu.

Drgania wymuszone

Drgania odbywające się pod wpływem zewnętrznej, cyklicznie zmieniającej się siły, nazywamy **drzaniami wymuszonymi**. Praca wykonywana przez siłę zewnętrzną może powodować przyrost energii układu, a więc wzrost amplitudy.

Można to zauważyć podczas jazdy samochodem – czujemy drżenie samochodu i słyszymy warkot silnika, zmieniające się, gdy obroty silnika rosną. Dzieje się tak dlatego, że drgający silnik pobudza do drgań wszystkie pozostałe elementy samochodu. Wykonują one drgania wymuszone, których częstotliwość jest taka sama jak częstotliwość obrotów silnika.



Ryc. 5.2. Układ wahadeł przekazujących sobie nawzajem drgania

W celu lepszego zrozumienia omawianego zjawiska spójrzmy na wahadła zawieszone na poziomej nici (ryc. 5.2). Długości wahadeł 1 oraz 3 są takie same. Wahadło 2 jest najkrótsze, a 4 – najdłuższe. Każde z wahadeł zawieszone niezależnie i wychylone z położenia równowagi będzie drgało z częstotliwością wynikającą z jego długości (patrz rozdział 4.). Taką częstotliwość nazywamy **częstotliwością własną** układu drgającego. Gdy wychylimy z położenia równowagi najkrótsze wahadło 2, zacznie ono drgać z częstotliwością f_2 . Pod wpływem tych drgań niewielka siła przenoszona przez poziomą nitkę spowoduje ruch pozostałych wahadeł z tą właśnie częstotliwością, ale amplituda tych drgań będzie nieduża. Podobnie będzie, gdy do drgań zostanie pobudzone wahadło 4 o największej długości. Będzie ono przekazywać pozostałym wahadłom drgania o częstotliwości f_4 . Gdy wychylimy z położenia równowagi wahadło 1, będzie ono drgało z częstotliwością f_1 . Wahadło to będzie pobudzało do niewielkich drgań wahadła 2 i 4, natomiast wahadło 3 będzie pod jego wpływem stopniowo zwiększało amplitudę swoich drgań. Wahadła 1 i 3 mają jednakową długość, a tym samym jednakową częstotliwość drgań własnych. Właśnie dlatego wahadło 1 najsilniej pobudza do drgań wahadło 3.

Rezonans mechaniczny

Proces przekazywania energii między układami drgającymi jest szczególnie efektywny, gdy układy te mają taką samą częstotliwość drgań własnych. Zjawisko dużego wzrostu amplitudy drgań, gdy siła wymuszająca ma częstotliwość równą częstotliwości własnej układu drgającego, nazywamy **rezonansem**.

Zapewne każdy wie, że aby rozbijać osobę siedzącą na huśtawce, czyli zwiększyć amplitudę drgań huśtawki, nie trzeba działać na nią siłą cały czas. Wystarczy odpychać huśtawkę w tych momentach, w których oddala się od nas.

Podobny efekt można zauważyć podczas doświadczenia z kierowaniem strumienia powietrza na kulkę.

DOŚWIADCZENIE 1.

Do wykonania doświadczenia potrzebujemy kulki zawieszonej na nici oraz powietrza sprężonego w pojemniku.

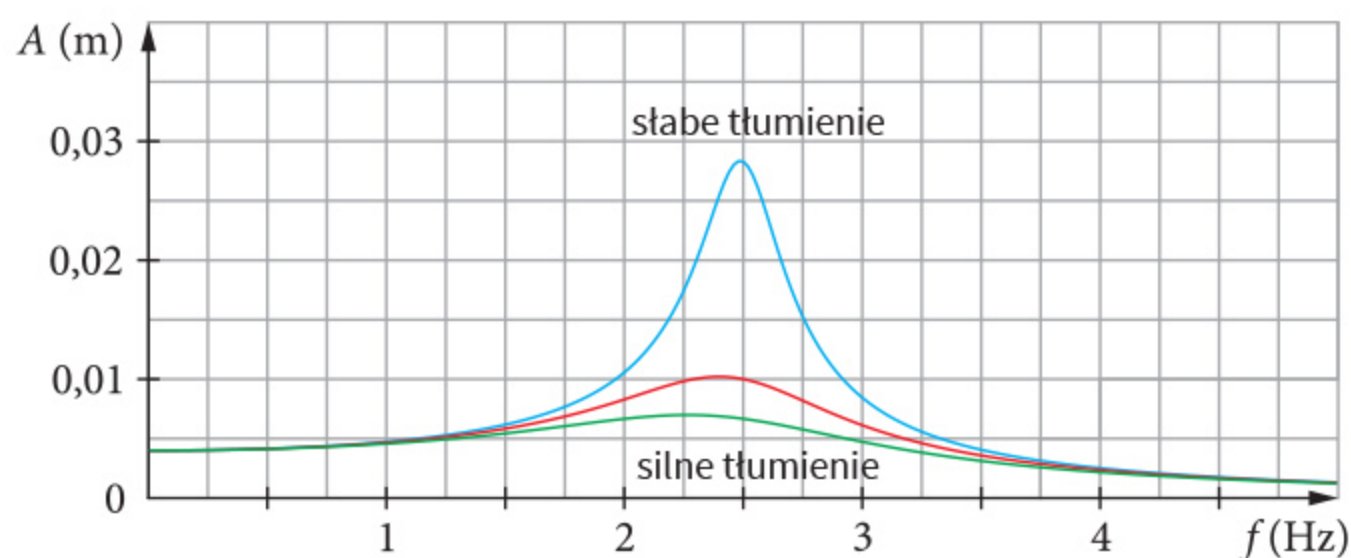
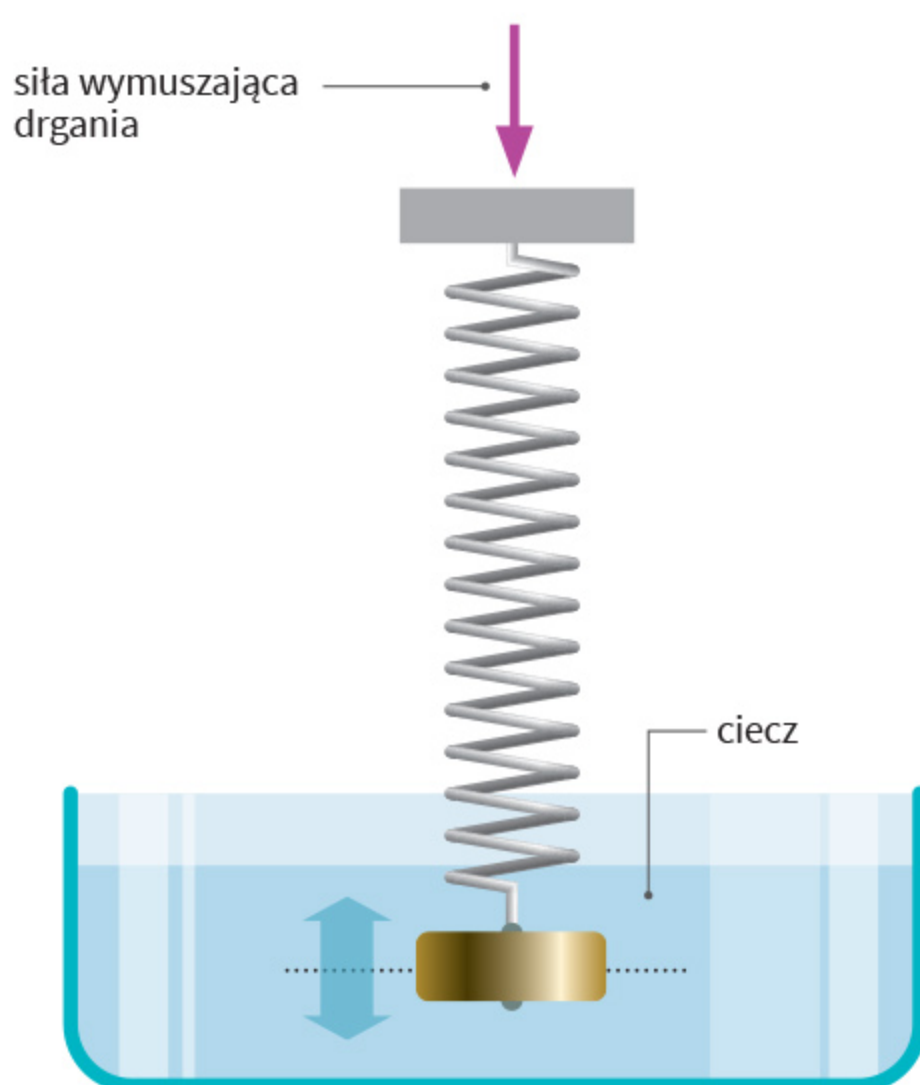
Skieruj na kulkę stały strumień powietrza. Obserwuj zachowanie się kulki. Następnie powtórz doświadczenie, ale kieruj na kulkę powietrze z pojemnika wyłącznie w chwilach oddalania się kulki od wylotu pojemnika. Jakie są różnice w zachowaniu się kulki w obu przypadkach?



WARTO WIEDZIEĆ

Rezonans a tłumienie drgań

Podczas zjawiska rezonansu następuje wzrost amplitudy drgań. O tym, do jakiej wartości może ona wzrosnąć, decyduje tłumienie drgań. Przeprowadzono pewien eksperyment. Na sprężynie zawieszono ciężarek, który poruszał się ruchem drgającym w różnych cieczach. W każdej z nich ruch ciężarka był w różny sposób tłumiony. Układ drgający był pobudzany do drgań za pomocą siły zewnętrznej. Badano, jak amplituda drgań ciężarka zależy od częstotliwości siły wymuszającej drgania dla różnych ośrodków tłumiących.



Na wykresie przedstawiono zależność amplitudy drgań ciężarka od częstotliwości siły wymuszającej. Jak można zauważyć, amplituda drgań ciężarka w rezonansie jest tym większa, im tłumienie drgań jest słabsze. W niektórych sytuacjach tłumienie nie wystarcza do rozproszenia energii dostarczanej do układu drgającego. Następuje wówczas zniszczenie układu drgającego. Na przykład wokalista Jaime Vendera (fot.) potrafi tak dobrać częstotliwość swojego głosu, że jest ona równa częstotliwości własnej drgań kieliszka trzymanego w ręku. Rezonansowe wzmocnienie drgań doprowadza do zniszczenia kieliszka.



DOŚWIADCZENIE 2.

Do doświadczenia będą potrzebne: szklany kieliszek do wina, cienka słomka oraz komputer z podłączonym głośnikiem.

Ustaw kieliszek obok głośnika podłączonego do komputera. W komputerze uruchom program generujący dźwięki o zadanych częstotliwościach. Czy można ustawić taką częstotliwość emitowanego sygnału, aby słomka w kieliszku zaczęła drgać? Czy jest to taka sama częstotliwość dla każdego rodzaju kieliszka?

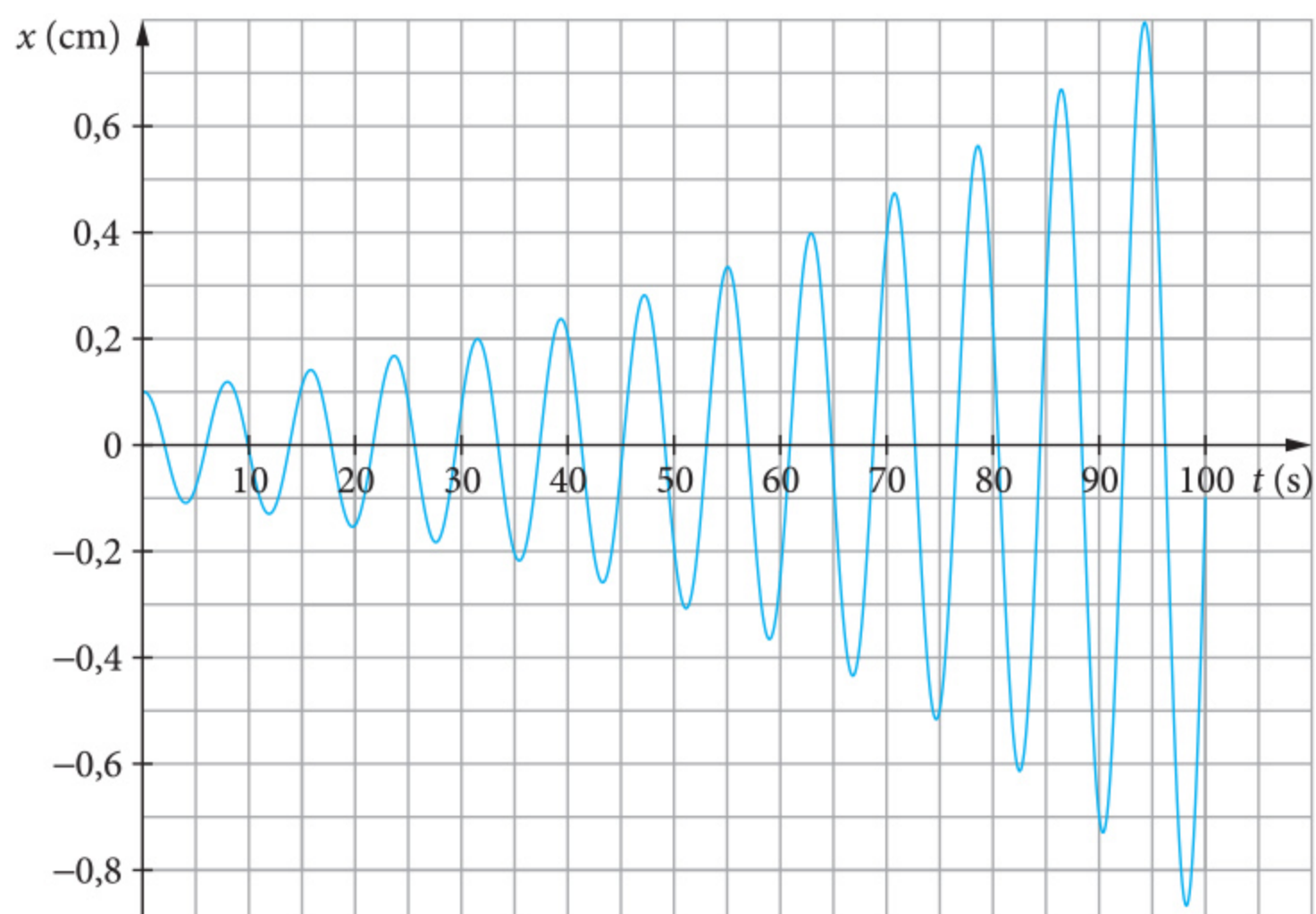
PODSUMOWANIE

- ▶ **Tłumienie drgań** następuje wówczas, gdy na drgające ciało działają siły oporu ruchu.
- ▶ **Drgania wymuszone** to drgania odbywające się pod wpływem zewnętrznej, cyklicznie zmieniającej się siły.
- ▶ **Rezonans** to silny wzrost amplitudy drgań, gdy siła wymuszająca ma częstotliwość równą częstotliwości własnej układu drgającego.

PYTANIA I ZADANIA

1. Przemek zawiesił ciężarek na sprężynie. Drugi koniec sprężyny trzymał w dłoni i spacerował po sali lekcyjnej. Podczas spaceru zmieniał tempo marszu. W pewnym momencie uczniowie obserwujący doświadczenie zauważyli, że gwałtownie wzrosła amplituda drgań ciężarka. Wyjaśnij to zjawisko.
2. Basia zamocowała w swoim samochodzie maskotkę na sprężystym pręcie. Podczas postoju, gdy silnik pracował z małą częstotliwością obrotów, maskotka drgała ze znaczną amplitudą. Podczas jazdy po równej nawierzchni maskotka pozostawała nieruchoma. Wyjaśnij, dlaczego maskotka drgała tylko podczas postoju.
3. Natalia zawiesiła na nitkach o jednakowej długości piłeczkę do tenisa stołowego oraz podobnej wielkości kulę z plasteliny. Oba przedmioty wprowadziła w ruch wahadłowy o tej samej amplitudzie. Który z badanych przedmiotów wcześniej się zatrzyma? Wyjaśnij ten efekt.
4. Na niciach o długościach 1,4 m, 2,5 m oraz 4,1 m zawieszono identyczne stalowe kulki. Na kulki skierowano impulsy strumienia powietrza, uruchamiane co 4 sekundy. Wykonaj potrzebne obliczenia korzystając ze wzoru na s. 26 i zapisz, która z kulek będzie miała największą amplitudę drgań.

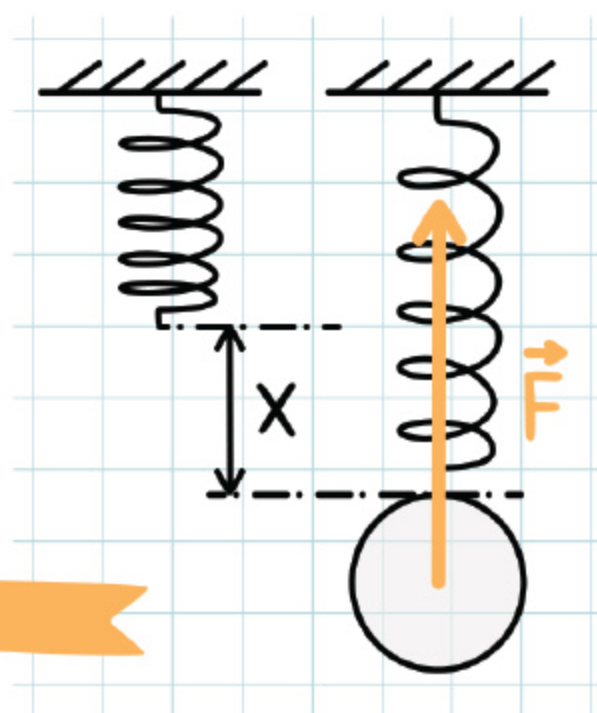
5. Na wykresie przedstawiono zależność wychylenia od czasu dla kulki zawieszanej na sprężynie i pobudzanej do drgań przez siłę zewnętrzną. Oszacuj częstotliwość siły wymuszającej.



DRGANIA

$$F = k \cdot x$$

siła

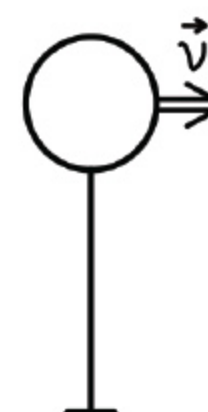
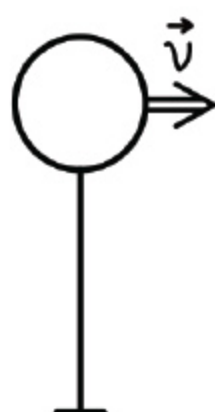
współczynnik
sprężystościodkształcenie
sprężynySPRĘŻYNA DZIAŁA
NA KULKĘ SIŁĄ $\vec{F}$ 

t=0

t=1/4 T

t=2/4 T

t=3/4 T

t=T


POŁOŻENIE RÓWNOWAGI

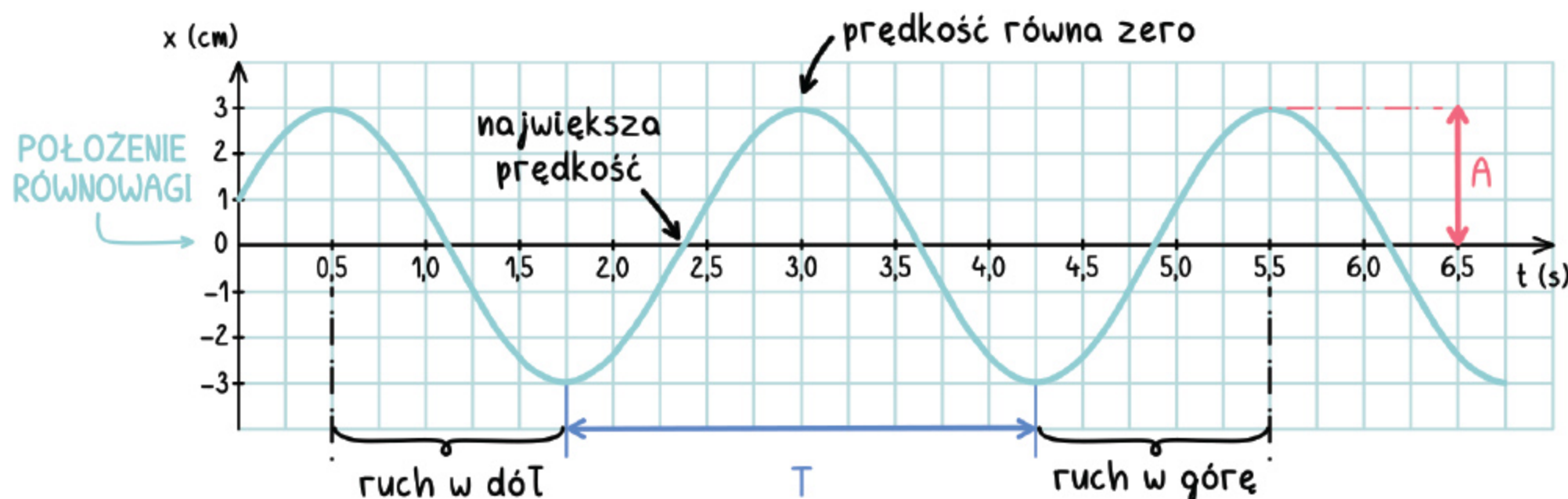
to miejsce,
w którym znajdowałoby się
ciało, gdyby nie drgało.

AMPLITUDA A

to odległość skrajnego
wychylenia od położenia
równowagi.

OKRES DRGAŃ T

to czas jednego
pełnego drgania.



Opory ruchu powodują
tłumienie drgań.

W drganiach tłumionych
amplituda maleje
z upływem czasu.

Drgania wymuszone są to drgania
odbywające się pod wpływem
okresowo zmieniającej się
siły zewnętrznej.

Rezonans to silny wzrost
amplitudy drgań wymuszonych,
gdy częstotliwość siły wymuszającej
jest równa częstotliwości
drgań własnych układu drgającego.

CZĘSTOTLIWOŚĆ

to liczba pełnych drgań wykonanych w jednostce czasu.

Częstotliwość jest odwrotnością okresu.

częstotliwość $f = \frac{1}{T}$ okres drgań

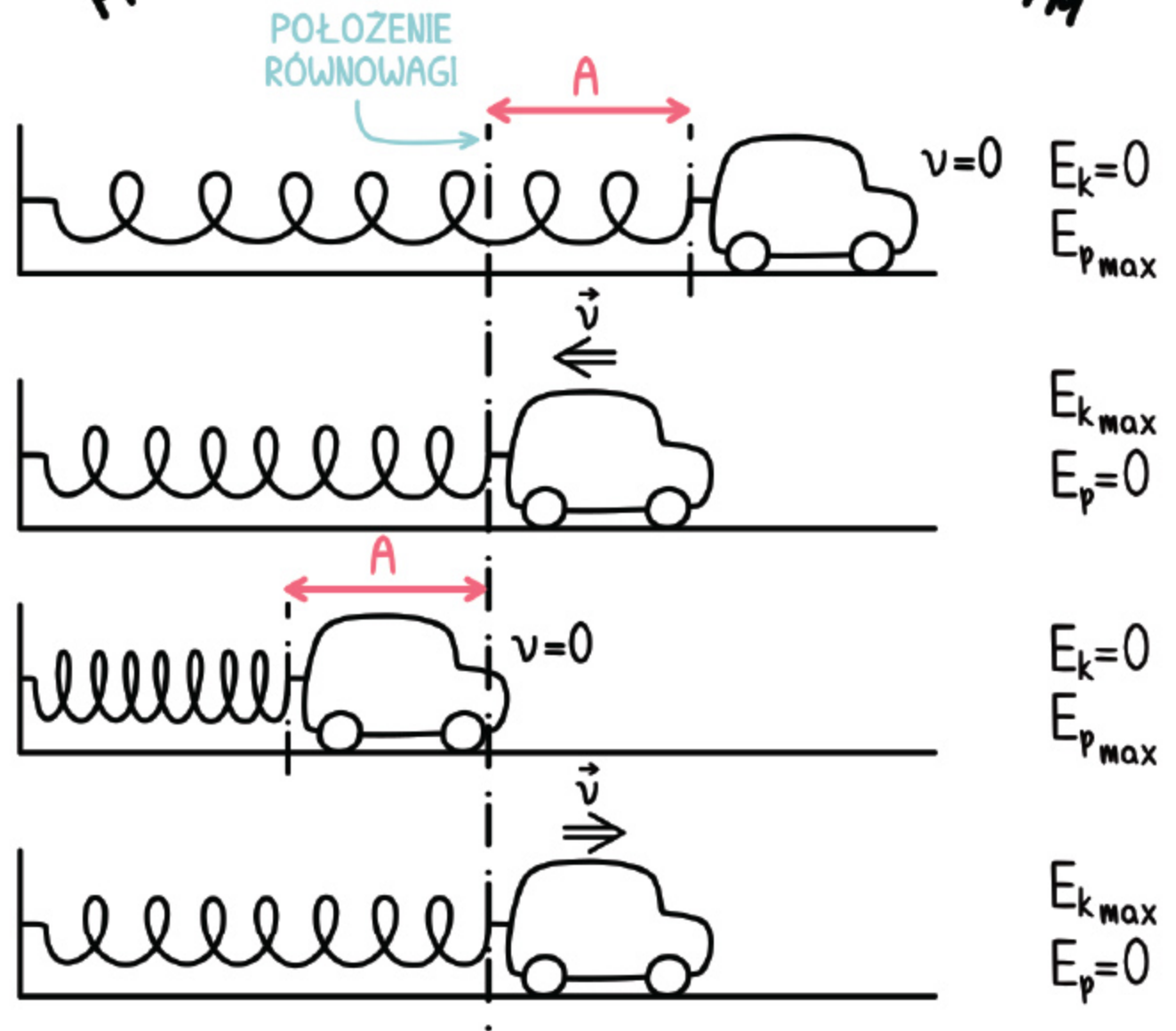
Okres drgań

ciężarka zawieszona na sprężynie

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$$

masa ciężarka
współczynnik sprężystości

PRZEMIANY ENERGII W RUCHU DRGAJĄCYM



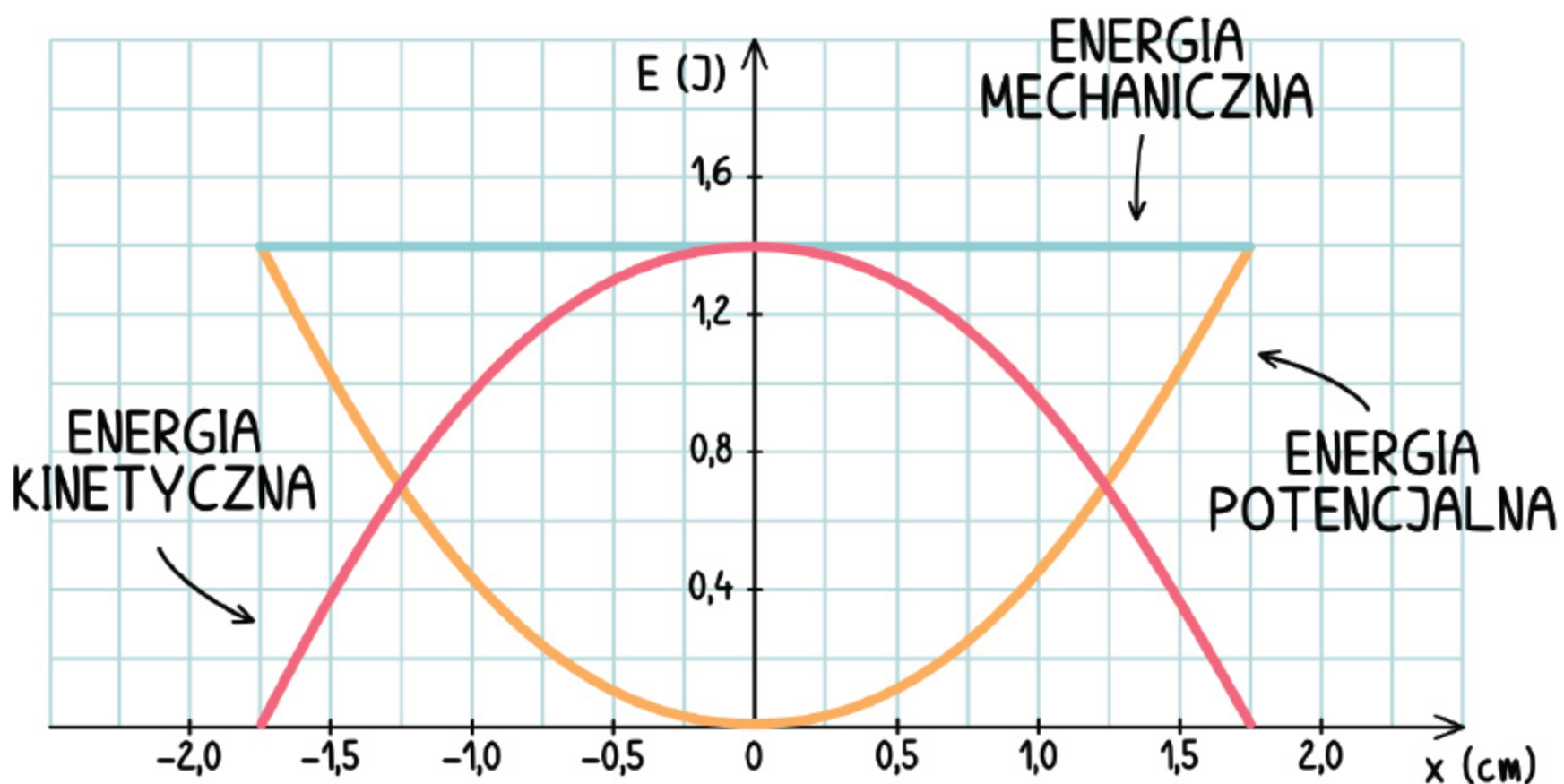
ENERGIA MECHANICZNA

=

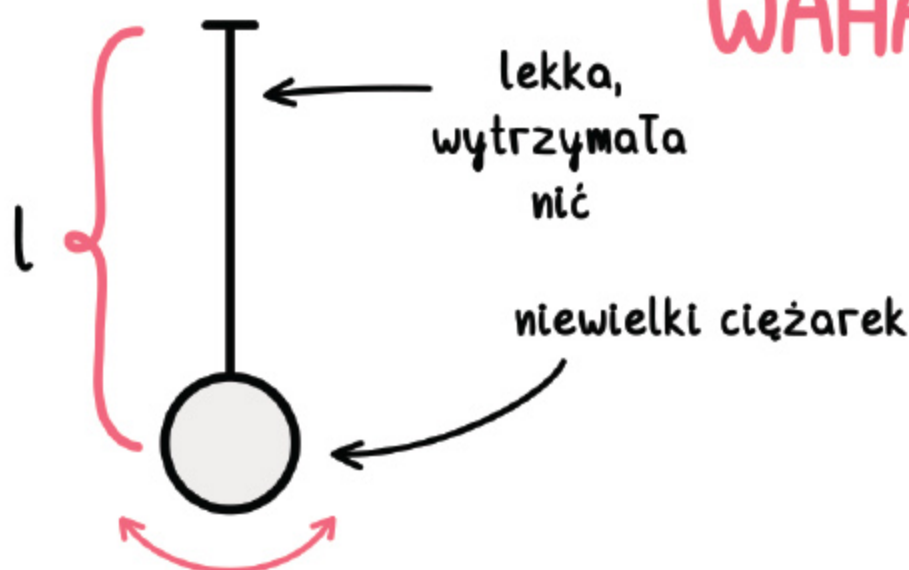
ENERGIA KINETYCZNA

+

ENERGIA POTENCJALNA



WAHADŁO



$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

długość wahadła
przyspieszenie ziemskie

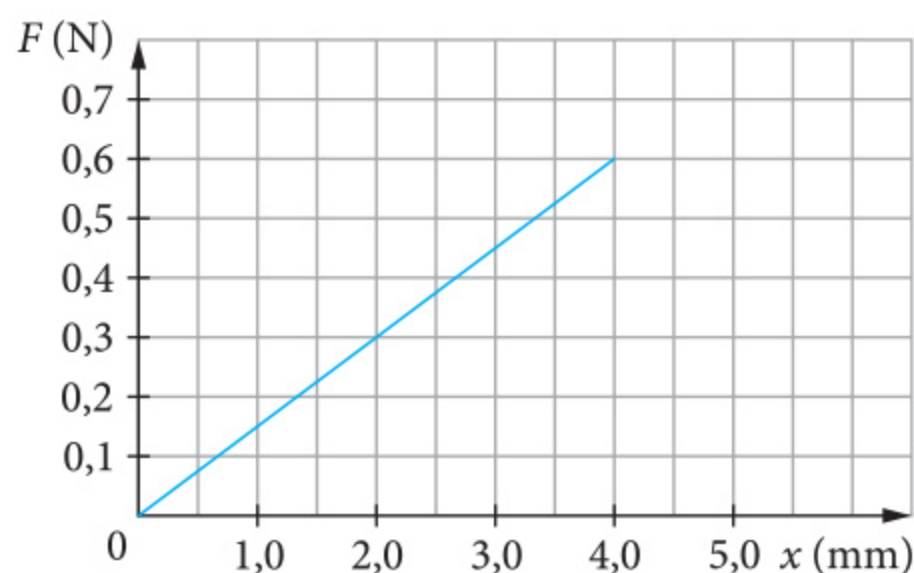
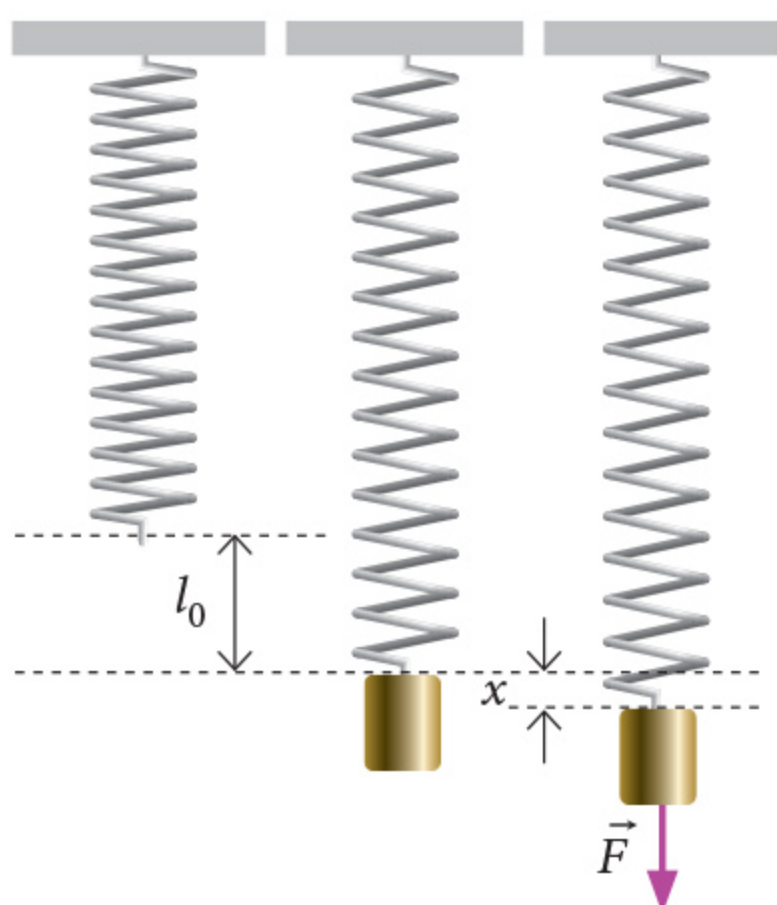
PYTANIA I ZADANIA

1. Na gumce zawieszono plastelinę i wprowadzono ją w ruch drgający. Ruch plasteliny odbywał się w kierunku pionowym. Mierzono okresy drgań dla różnych amplitud, przy czym w każdym momencie ruchu gumka była naprężona.

Zaznacz poprawne dokończenie zdania.

Gdy amplituda drgań wzrośnie dwukrotnie, to okres drgań

- A. wzrośnie dwukrotnie.
 - B. wzrośnie czterokrotnie.
 - C. nie zmieni się.
 - D. wzrośnie $\sqrt{2}$ razy.
2. Karol zauważył, że soplewiczek pływający na powierzchni wody wykonuje 8 pełnych drgań w czasie każdej minuty. Oblicz częstotliwość drgań tego soplewiczka.
 3. Zapisz dwie główne cechy siły powodującej harmoniczny ruch drgający.
 4. Na sprężynie zawieszono ciężarek o masie 140 g. Pod wpływem obciążenia sprężyna się wydłużyła. Gdy dodatkowo zadziałała siła w dół, to rozciągnięcie sprężyny się zwiększyło. Wykres przedstawia zależność dodatkowej siły działającej na ciężarek od rozciągnięcia ponad początkowe wydłużenie sprężyny.



Ciężarek wprowadzono w ruch drgający o amplitudzie 2 mm.

Na podstawie wykresu wyznacz:

- a) maksymalną wartość siły wypadkowej powodującej ruch ciężarka;
 - b) maksymalne przyspieszenie ciężarka.
5. Energia mechaniczna wahadła podczas ruchu drgającego jest równa 0,24 J. W pewnym momencie energia potencjalna tego wahadła wynosi 0,16 J.

Zaznacz poprawne dokończenie zdania.

Energia kinetyczna wahadła w tym momencie jest równa

- A. 0,12 J
- B. 0,08 J
- C. 0,40 J
- D. 0,44 J

6. Zawieszony na sprężynie ciężarek wykonywał drgania o częstotliwości 0,24 Hz. Początkowa amplituda drgań tego ciężarka była równa 1,2 cm. Następnie amplitudę drgań ciężarka zwiększono do 2,4 cm przy tej samej częstotliwości drgań.

Wybierz właściwe dokończenie zdania spośród A–C oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–2.

Maksymalna wartość siły powodującej ruch ciężarka

A.	wzrosła dwukrotnie,	ponieważ wartość tej siły	1.	zależy od częstotliwości drgań.
B.	pozostała taka sama,		2.	zależy od amplitudy drgań.
C.	zmaląa dwukrotnie,			

7. Na huśtawce siedzi Kasia. Stojąca za nią mama powoduje wzrost amplitudy drgań huśtawki poprzez delikatne popychanie pleców dziewczynki.

Oceń prawdziwość zdań. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe.

1.	Wartość siły, jaką mama działa na Kasię, musi być większa niż maksymalna wartość siły wypadkowej powodującej ruch drgający.	P	F
2.	Zwrot siły, jaką mama działa na Kasię, jest zgodny ze zwrotem siły wypadkowej powodującej ruch drgający.	P	F
3.	Siła, jaką mama działa na Kasię, powoduje wzrost energii drgań.	P	F

8. Zosia zawiesiła ciężarek na sprężynie. Ze sprężyną w wyciągniętej ręce w czasie 12 s wykonała 15 kroków – pokonała odległość 10 m. Zauważyła, że amplituda drgań ciężarka w tym czasie wyraźnie wzrosła.

Oszacuj częstotliwość drgań ciężarka zawieszonego na sprężynie.

9. Wahadło Foucaulta w Centrum Nauki Kopernik w Warszawie to kula o masie 121 kg zawieszona na linie o długości 36 m. Wyznacz okres drgań tego wahadła.

10. Podczas nietłumionego ruchu drgającego energia mechaniczna drgań pozostaje stała. **Oceń prawdziwość zdań. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe.**

1.	Energia kinetyczna ciała w ruchu drgającym jest równa energii potencjalnej w wychyleniu równym połowie amplitudy.	P	F
2.	Suma energii kinetycznej oraz energii potencjalnej podczas takiego ruchu jest stała.	P	F
3.	Gdy ciało przechodzi przez położenie równowagi, jego energia kinetyczna osiąga wartość maksymalną.	P	F

Najważniejsze pojęcia

- amplituda [*amplitude*] 7
- częstotliwość [*frequency*] 7
- częstotliwość własna [*natural frequency*] 35
- drgania [*oscillations*] 6
- drgania tłumione [*damped oscillations*] 30, 31
- drgania wymuszone [*forced oscillations*] 35
- odkształcenie [*deformation*] 13, 18
- okres [*period*] 7, 16, 26
- położenie równowagi [*equilibrium position*] 7
- rezonans [*resonance*] 36
- ruch drgający [*oscillation*] 6
- ruch harmoniczny [*harmonic motion*] 9, 14
- sprężystość [*elasticity*] 13
- wahadło [*pendulum*] 25
- wahadło Foucaulta [*Foucault pendulum*] 27
- wahadło torsyjne [*torsion pendulum*] 22
- współczynnik sprężystości [*spring constant*] 13, 16, 18
- wychylenie [*displacement*] 7, 14



FALE I OPTYKA

Jak policyjny radar może zmierzyć prędkość auta? Czy fatamorganę można zobaczyć tylko na pustyni? Jak to możliwe, że można zobaczyć Słońce, które znalazło się już poniżej horyzontu?

Żeby to zrozumieć, wystarczy uważnie przeczytać dział FALE I OPTYKA.





6. Rodzaje fal

- Mechanizm rozchodzenia się fali
- Fale poprzeczne i fale podłużne

→ **Przypomnij sobie** wielkości opisujące ruch drgający.

Słowo *fala* najczęściej wywołuje skojarzenia z falą rozchodzącą się po powierzchni jeziora lub morza. Jednak z falami mamy do czynienia o wiele częściej – światło czy dźwięk to też fale. W kolejnych rozdziałach będziemy odkrywać podstawowe własności różnych rodzajów fal.

Mechanizm rozchodzenia się fali

Fala to rozchodzące się drgania pewnego ośrodka. Tworzy się, gdy drgania jednego punktu są przekazywane innym punktom ośrodka. Gdy pewien punkt, zwany **źródłem fali**, zacznie drgać, wymusi drgania sąsiednich punktów ośrodka. Ponieważ drgania wszystkich punktów ośrodka są wymuszone, mają tę samą częstotliwość co źródło. **Każdy fragment ośrodka, w którym rozchodzi się fala, drga z częstotliwością źródła fali.**

Rozważmy sprężysty sznur napięty pewną siłą. Napięcie sznura powoduje, że drganie jednej jego części pobudza do drgania sąsiednią część. Na sznurze wyróżniono punkty leżące w jednakowych odległościach (ryc. 6.1). Na początku sznura znajduje się źródło drgań o częstotliwości f . Okres drgań tego źródła jest równy $T = \frac{1}{f}$ (I). Przeanalizujemy mechanizm rozchodzenia się fali.

Chwila $t = 0$ – punkt 1. sznura znajduje się w położeniu równowagi, i właśnie zaczyna poruszać się w górę. Pozostałe punkty sznura jeszcze nie drgają (II).

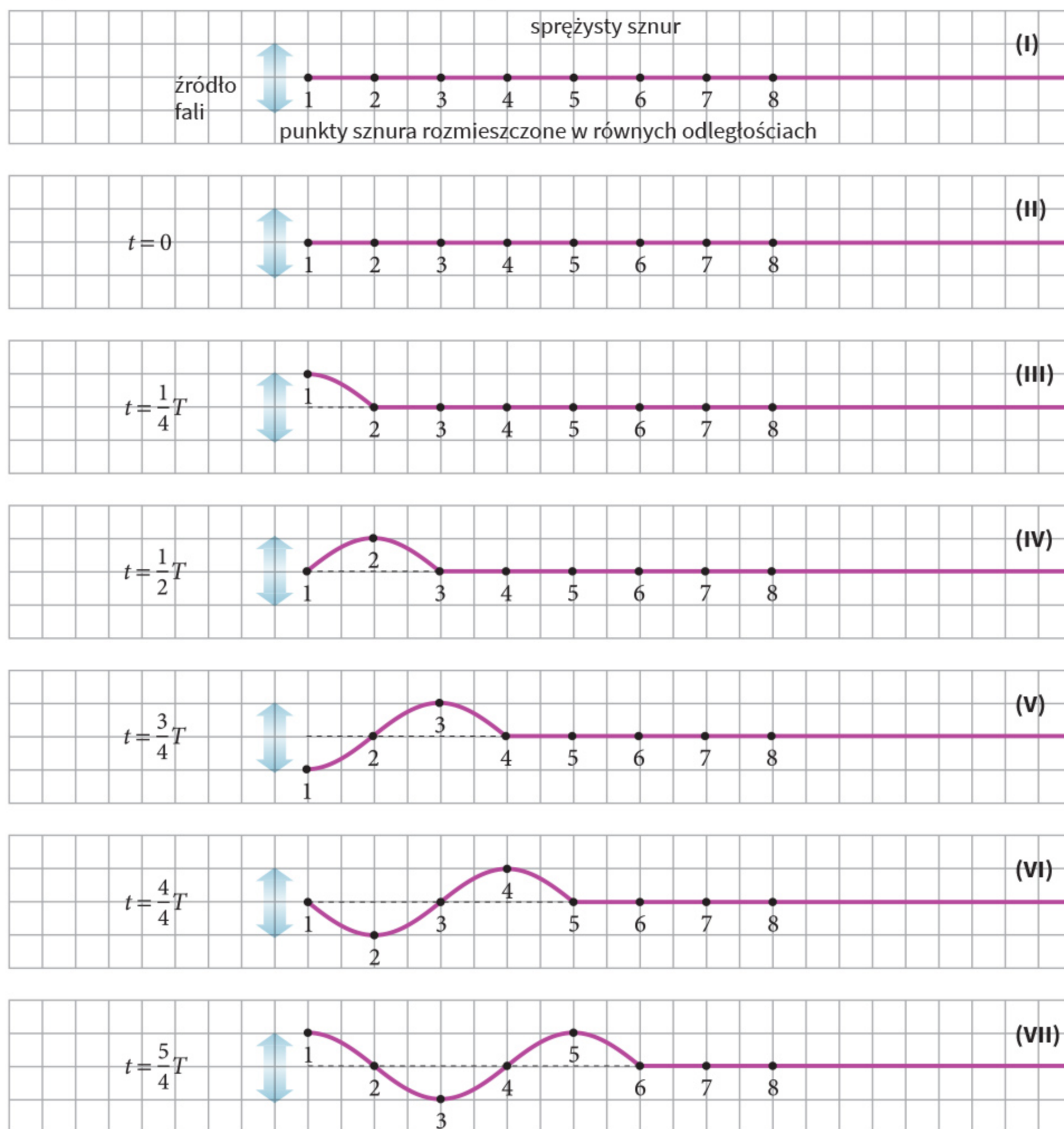
Chwila $t = \frac{1}{4}T$ – punkt 1. znajduje się w skrajnym górnym położeniu. Do punktu 2. fala właśnie dociera (III).

Chwila $t = \frac{2}{4}T$ – punkt 1. wraca do położenia równowagi, punkt 2. znajduje się w górnym skrajnym położeniu. Do punktu 3. fala właśnie dociera (IV).

Chwila $t = \frac{3}{4}T$ – punkt 1. znajduje się w dolnym skrajnym położeniu, punkt 2. wraca do położenia równowagi, punkt 3. znajduje się w górnym skrajnym położeniu. Do punktu 4. fala właśnie dociera (V).

Chwila $t = \frac{4}{4}T$ – punkt 1. wraca do położenia równowagi, punkt 2. znajduje się w dolnym skrajnym położeniu, punkt 3. wraca do położenia równowagi, punkt 4. znajduje się w górnym skrajnym położeniu. Do punktu 5. fala właśnie dociera (VI).

Chwila $t = \frac{5}{4}T$ – punkt 1. znajduje się w górnym skrajnym położeniu, punkt 2. wraca do położenia równowagi, punkt 3. znajduje się w dolnym skrajnym położeniu, punkt 4. wraca do położenia równowagi, punkt 5. znajduje się w górnym skrajnym położeniu. Do punktu 6. fala właśnie dociera (VII).



Ryc. 6.1. Mechanizm rozchodzenia się fali

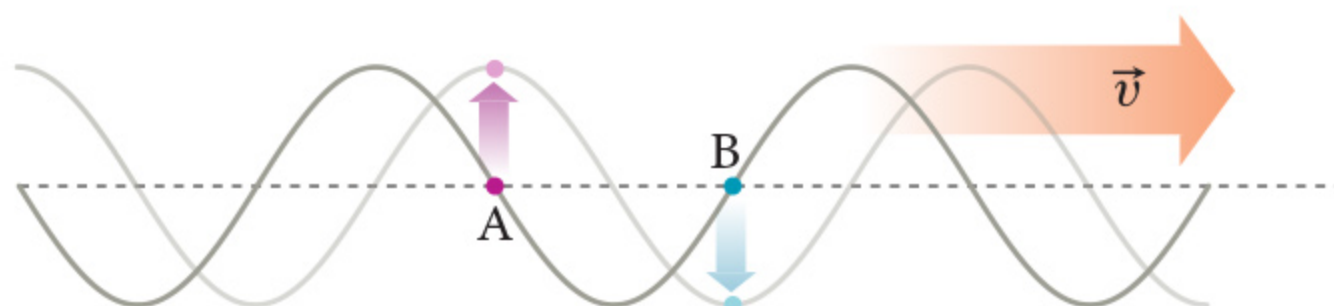
Po przeanalizowaniu przebiegu rozchodzenia się fali wzdłuż sznura można zauważyć, że:

- każdy punkt sznura drga wokół położenia równowagi (ale nie przemieszcza się w poziomie),
- częstotliwość drgań punktów sznura jest taka sama jak częstotliwość drgań źródła,
- ruch drgający kolejnych punktów sznura jest opóźniony względem punktów poprzedzających,
- każdy drgający fragment sznura ma energię. Energia uzyskiwana przez kolejne fragmenty pochodzi ze źródła fal.

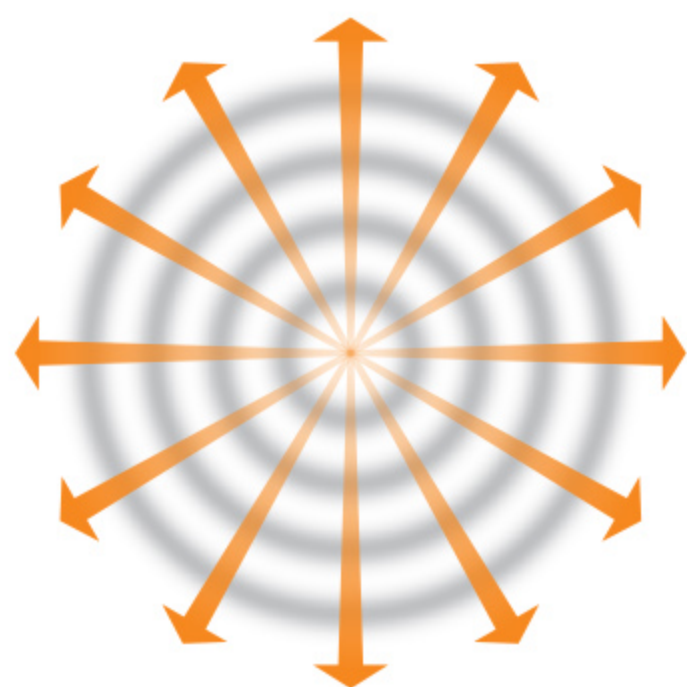
Ruch falowy jest jednym ze sposobów przekazywania energii. Widok unoszących się wraz z falą statków jest tego najlepszym dowodem. Aby unieść obiekt o masie wielu ton, potrzeba sporo energii.

PRZYKŁAD 1.

Na rysunku przedstawiono schematycznie falę wytworzoną na sznurze, biegnącą w prawo, w dwóch krótko po sobie następujących momentach. Punkty A i B sznura, znajdujące się początkowo w położeniu równowagi, wyróżniono kolorem. W którą stronę poruszają się fragmenty sznura w punktach A oraz B?



Fala rozchodzi się w prawo, więc punkt A za chwilę będzie się znajdował w skrajnym górnym położeniu. Wobec tego punkt A porusza się w górę. Punkt B za chwilę będzie się znajdował w skrajnym dolnym położeniu, czyli porusza się w dół.



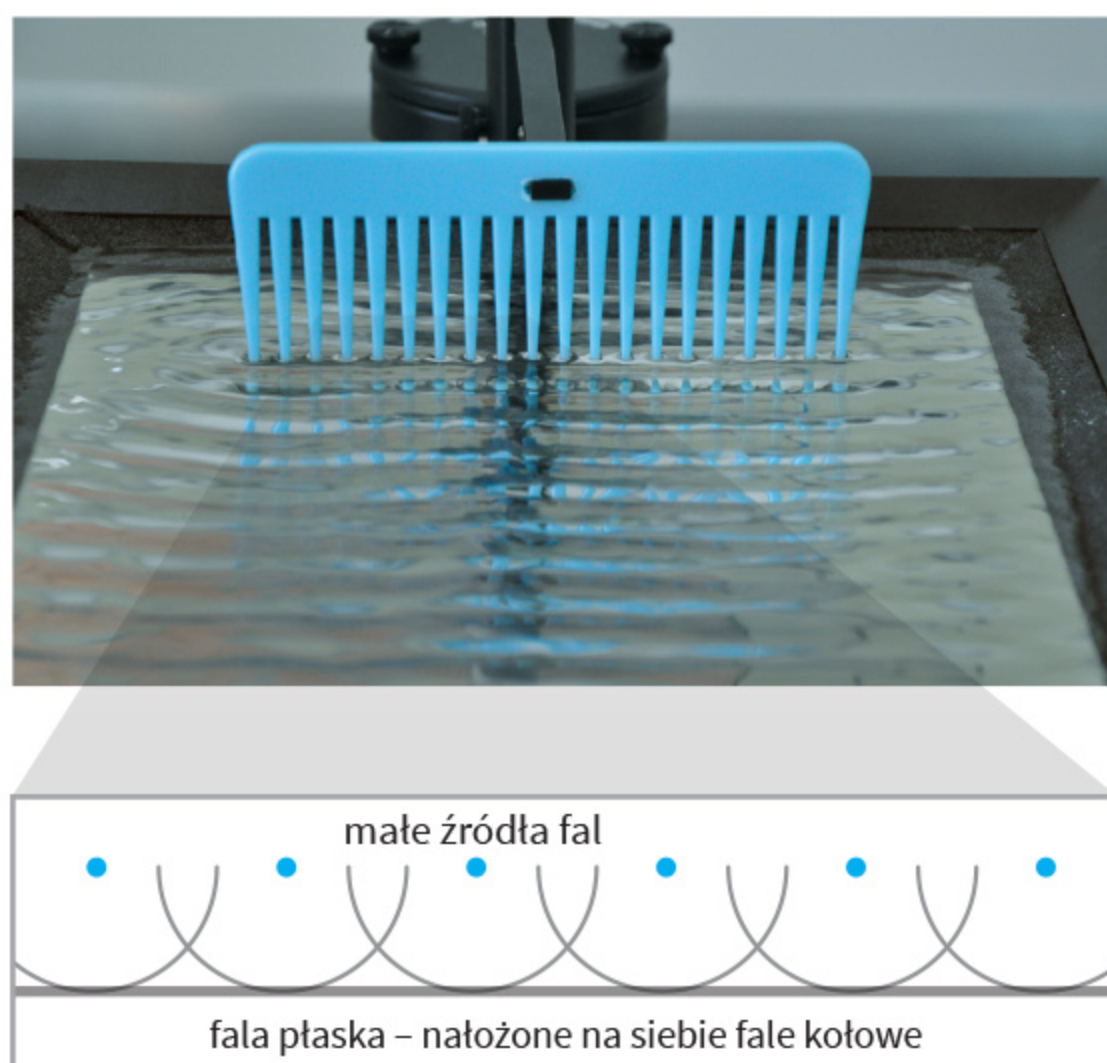
Ryc. 6.2. Od miejsca upadku kamienia na powierzchni wody fala rozchodzi się we wszystkie strony. Okręgi na rysunku obrazują powierzchnie falowe, strzałki – kierunek biegu fali

Fale płaskie i fale kołowe

Gdy na powierzchnię wody pada kamień, staje się on źródłem fali rozchodzącej się tak samo we wszystkie strony. Powstałe grzbiety i doliny na powierzchni wody przyjmują kształt okręgów rozchodzących się promieniście od centrum (ryc. 6.2). Taką falę nazywamy **kołową**. Linie grzbietów (lub dolin) będziemy nazywać **powierzchniami falowymi**. Kierunek rozchodzenia się fal jest prostopadły do tych powierzchni.

Gdy fala rozchodzi się w przestrzeni, powierzchnie falowe mają kształt kulisty. **Falą kulistą** jest w przybliżeniu fala dźwiękowa, jaką wytwarzają np. grające instrumenty muzyczne. Tego typu fala słabnie wraz ze wzrostem odległości od swojego źródła. Dlaczego tak się dzieje? **Cała energia fali pochodzi od jej źródła.** Ale im dalej od źródła, tym więcej elementów ośrodka się porusza, czyli ta sama energia przypada na coraz większy obszar. Amplituda takiej fali musi zatem maleć wraz z odległością od źródła.

Gdy małe źródła fal leżą blisko siebie na jednej linii (ryc. 6.3), powierzchnie falowe, czyli kolejne grzbiety i doliny fal pochodzących z tych źródeł, nakładają się na siebie i tworzą linię prostą. Każde ze źródeł emituje falę kołową, a widocznym efektem jest tak zwana **fala płaska**. Na morzu również mamy do czynienia z taką właśnie falą. W odróżnieniu od fal kołowych (kulistych) amplituda fali płaskiej nie zmienia się, bo rozmiary powierzchni falowych się nie zmieniają. Fala płaska powstaje również wówczas, gdy źródło jest jedno, lecz jest bardzo duże (np. burta wodowanego bokiem statku).



Ryc. 6.3. Fala płaska na wodzie, powstająca w wyniku nałożenia wielu fal kołowych wytworzonych za pomocą grzebienia



Ryc. 6.4. Fale na powierzchni morza

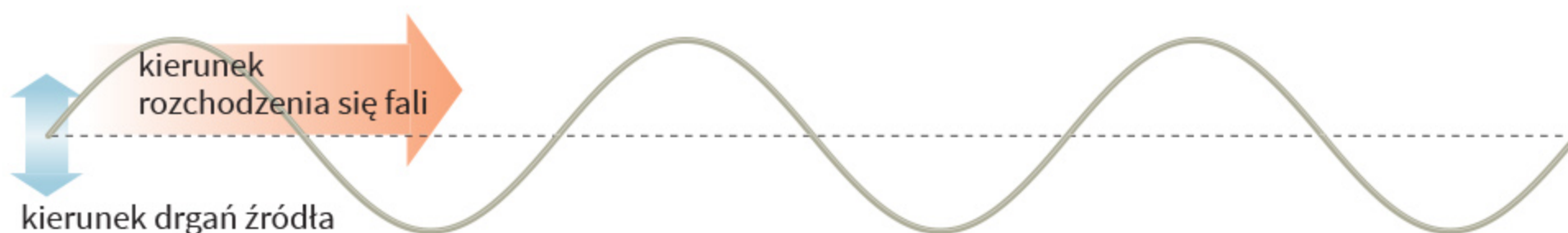
DOŚWIADCZENIE 1.

Przygotuj prostokątną formę do ciasta. Nalej do niej wody – do wysokości około 1,5 cm. Wzdłuż krótszego boku formy ustaw poziomo linijkę. Uderzaj rytmicznie krawędzią linijki w powierzchnię wody.

Obserwuj fale powstałe na powierzchni wody. Porównaj je z falami z ryciny 6.3.

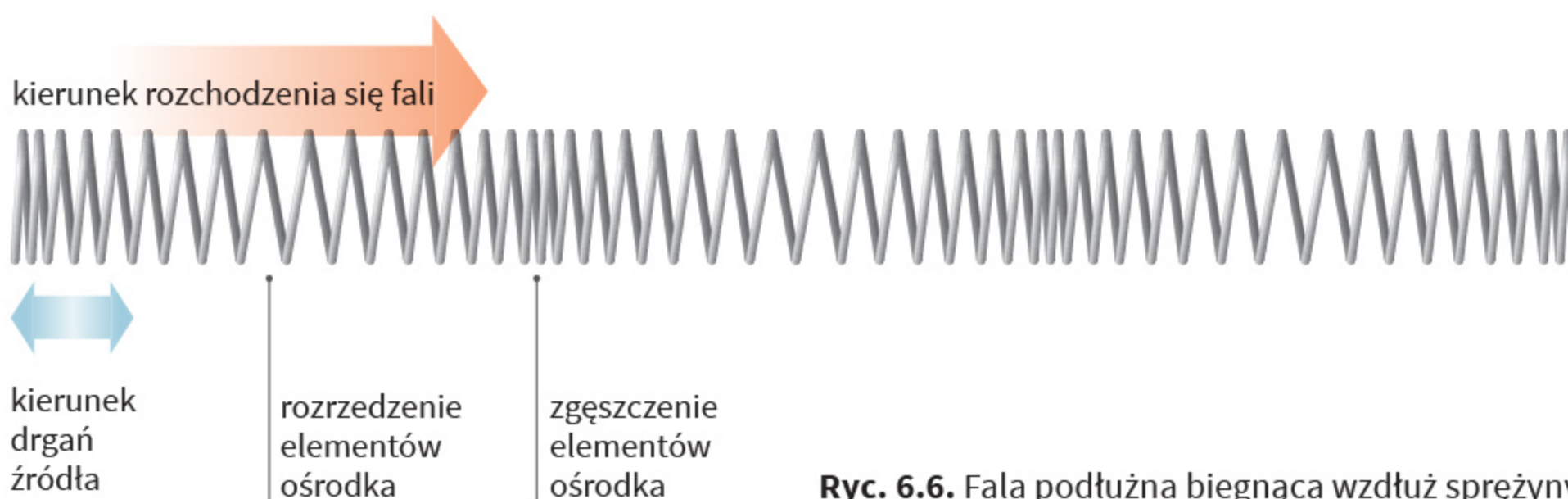
Fale poprzeczne i podłużne

Gdy fragmenty ośrodka drgają prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali, mamy do czynienia z **falą poprzeczną**. Na przykład fala rozchodząca się wzdłuż sprężystego sznura.



Ryc. 6.5. Fala poprzeczna powstająca na sznurze, którego koniec porusza się ruchem drgającym

Gdy fragmenty ośrodka drgają równoległe do kierunku rozchodzenia się fali, mamy do czynienia z **falą podłużną**. W ośrodku powstają wówczas obszary zgęszczeń i rozrzedzeń, które poruszają się jedno za drugim (ryc. 6.6).



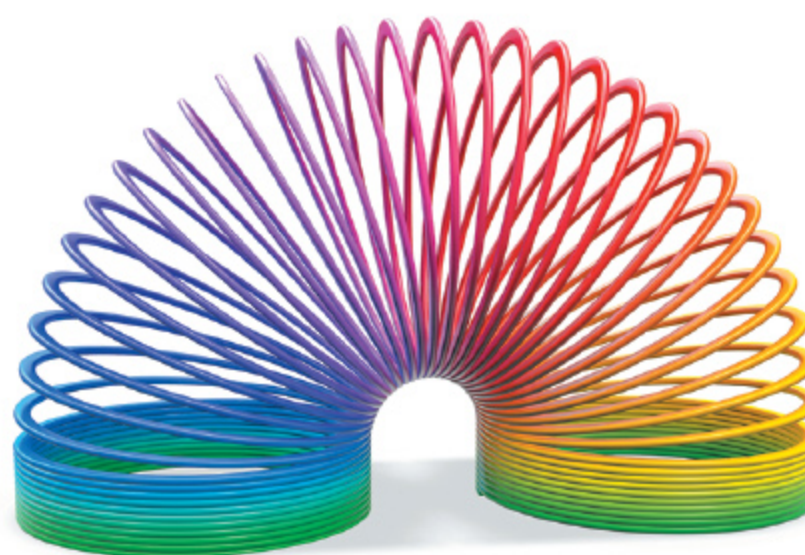
Ryc. 6.6. Fala podłużna biegnąca wzdłuż sprężyny

DOŚWIADCZENIE 2.

Położ poziomo na stole sprężynę typu slinky. Jeden z jej końców przymocuj do stołu, a drugi trzymaj w dłoni. Rozciągnij sprężynę.

- Poruszaj dłonią w lewo i prawo w kierunku prostopadłym do kierunku wyznaczonego przez rozciągniętą sprężynę.
- Poruszaj dłonią w kierunku wyznaczonym przez rozciągniętą sprężynę, tak by spowodowało to naprzemienne jej ściśkanie i rozciąganie.

Zaobserwuj różnice w powstałych w obu przypadkach impulsach falowych.



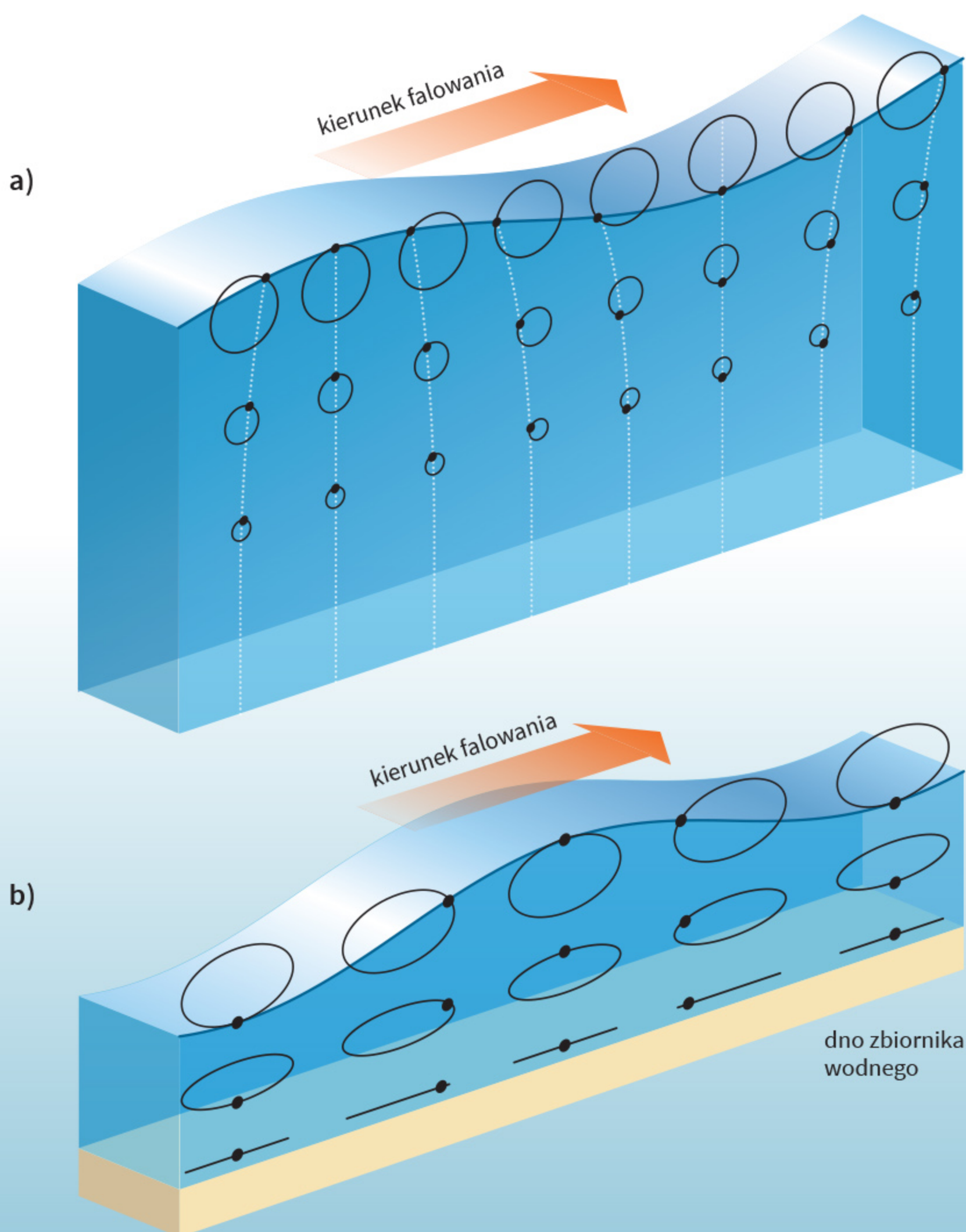
Przykładem fali podłużnej jest fala dźwiękowa. Podczas emisji dźwięku membrana głośnika porusza się na przemian do przodu i do tyłu (gdy patrzymy od strony membrany). Popchnięta przez membranę warstwa powietrza ulega chwilowemu zgęszczeniu, które to popycha kolejną warstwę powietrza i tak dalej. W ten sposób rozchodzą się od głośnika kolejne zgęszczenia rozdzielone rozrzedzeniami powietrza (ryc. 6.7).



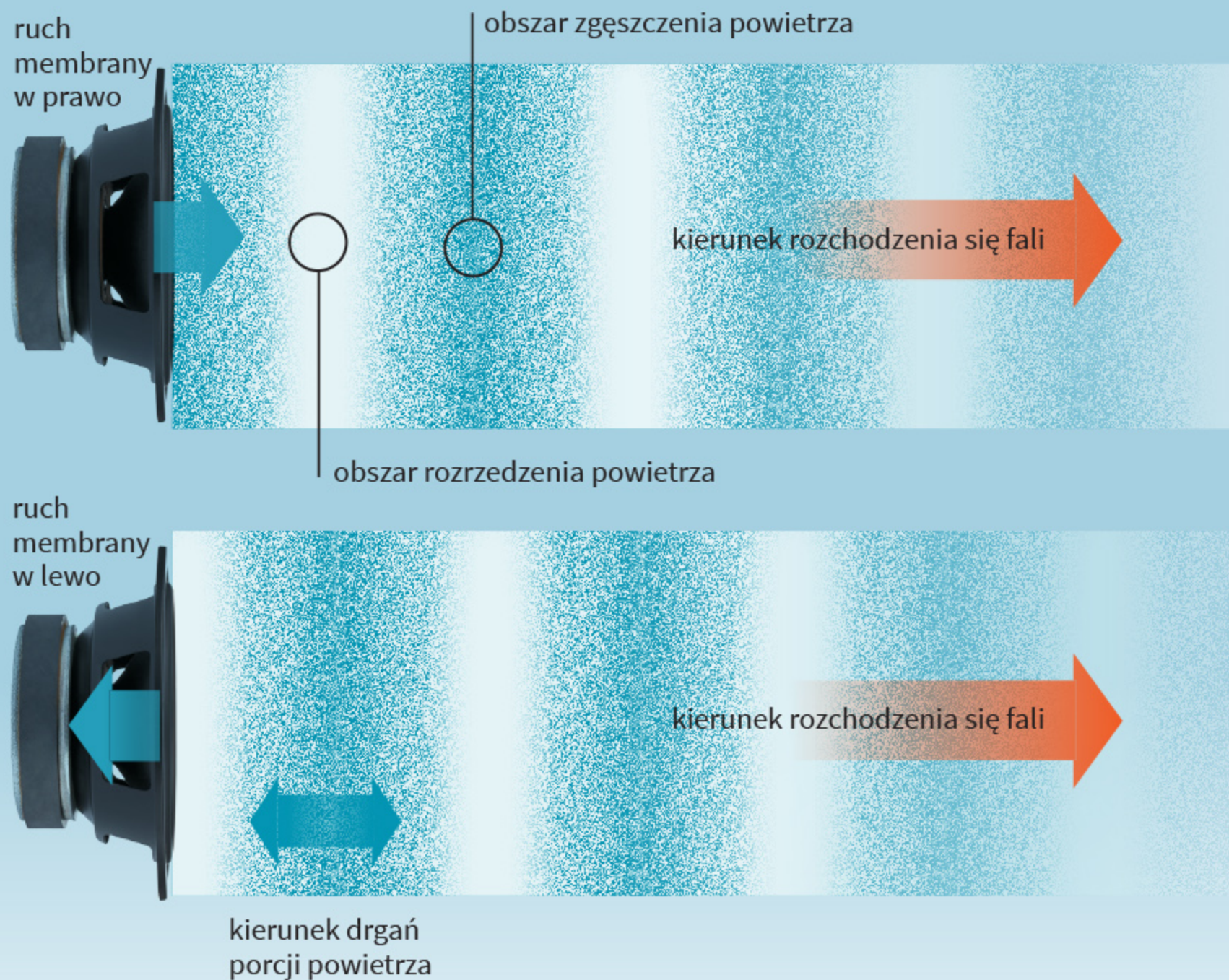
WARTO WIEDZIEĆ

Fale na wodzie

Gdy patrzymy na fale rozchodzące się po powierzchni wody, wydaje się nam, że elementy powierzchni wody wykonują ruch w kierunku pionowym, tak jak w fali poprzecznej. Dokładniejsze obserwacje pozwalają jednak stwierdzić, że porcje wody poruszają się w przybliżeniu po okręgach. Promienie tych okręgów maleją wraz ze wzrostem głębokości. Z tego powodu na głęboko zanurzonych okrętach podwodnych nie odczuwa się falowania morza. Również płytki platform wiertniczych umieszcza się na tyle głęboko pod powierzchnią wody, aby fale nie powodowały ich ruchu. Z kolei w płytkiej wodzie jej ruchy powodują przemieszczanie się materiału skalnego po dnie zbiornika wodnego.



Schemat ruchu porcji wody w czasie falowania w wodzie głębokiej (a) i płytkiej (b)



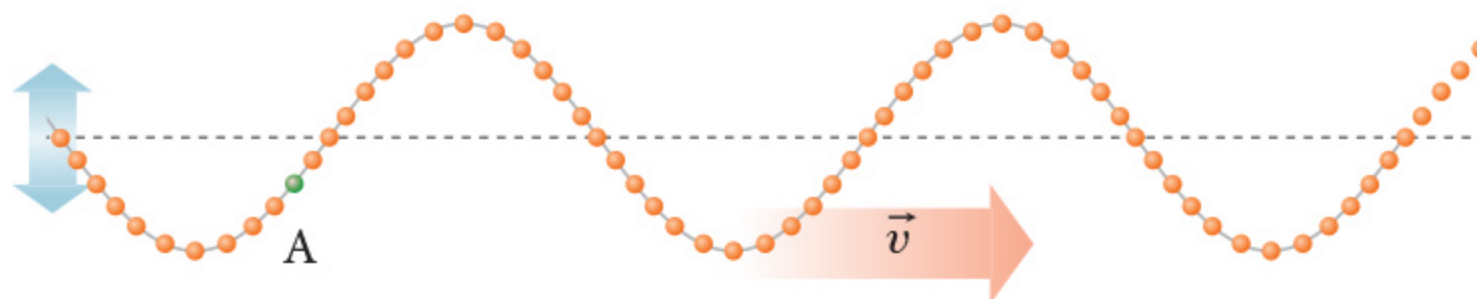
Ryc. 6.7. Dźwięk rozchodzi się w postaci fali podłużnej

PODSUMOWANIE

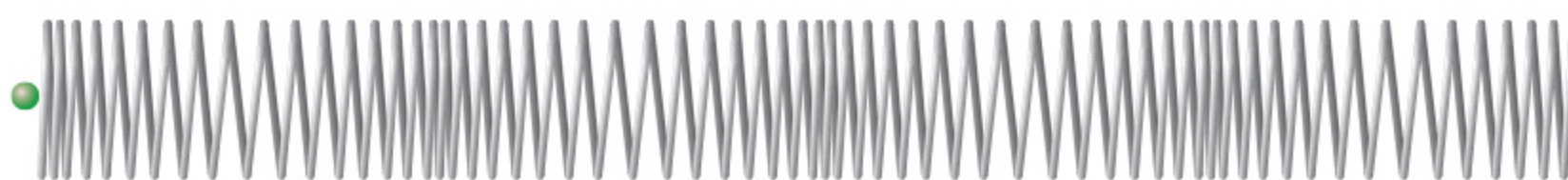
- ▶ Fala tworzy się, gdy drgania jednego punktu ośrodka są przekazywane innym punktom ośrodka.
- ▶ W rozchodzącej się fali każdy fragment ośrodka drga z częstotliwością źródła fali.
- ▶ **Fala kulista** (na płaszczyźnie – kołowa) rozchodzi się równomiernie we wszystkie strony od swojego źródła. Amplituda tej fali maleje wraz z odległością od źródła.
- ▶ **Fala płaska** to fala, której powierzchnie falowe tworzą linie proste. Powstaje przez nałożenie wielu fal kołowych, których źródła drgają blisko siebie.
- ▶ **Fala poprzeczna** to fala, w której elementy ośrodka drgają w kierunkach prostopadłych do kierunku rozchodzenia się fali.
- ▶ **Fala podłużna** to fala, w której elementy ośrodka drgają wzdłuż kierunku rozchodzenia się fali.

PYTANIA I ZADANIA

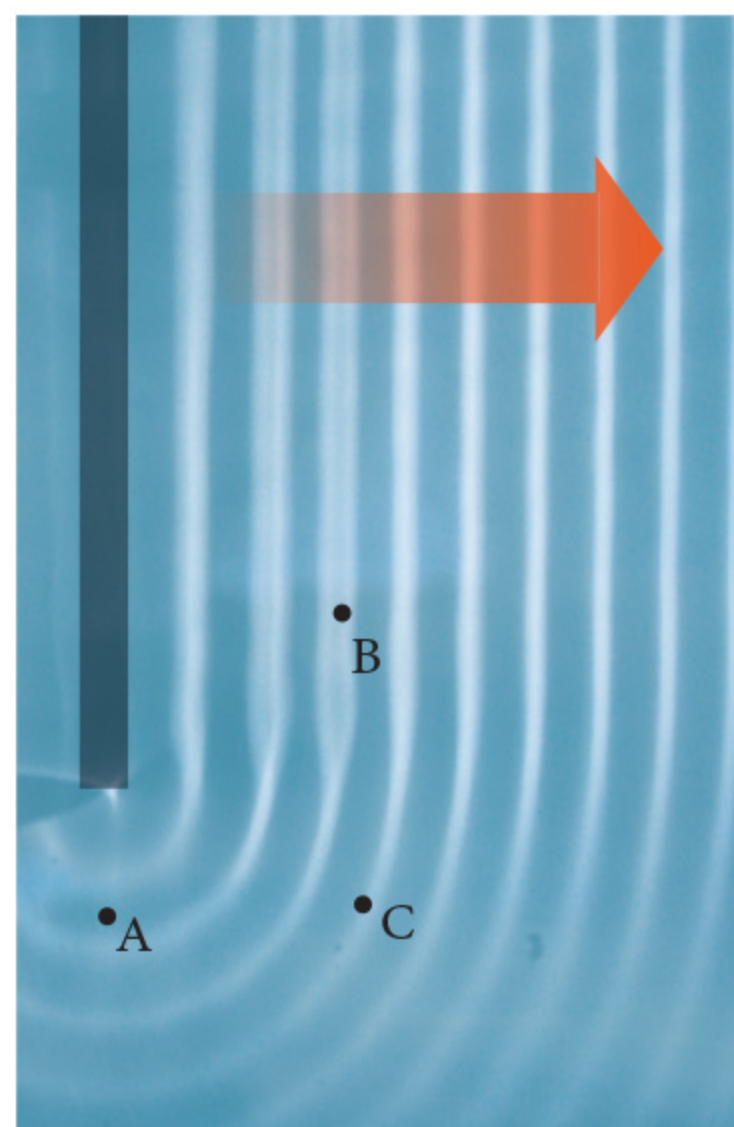
1. Na rysunku przedstawiono falę rozchodzącą się wzdłuż sznura z koralikami.
 - a) Na podstawie rysunku zapisz, czy jest to fala poprzeczna, czy podłużna.
 - b) W którą stronę w danym momencie porusza się koralik oznaczony literą A?

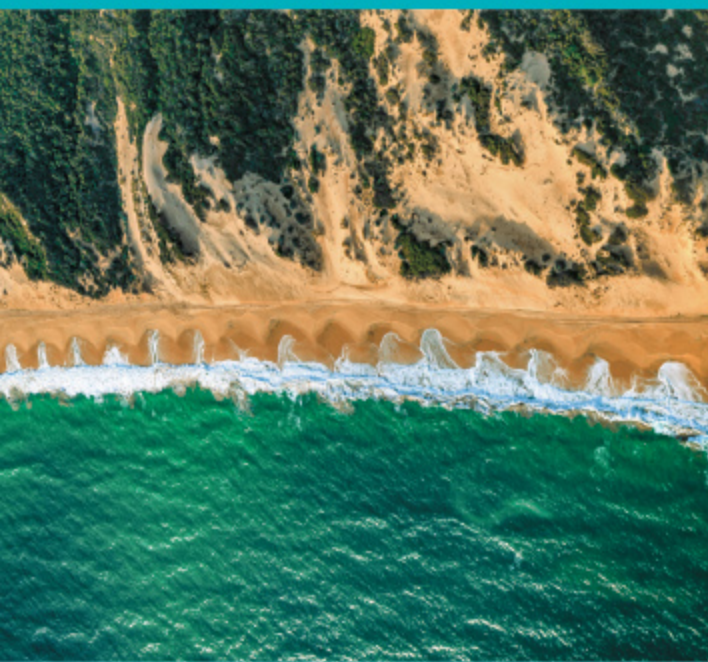


2. Na schematycznym rysunku przedstawiono falę rozchodzącą się w sprężynie.



- a) Jaki to rodzaj fali?
 - b) W jakim kierunku powinno poruszać się źródło, aby powstała taka fala?
3. Na fotografii przedstawiono widok z góry na falę rozchodzącą się po powierzchni wody. Narysuj w zeszycie podobny rysunek. Zaznacz strzałkami kierunek biegu fali w punktach A, B oraz C. Wskaż, w których miejscach jest to fala kołowa, a w których płaska.
4. W filmach *science fiction*, w których bohaterowie przemierzają przestrzeń kosmiczną, słyszymy huk silników raketowych pojazdów kosmicznych, które przelatują obok. Czy w rzeczywistości można usłyszeć silniki rakiet lecących w pobliżu? Uzasadnij odpowiedź.
5. Powierzchnie falowe oddalają się od źródła ruchem jednostajnym. Czy w podobny sposób przemieszczają się elementy ośrodka, w którym rozchodzi się fala?





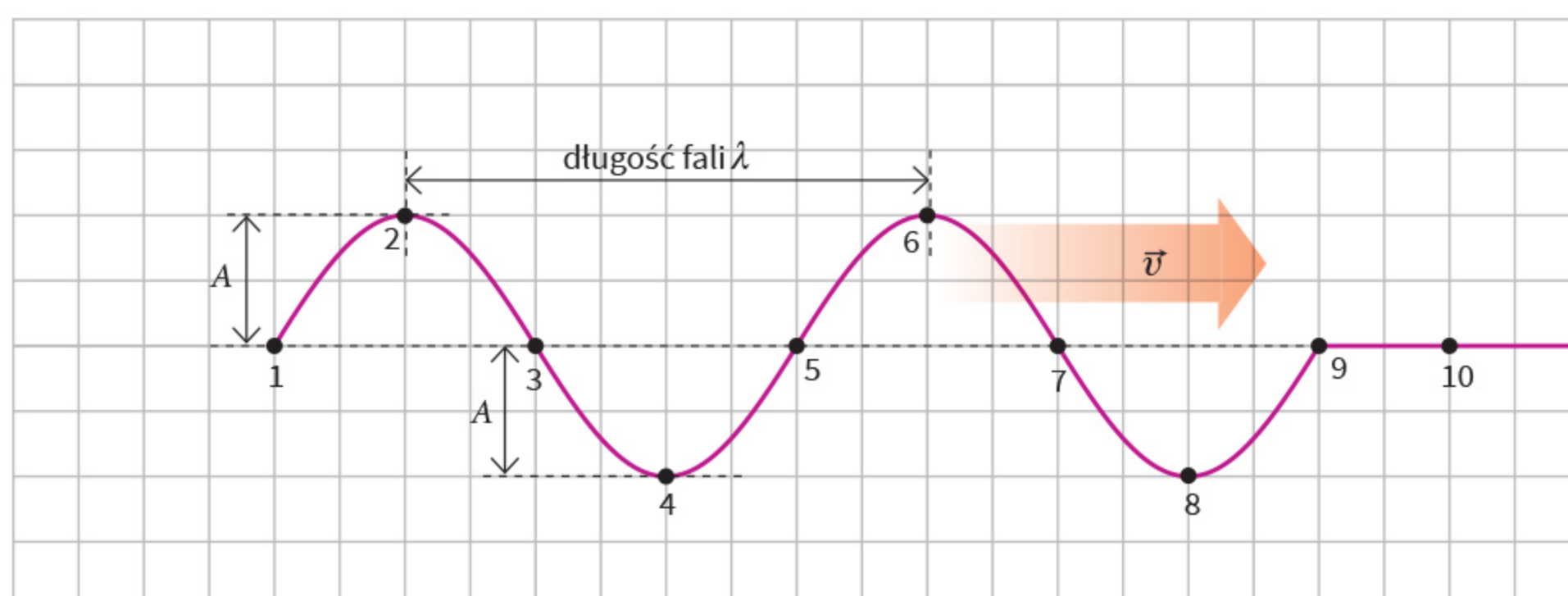
7. Wielkości opisujące fale

- Wielkości opisujące fale
- Prędkość, długość, częstotliwość fali i związki między tymi wielkościami

→ **Przypomnij sobie** wielkości opisujące ruch drgający.

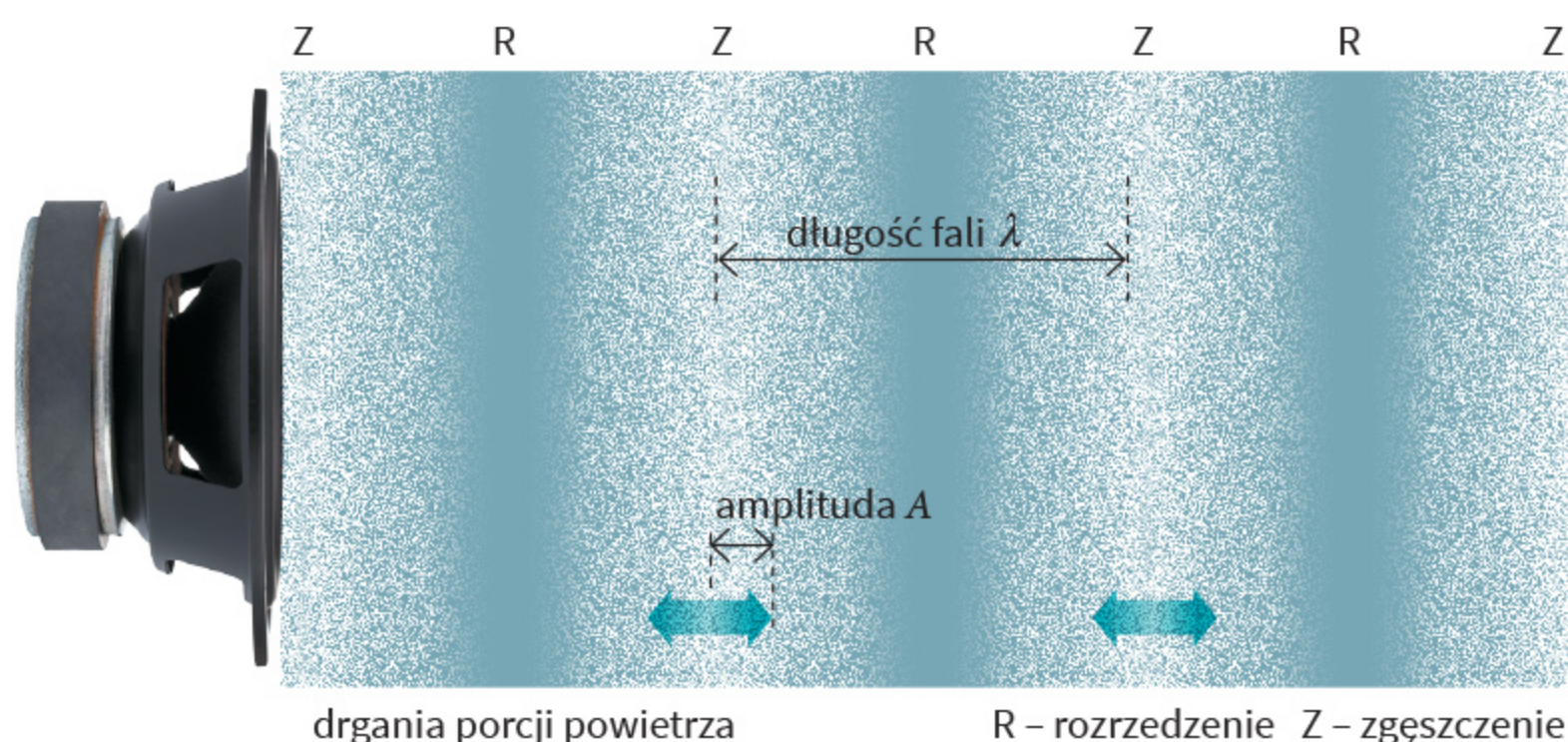
Fala to drgania rozchodzące się w pewnym ośrodku. Poszczególne punkty ośrodka poruszają się ruchem drgającym i właśnie dlatego do opisu fali używamy pojęć znanych z opisu tego ruchu.

Podstawowe wielkości opisujące fale



Ryc. 7.1. Schematyczny rysunek biegnącej fali poprzecznej. Na rysunku zaznaczono amplitudę, prędkość i długość fali

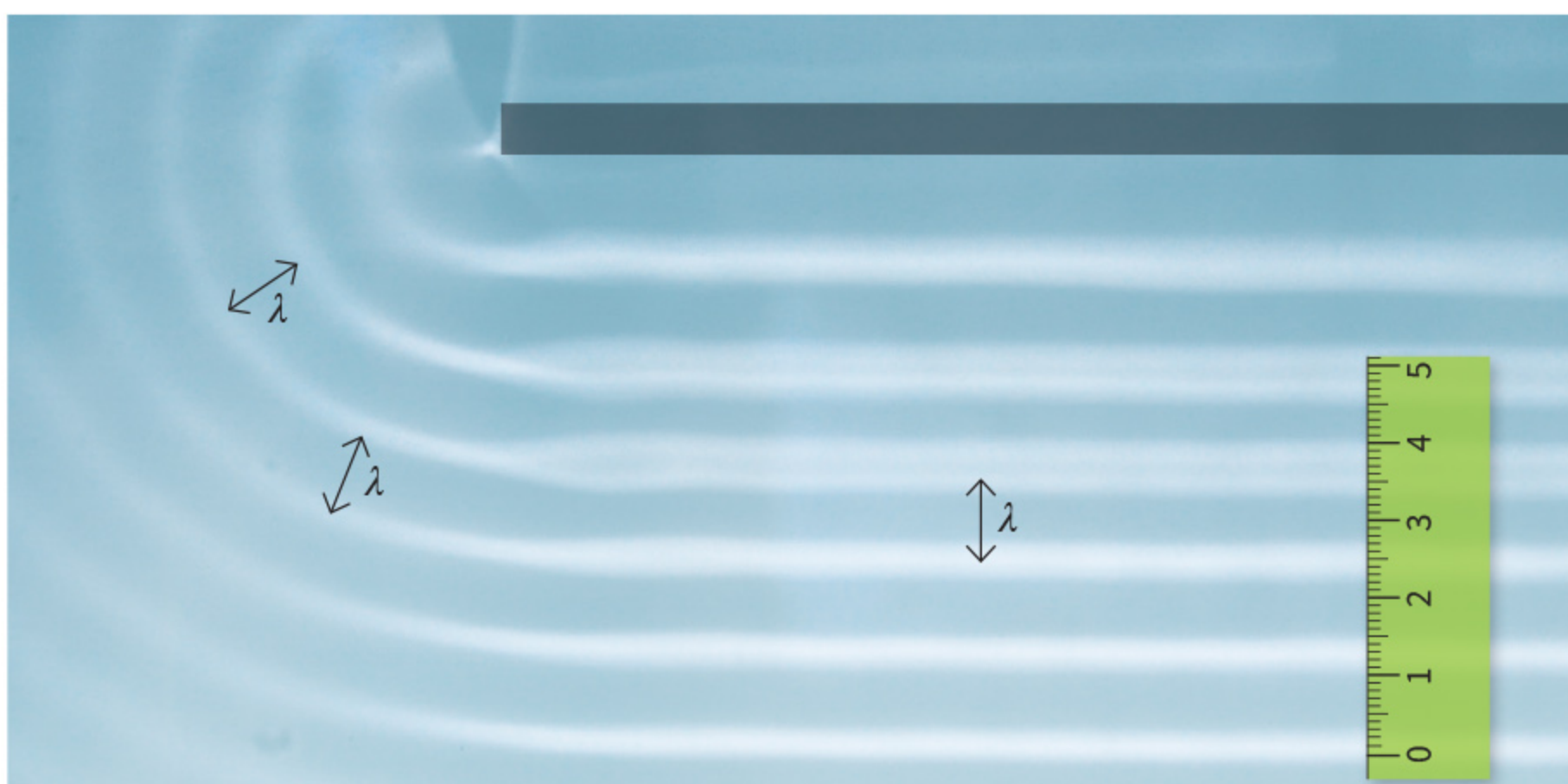
Na rycinie 7.1 przedstawiono schematycznie falę biegnącą z prędkością $\vec{v}$ w prawą stronę wzdłuż sznura. **Prędkość fali $\vec{v}$** to prędkość, z jaką porusza się powierzchnia falowa, na przykład grzbiet fali. **O prędkości rozchodzenia się fali decydują własności ośrodka, w którym się ona rozprzestrzenia.** **Amplituda fali A** to największe wychylenie punktu ośrodka z położenia równowagi. **Długość fali λ** to odległość między najbliższymi grzbietami (lub dolinami) fali poprzecznej, a w przypadku fali podłużnej – odległość między najbliższymi zgęszczeniami elementów ośrodka (ryc. 7.2). Elementy ośrodka oddalone od siebie o długość fali drgają jednakowo, to znaczy jednocześnie osiągają maksymalne wychylenie i jednocześnie przechodzą przez położenie równowagi. Mówimy, że są w tej samej fazie drgań.



Ryc. 7.2. Długością fali podłużnej jest odległość między kolejnymi zgęszczeniami

Częstotliwość fali f to częstotliwość drgań punktów ośrodka, w którym rozchodzi się fala. O częstotliwości fali decyduje jej źródło. Można powiedzieć, że częstotliwość fali to liczba powierzchni falowych (grzbietów lub zgęszczeń) docierających do wybranego punktu w jednostce czasu. **Częstotliwość fali nie zależy od ośrodka, w którym rozchodzi się ta fala.** Nie zmienia się również wówczas, gdy fala przechodzi z jednego ośrodka do innego (np. gdy dźwięk przechodzi przez ściany).

PRZYKŁAD 1.



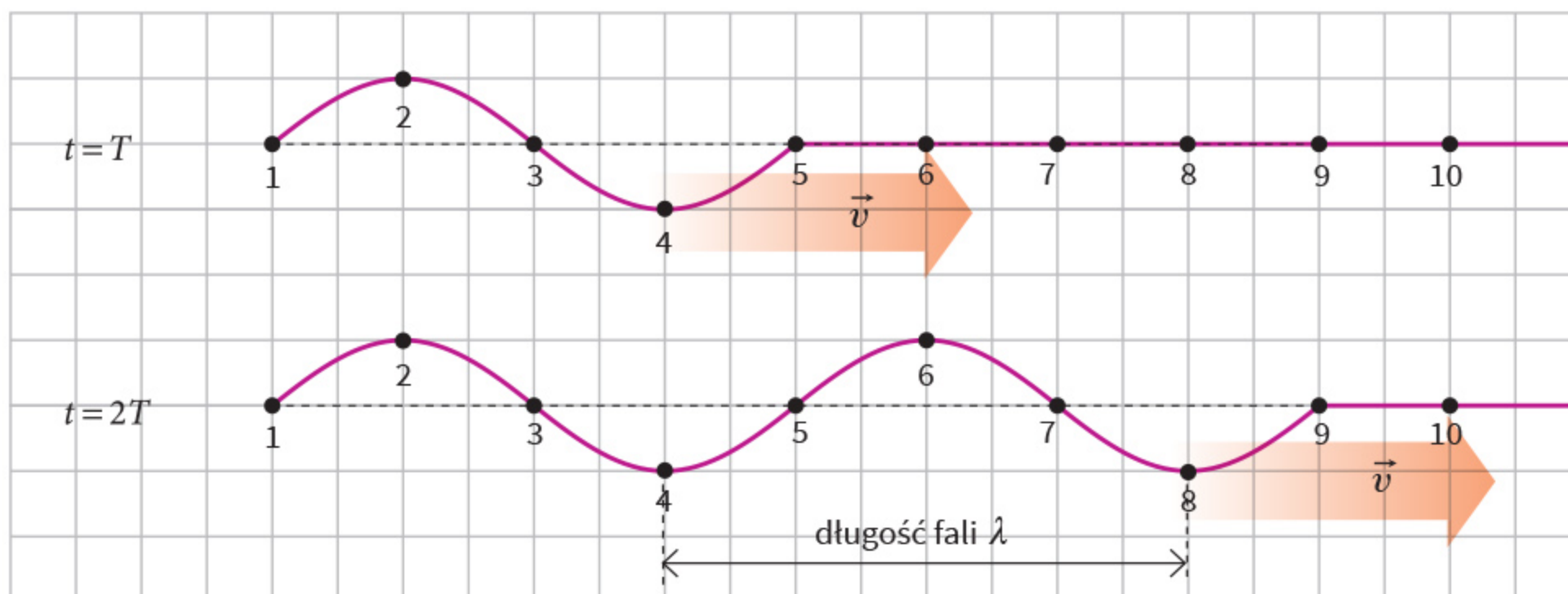
Na fotografii przedstawiono falę na powierzchni wody, widzianą z góry. Wyznaczmy długość tej fali.

Aby wyznaczyć długość fali, mierzymy odległość między sąsiednimi grzbietami, prostopadłe do powierzchni falowych.

Z fotografii możemy odczytać, że długość tej fali wynosi około 1,2 cm.

Związek między λ , v i f

Prędkość fali zależy od ośrodka, w którym się ona rozchodzi. Jeżeli cechy ośrodka (np. gęstość, ściśliwość, temperatura) są w każdym punkcie takie same, prędkość fali jest stała.



Ryc. 7.3. W czasie jednego okresu fala przemieszcza się na odległość równą jej długości

Przeanalizujmy rycinę 7.3. W czasie, w którym źródło wykona jedno pełne drganie (czyli w czasie jednego okresu T), fala przesunie się o jedną długość λ . Wobec tego, gdy podzielimy drogę (długość fali) przez czas (okres), otrzymamy prędkość fali:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (1)$$

Ponieważ $T = \frac{1}{f}$, można powiązać prędkość fali z jej długością i częstotliwością wzorem:

$$v = \lambda \cdot f \quad (2)$$

Dla danego ośrodka zarówno częstotliwość, jak i prędkość fali pozostają stałe, zatem długość fali zależy od jej częstotliwości oraz od jej prędkości w danym ośrodku. Gdy zmieniają się ośrodek i prędkość fali, zmienia się również jej długość ($\lambda = \frac{v}{f}$).

PRZYKŁAD 2.

Basia wypoczywająca nad jeziorem zauważyła, że grzbiety fal rozchodzących się po powierzchni wody uderzają o brzeg 10 razy w ciągu minuty. Oszacowała, że długość tych fal jest równa 1,5 m. Obliczmy prędkość fal na wodzie w tym przypadku.

Jeśli grzbiety uderzały o brzeg 10 razy w czasie 1 minuty, to częstotliwość fali wynosiła:

$$f = \frac{n}{t} = \frac{10}{60 \text{ s}} = \frac{1}{6} \text{ Hz}$$

Wobec tego możemy obliczyć prędkość fali:

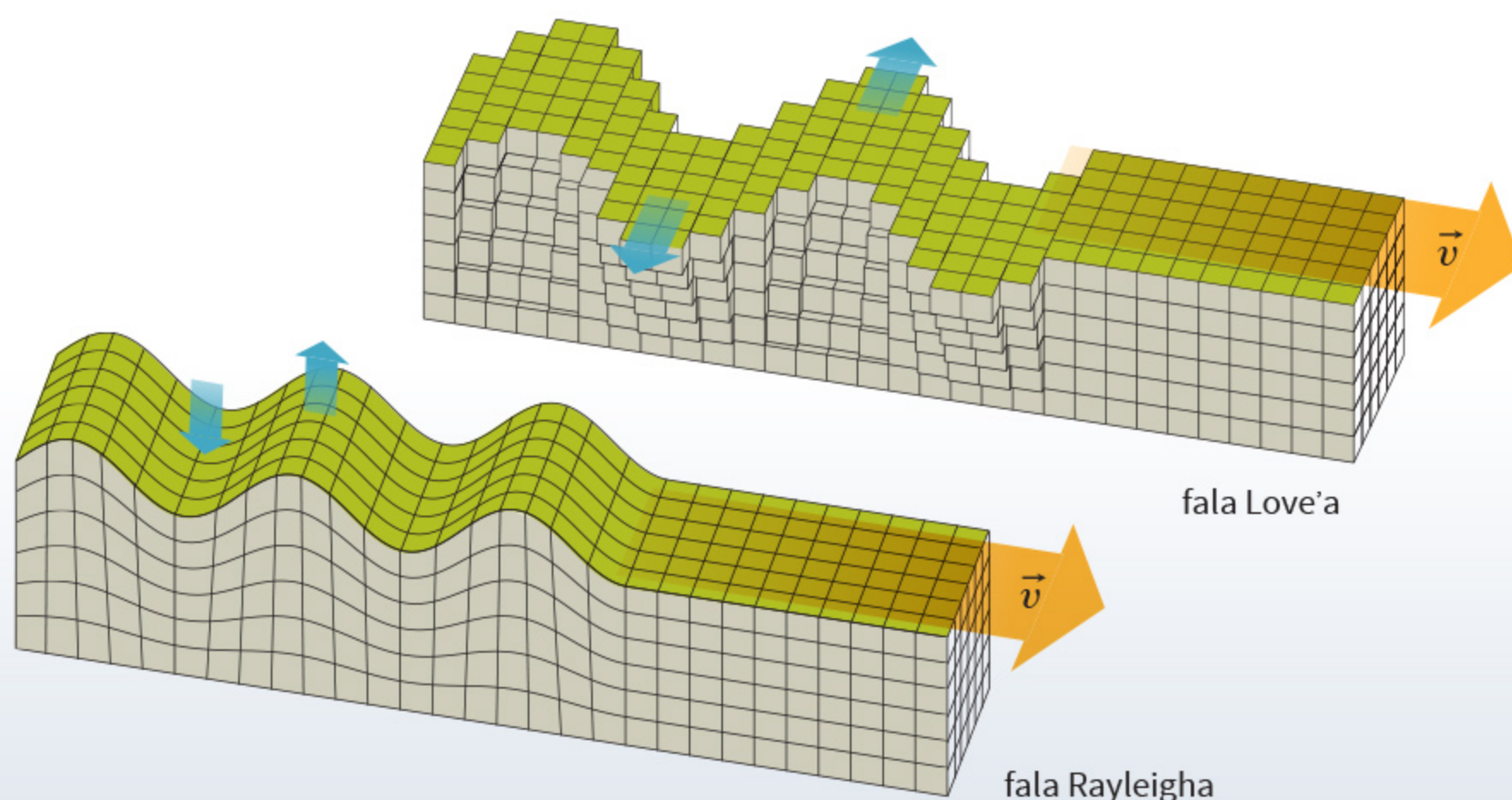
$$v = \lambda \cdot f = 1,5 \text{ m} \cdot \frac{1}{6 \text{ s}} = 0,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



WARTO WIEDZIEĆ

Fale sejsmiczne

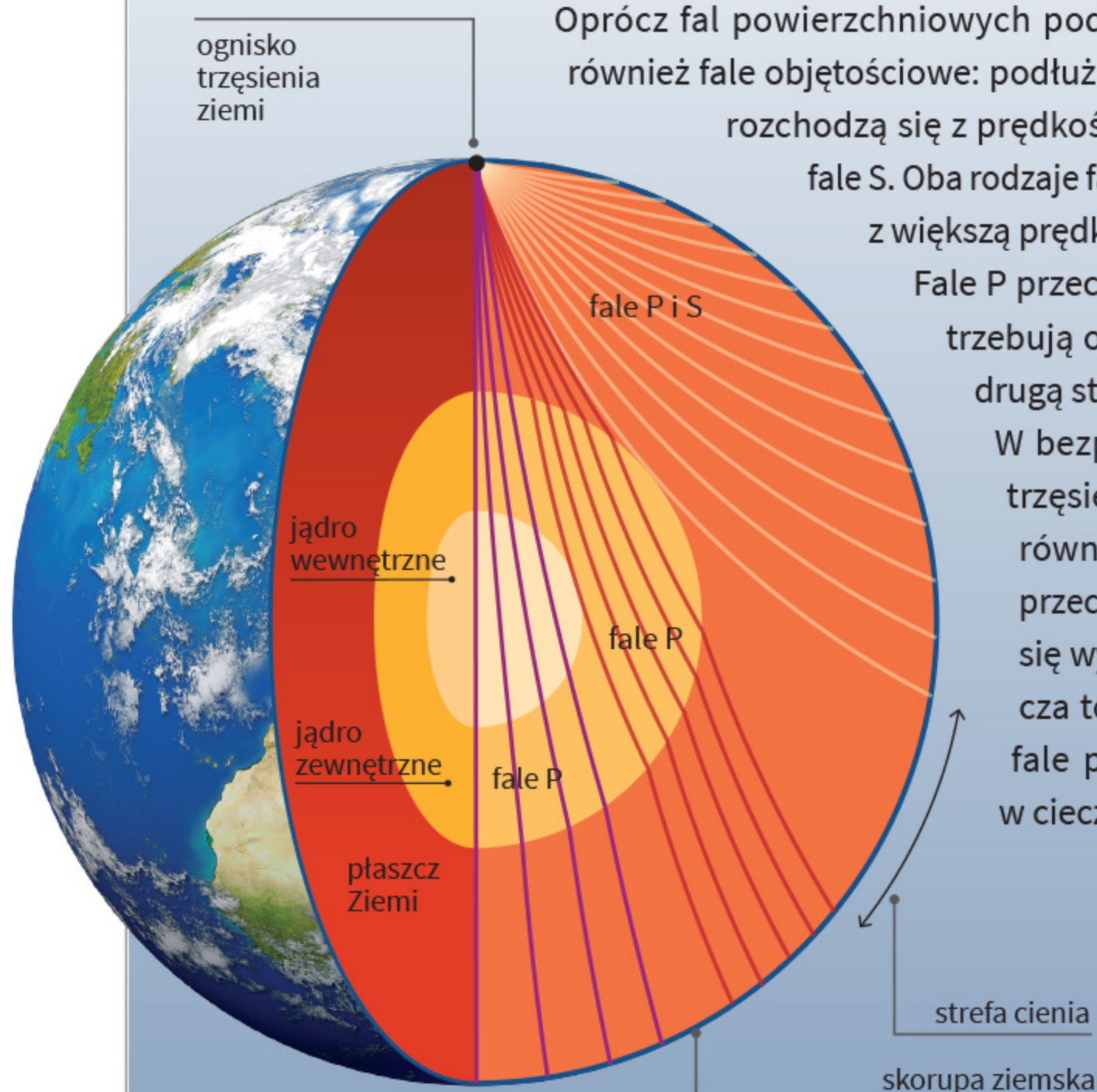
Energia wyzwolona podczas trzęsienia ziemi rozprzestrzenia się w postaci fal sejsmicznych. Najbardziej niebezpieczne dla budynków są fale powierzchniowe Love'a. Polegają one na poziomych drganiach prostopadłych do kierunku rozchodzenia się fali. Drugim rodzajem fal powierzchniowych są fale Rayleigha. Są one podobne do fal powstających na powierzchni wody.



ognisko
trzęsienia
ziemi

Oprócz fal powierzchniowych podczas trzęsień ziemi powstają również fale objętościowe: podłużne P oraz poprzeczne S. Fale P rozchodzą się z prędkością około 1,7 razy większą niż fale S. Oba rodzaje fal objętościowych rozchodzą się z większą prędkością niż fale powierzchniowe. Fale P przechodzące przez jądro Ziemi potrzebują około 20 minut, aby dotrzeć na drugą stronę globu.

W bezpośrednim otoczeniu ogniska trzęsienia ziemi są rejestrowane zarówno fale P, jak i fale S. Z kolei po przeciwległej stronie globu rejestruje się wyłącznie fale podłużne P. Oznacza to, że jądro Ziemi jest płynne – fale poprzeczne nie rozchodzą się w cieczech.



PODSUMOWANIE

- ▶ **Długość fali λ** to odległość między sąsiednimi grzbietami fali (lub jej dolinami).
- ▶ **Częstotliwość fali** jest równa częstotliwości źródła fali.
- ▶ **Prędkość fali** zależy od ośrodka, w którym rozchodzi się fala.
- ▶ Prędkość, długość i częstotliwość fali związane są zależnością:

$$v = \lambda \cdot f$$

PYTANIA I ZADANIA

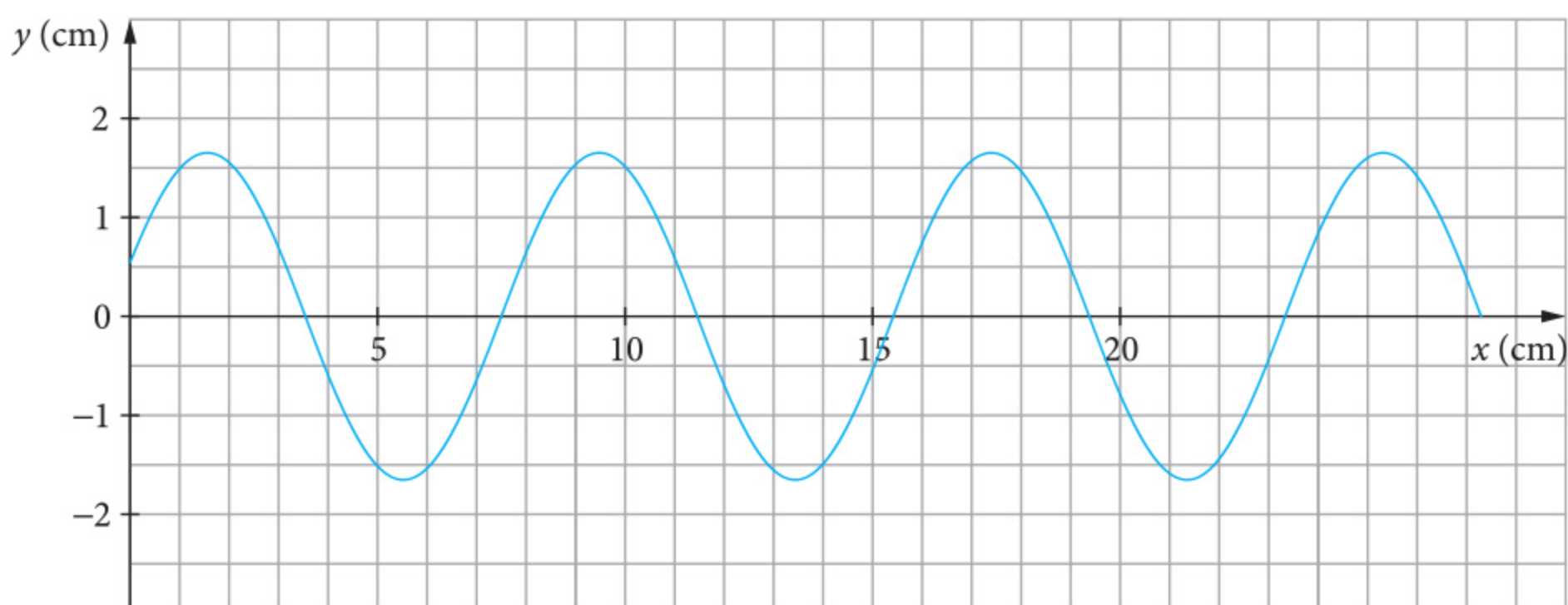
1. Karolina podczas pobytu nad morzem zauważyła, że odległości między grzbietami fal na powierzchni wody daleko od brzegu były większe niż bliżej brzegu. Gdzie prędkość rozchodzenia się fal na powierzchni wody jest większa: daleko od brzegu czy tuż przy plaży? Uzasadnij odpowiedź.



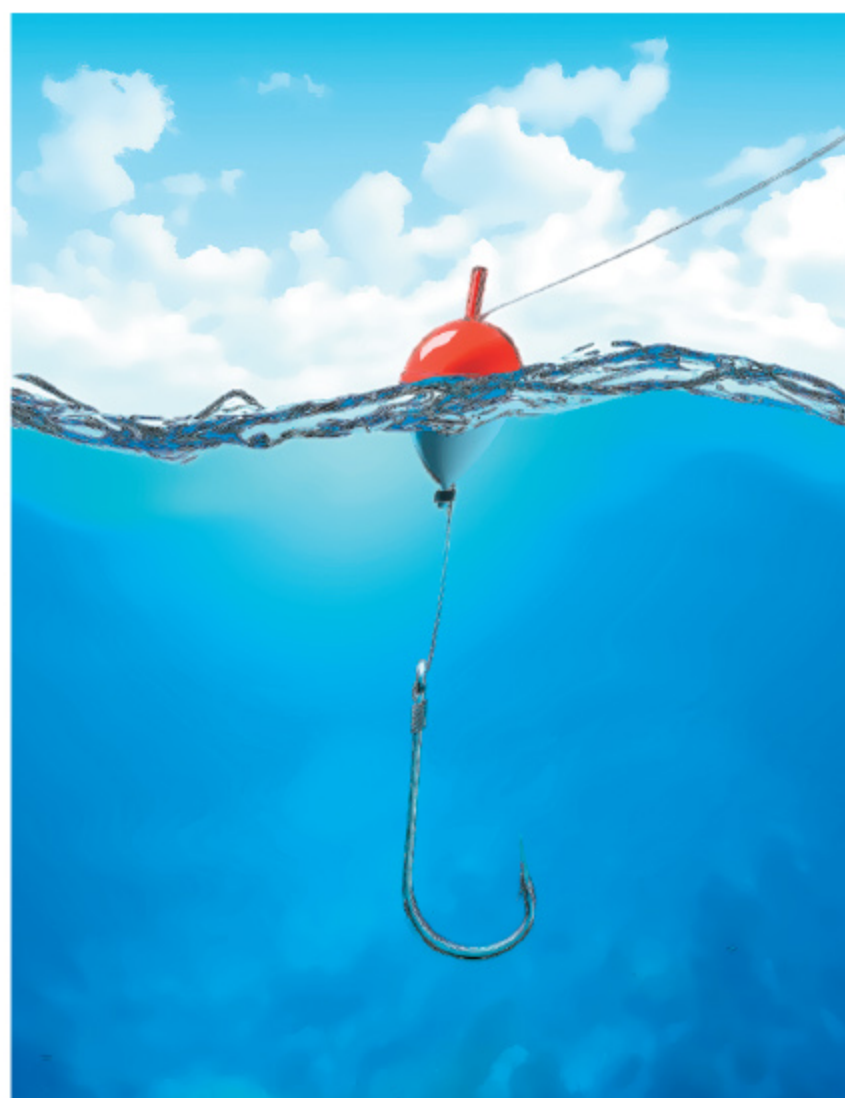
2. W tabeli przedstawiono prędkość dźwięku w wybranych metalach. W którym z nich fala o częstotliwości 1000 Hz będzie miała najmniejszą długość?

Metal	v (m/s)
aluminium	5100
miedź	3900
ołów	1300
żelazo	5020

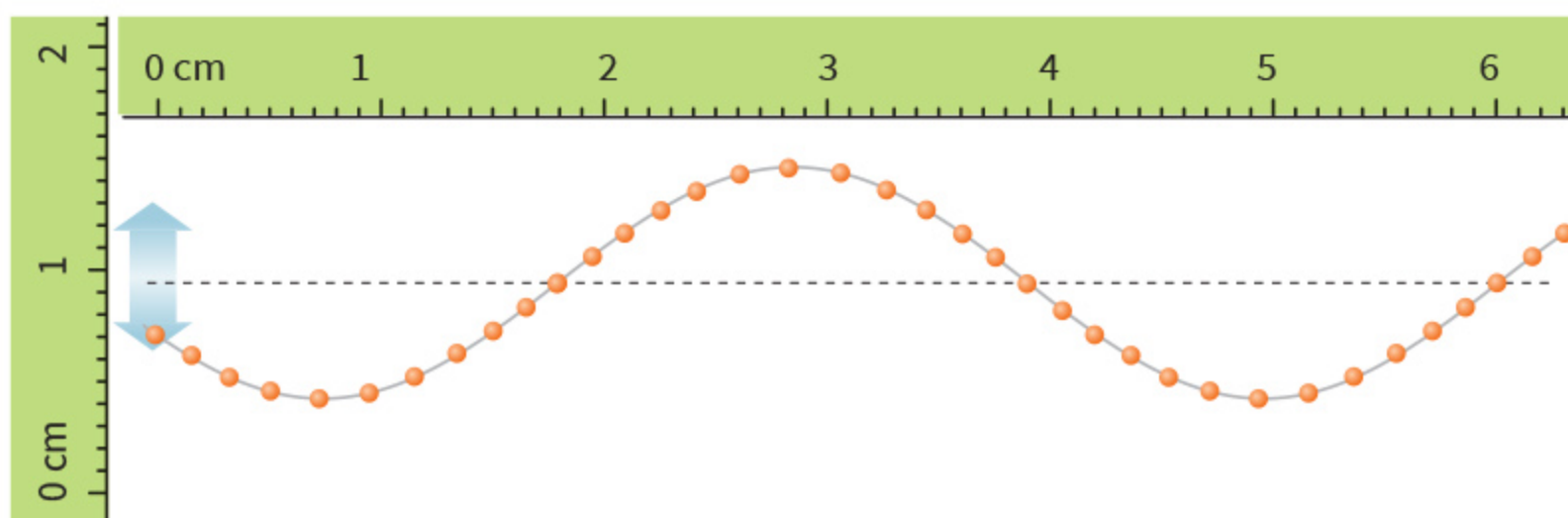
3. Na rysunku przedstawiono chwilowy obraz fali rozchodzącej się w prawo. Częstotliwość drgań źródła tej fali wynosi $0,8 \text{ Hz}$.



- a) Na podstawie wykresu wyznacz amplitudę oraz długość fali.
b) Oblicz prędkość fali.
4. Pewien wędkarz oszacował, że fale na powierzchni jeziora mają prędkość $0,8 \text{ m/s}$, a odległość między sąsiednimi grzbietami tych fal jest równa 2 m . Oblicz, ile czasu zajmuje splotkowi unoszącemu się na powierzchni wody dotarcie z doliny fali na jej grzbiet.



5. Na rysunku przedstawiono falę na sznurze. Źródło tej fali drga z częstotliwością $1,5 \text{ Hz}$. Wyznacz prędkość rozchodzenia się fali.





8. Fale dźwiękowe

- Opis fali dźwiękowej
- Cechy dźwięku
- Poziom natężenia dźwięku

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o ruchu drgającym oraz wielkości opisujące fale.

Zmysł słuchu jest bardzo ważny dla ludzi i zwierząt. Pozwala uniknąć niebezpieczeństwa, umożliwia porozumiewanie się na odległość, a u ludzi dodatkowo jest źródłem doznań estetycznych. Zdolność słyszenia zawdzięczamy niebywale czułowemu organowi – uchu, które rejestruje i analizuje bardzo subtelne zmiany gęstości powietrza, rozchodzące się od źródła dźwięku.

Źródła dźwięku, mechanizm słyszenia

Źródłem dźwięku jest ciało drgające. Nawet krótkie stuknięcie, które słyszymy jako impuls, jest efektem wielu drgań źródła, które bardzo szybko gasną. Drgające ciało wywołuje **zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza**, które biegną jedno za drugim z prędkością około 340 m/s i tworzą **falę dźwiękową** (ryc. 8.1).

Ryc. 8.1. Obraz fali dźwiękowej emitowanej z głośnika. Drgania membrany powodują zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza



Wpadająca do ucha fala dźwiękowa wywołuje drgania błony bębenkowej. Zwiększenie gęstości powietrza w pewnym obszarze skutkuje niewielkim wzrostem ciśnienia. Gdy takie zgęszczenie dochodzi do ucha, błona bębenkowa jest odrobinę wciskana do wnętrza. Po chwili w to miejsce dociera powietrze o mniejszej gęstości, czyli o obniżonym ciśnieniu. Wówczas błona bębenkowa – dzięki mniej więcej stałemu ciśnieniu wewnątrz ucha – jest wypychana na zewnątrz. Taki cykl powtarza się kilkaset, a nawet kilka tysięcy razy na sekundę.

Źródłami dźwięku są ciała drgające. Dźwięk rozchodzi się w postaci fali podłużnej.

Ucho ludzkie nie rejestruje każdej fali dźwiękowej. Jeżeli różnice ciśnienia są zbyt małe, nie wywołują drgań błony bębenkowej i nic nie słyszymy. Mówimy wówczas, że natężenie fali dźwiękowej jest poniżej progu słyszalności.

Również częstotliwość fali ma znaczenie. Gdy zmiany ciśnienia zachodzą powoli, to ciśnienie wewnątrz ucha zdąży wyrównać się z ciśnieniem zewnętrznym, więc i błona bębenkowa nie zostanie poruszona. Dźwięki o bardzo dużej częstotliwości również nie spowodują drgań błony bębenkowej, ponieważ ma ona pewną masę i nie nadąży za zbyt szybkimi zmianami. Zazwyczaj przyjmuje się, że ludzie słyszą fale dźwiękowe o częstotliwościach **od 20 Hz do 20 000 Hz**. Dźwięki o częstotliwościach poniżej 20 Hz, czyli **infradźwięki**, są słyszane np. przez słonie i wieloryby, a dźwięki powyżej 20 kHz, czyli **ultradźwięki** – przez delfiny i nietoperze.

Cechy dźwięku

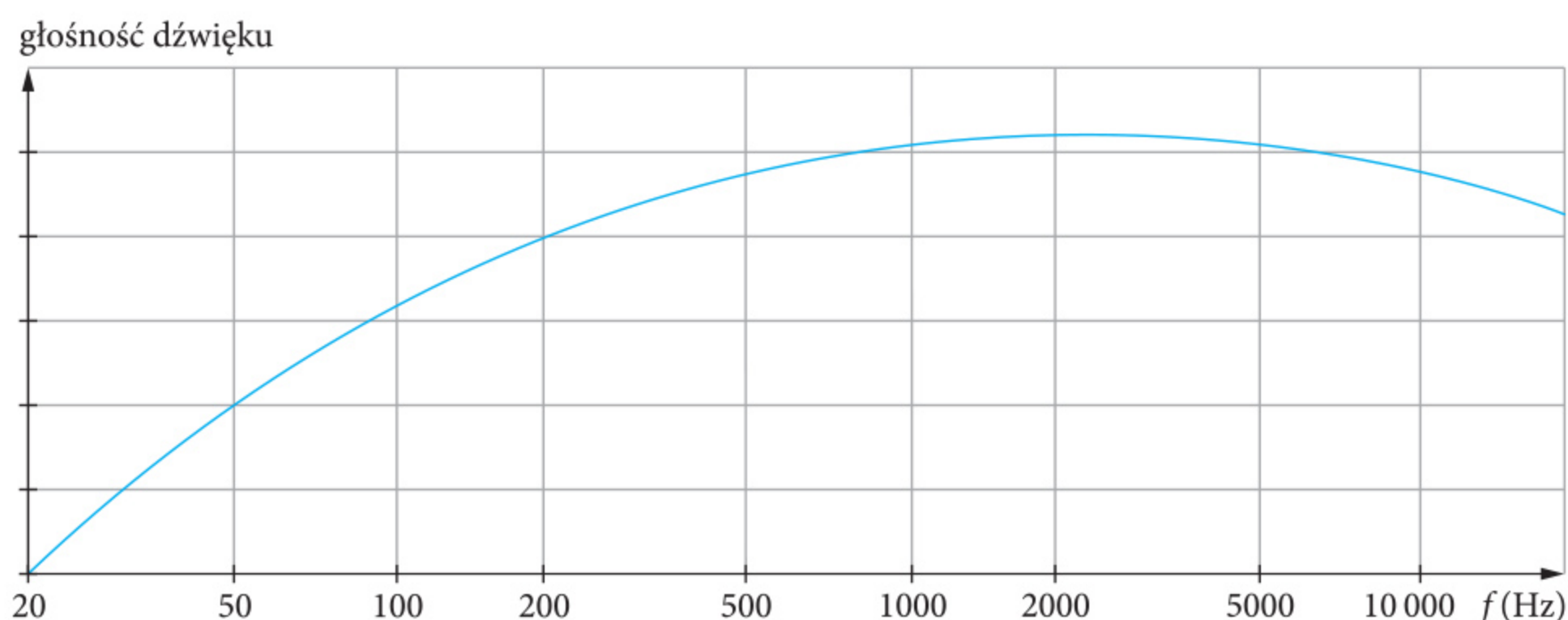
Dźwięk może być głośny lub cichy, wysoki lub niski. Tych określeń używamy na co dzień. Te cechy dźwięku wiążą się z wielkościami fizycznymi opisującymi falę dźwiękową.

Subiektywne wrażenie **głośności dźwięku** zależy przede wszystkim od amplitudy fali dźwiękowej. Im jest ona większa, tym drgania błony bębenkowej są silniejsze, a dźwięk odbieramy jako głośniejszy.

Wysokość dźwięku zależy od częstotliwości fali: im większa częstotliwość, tym dźwięk jest wyższy. Dźwięki o małej częstotliwości odbieramy jako niskie (buczące), dźwięki o dużej częstotliwości jako wysokie (piszczące).

Częstotliwość dźwięku ma też wpływ na jego głośność. Fale dźwiękowe o bardzo niskiej lub bardzo wysokiej częstotliwości słyszymy znacznie słabiej niż fale o częstotliwościach rzędu kilku tysięcy herców – przy tej samej amplitudzie fali (ryc. 8.2). Z tego powodu w dźwiękowych sygnałach alarmowych wykorzystywane są dźwięki o częstotliwościach właśnie tego rzędu.

Barwa dźwięku pozwala nam rozpoznać jego źródło, np. rodzaj instrumentu muzycznego lub głos konkretnej osoby. Potrafimy odróżnić np. głoskę „a” od głoski „e”, dzięki czemu rozumiemy mowę. Barwa dźwięku zależy od złożoności drgań źródła dźwięku,



Ryc. 8.2. Wykres zależności głośności słyszanego dźwięku od jego częstotliwości przy tej samej amplitudzie a tym samym od „kształtu” rozchodzącej się fali. Gdy głośnik będzie wykonywał drgania przedstawione na rycinie 8.3a, wygenerowana przez niego fala dźwiękowa spowoduje takie właśnie drgania błony bębenkowej w uchu i usłyszymy głoskę „a”. Drgania przedstawione na rycinie 8.3b odbierzemy jako głoskę „i”.



Ryc. 8.3. Obrazy oscyloskopowe głoski „a” (a) oraz „i” (b). Mikrofon przetwarza falę dźwiękową na sygnał elektryczny, którego przebieg jest analogiczny do zmian gęstości powietrza docierających do mikrofonu

DOŚWIADCZENIE 1.

Za pomocą smartfona z zainstalowaną aplikacją Phyphox zarejestruj obraz fali dźwiękowej dla różnych samogłosek. Ważne, aby do mikrofonu dotarł stosunkowo długi dźwięk tej samej głoski, tak by system operacyjny telefonu zdążył zinterpretować sygnał. Porównaj obrazy tej samej głoski mówionej (a w zasadzie śpiewanej) nisko i wysoko.

Poziom natężenia dźwięku jest wielkością opisującą dźwięk pod względem jego głośności odbieranej przez ludzi. Jednostką poziomu natężenia dźwięku są decybele (dB). **Próg słyszalności** odpowiada poziomowi natężenia dźwięku 0 dB. Słabszych fal dźwiękowych nie słyszymy. Dźwięk, który jest tak głośny, że amplituda drgań błony bębenkowej w uchu grozi jej uszkodzeniem, ma 120 dB. Tę wartość nazywamy **progiem bólu**, bo w obecności takiego dźwięku odczuwamy ból.

DOŚWIADCZENIE 2.

Skorzystaj z dostępnych aplikacji na smartfona i zmierz poziom natężenia dźwięku w domu (lub w klasie) w dwóch przypadkach: gdy jest najciszej oraz gdy wszystkie osoby w pomieszczeniu krzyczą. Czy udało się uzyskać 0 dB i 120 dB? Jakie wnioski wynikają z pomiarów?

Dźwięki docierają do nas przez cały dzień. Okazuje się jednak, że **długotrwałe przebywanie w hałasie jest niekorzystne dla zdrowia**. I nie chodzi tu o dźwięki grożące uszkodzeniem słuchu, tylko o te, które na co dzień rejestrujemy. Przebywanie w hałasie powoduje ogólne zmęczenie, trudności z koncentracją, rozdrażnienie. Prowadzi do znacznie szybszego pogorszenia słuchu, niż wynika to z procesów starzenia się organizmu.

Trudno obiektywnie określić, czy otaczające nas dźwięki są już za głośne. Do głośnych dźwięków dosyć szybko się przyzwyczajamy i postrzegamy je jako normalne. Hałas i głośne dźwięki nie tylko źle wpływają na zdrowie, lecz także nie sprzyjają efektywności pracy. Wysiłek umysłowy wymaga cichego otoczenia, poziom natężenia dźwięku nie powinien przekraczać 60 dB, a w przypadku pracy fizycznej – 80 dB.

Tabela 1. Poziom natężenia dźwięku w wybranych sytuacjach

Poziom natężenia dźwięku	Możliwość porozumiewania się	Przykładowe miejsca i sytuacje	Czas bez szkodliwych skutków zdrowotnych
30 dB	szeptem	szelesty w nocy w domu, poza miastem w bezwietrzną pogodę	dowolnie długo
50 dB	spokojnym głosem	przeciętne hałasy w ciągu dnia w mieszkaniu, odgłosy w czasie lekcji	dowolnie długo
70 dB	podniesionym głosem	hałas na ulicach miast, wnętrza galerii handlowych, wnętrza samochodu osobowego w czasie jazdy	kilka godzin dziennie
90 dB	krzykiem	hałas na korytarzu szkolnym w czasie przerwy, koncert na otwartym powietrzu	kilkanaście minut (dłuższe przebywanie niewskazane)
110 dB	brak możliwości porozumiewania się	koncert rockowy w sali, dyskoteki	niewskazany nawet najkrótszy

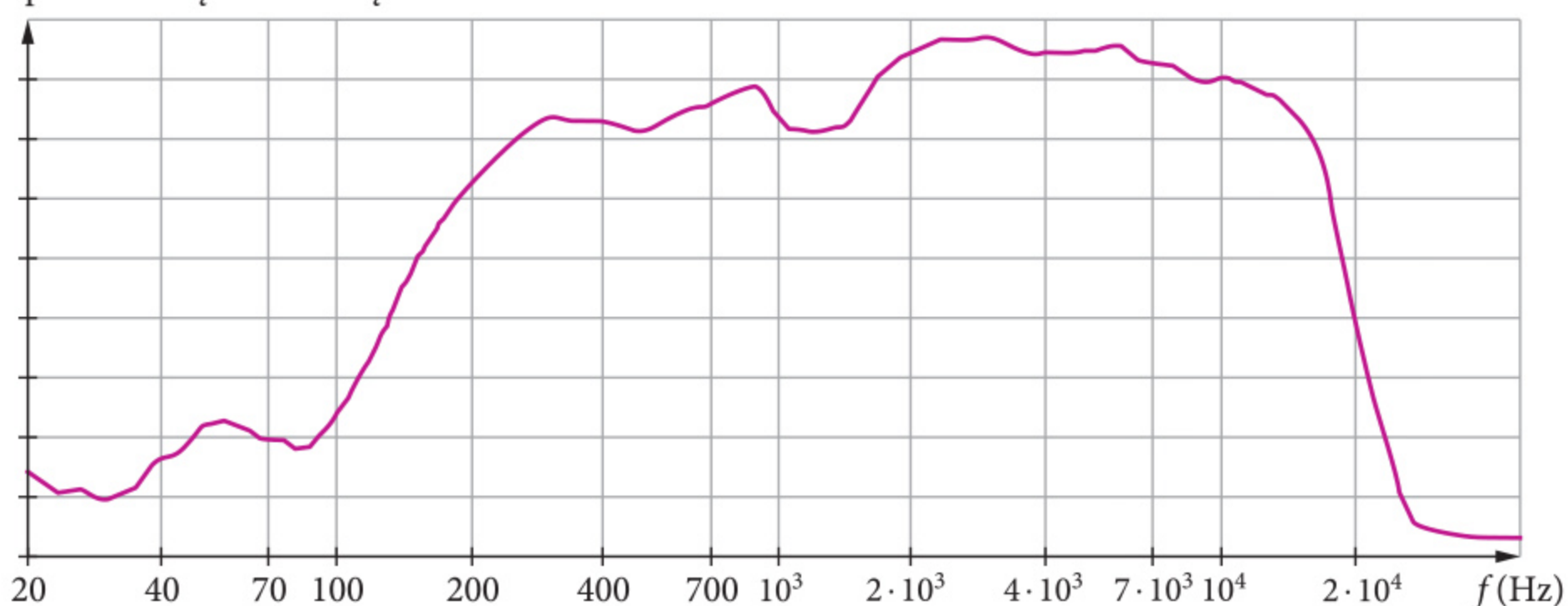
PODSUMOWANIE

- ▶ **Fala dźwiękowa** to lokalne zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza, rozchodzące się w ośrodku. Fala dźwiękowa to fala podłużna.
- ▶ Przyjmuje się, że ludzie mogą słyszeć dźwięki o częstotliwościach od 20 Hz do 20 kHz.
- ▶ **Wysokość dźwięku** zależy od częstotliwości fali, **głośność dźwięku** – głównie od jego amplitudy.

PYTANIA I ZADANIA

1. Jakiego rzędu częstotliwości są najczęściej wykorzystywane do krótkich sygnałów powiadamiających lub alarmowych? Czy są to dziesiątki, setki, czy tysiące herców? Uzasadnij odpowiedź.
2. Oszacuj zakres długości fal dźwiękowych słyszanych przez człowieka.
3. W przypadku dźwięków, w których można wyróżnić wiele częstotliwości, jak np. głoski „a” oraz „i”, których obrazy przedstawione są na ryc. 8.3, o wysokości dźwięku decyduje najniższa częstotliwość składowa. Oszacuj najniższą częstotliwość składową głoski „a” z ryc. 8.3. Oś pozioma tych wykresów wyskalowana jest w sekundach. *Wskazówka:* Najniższa częstotliwość składowa to częstotliwość powtarzania kształtu fali.
4. Drgania membrany głośnika wywoływane są zmiennym prądem elektrycznym. Charakterystyka częstotliwościowa głośnika przedstawia poziom natężenia dźwięku dla różnych częstotliwości przy danej mocy głośnika i określonej odległości od niego. Podaj przykład trzech różnych częstotliwości dźwięków emitowanych przez ten głośnik jednakowo głośno.

poziom natężenia dźwięku



5. Od dawna wiadomo, że dwa dźwięki dobrze współbrzmiają, gdy stosunek ich częstotliwości jest ułamkiem, w którym licznik i mianownik są małymi liczbami naturalnymi. Podaj kilka częstotliwości dźwięków, które będą dobrze współbrzmieć z dźwiękiem o częstotliwości 440 Hz, oznaczanym a^1 .



9. Zjawisko Dopplera

- Opis i wyjaśnienie zjawiska Dopplera
- Zastosowania zjawiska Dopplera

→ **Przypomnij sobie**, od czego zależy wysokość dźwięku i jaki jest związek między długością fali a jej częstotliwością.

Gdy mijają nas jadący szybko motocykl, możemy zauważyć zmianę wysokości słyszanego dźwięku silnika. To przykład zjawiska Dopplera. Najczęściej zauważamy je wtedy, gdy dotyczy fal dźwiękowych, ale zachodzi ono dla każdego rodzaju fal.

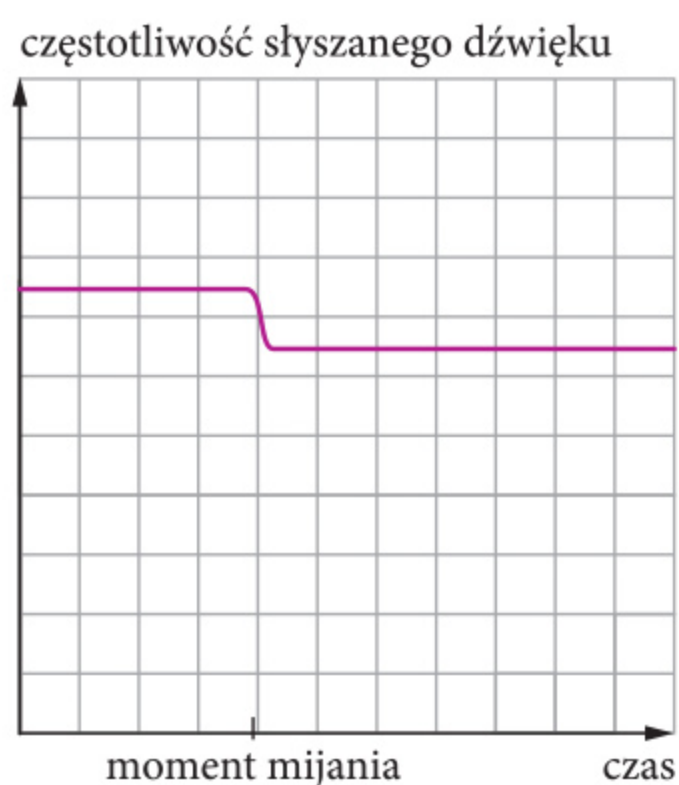
Ruch źródła a obraz rozchodzącej się fali

Drgające ciało zaburza ośrodek, w którym się znajduje, i to zaburzenie rozchodzi się w postaci fali. Rozchodząca się fala może wprowzić w drgania obiekty znajdujące się na jej drodze. Gdy źródło fali i odbiornik (tak można nazwać obiekt drgający pod wpływem rozchodzącej się fali) są w spoczynku względem ośrodka, częstotliwość drgań odbiornika jest dokładnie równa częstotliwości drgań źródła (ryc. 9.1). Poszczególne grzbiety fali (powierzchnie falowe) tworzą wówczas współśrodkowe okręgi.

Ryc. 9.1. Drgające, ale nieporuszające się źródło (w tym przypadku motocykl), wytwarza w ośrodku falę. Liczba grzbietów fali rejestrowana przez odbiornik (w tym przypadku błonę bębenkową ucha człowieka) w jednostce czasu jest taka sama jak wygenerowana przez źródło



Ryc. 9.2. Obraz powierzchni falowych utworzonych przez poruszające się źródło. Obserwator A jest w obszarze o mniejszej długości fali niż obserwator B, więc będzie rejestrował większą częstotliwość



Ryc. 9.3. Wykres zależności częstotliwości rejestrowanego dźwięku od czasu w sytuacji, gdy do obserwatora zbliża się źródło dźwięku, mija go i się oddala

Jednak gdy źródło fali porusza się w nieruchomym ośrodku, jej grzbiety nie układają się już koncentrycznie. Każdy grzbiet powstaje w innym miejscu. Podczas każdego kolejnego okresu drgań źródło przesuwa się o pewną odległość, stąd i środki kolejnych powierzchni falowych przesuwają się razem ze źródłem (ryc. 9.2). Przed źródłem powstaje fala o mniejszej długości, za źródłem – o większej. Obserwator, do którego zbliża się źródło fali, zarejestruje zatem falę o większej częstotliwości (mniejszej długości fali), a obserwator pozostający za poruszającym się źródłem – o mniejszej częstotliwości. Właśnie dlatego, gdy motocykl się zbliża, słyszymy wyższy dźwięk, a gdy się oddala – niższy. Gwałtowna **zmiana wysokości dźwięku zachodzi w momencie mijania** (ryc. 9.3).

Zjawisko Dopplera polega na tym, że gdy źródło fali zbliża się do odbiornika lub oddala się od niego, odbiornik rejestruje falę o innej częstotliwości niż nadawana. Gdy źródło fali i odbiornik zbliżają się do siebie, odbiornik rejestruje falę o większej częstotliwości, a gdy się oddalają – o mniejszej.

Podobnie zmienia się częstotliwość rejestrowanej fali, gdy źródło jest w spoczynku, a odbiornik zbliża się lub oddala. Mechanizm zjawiska jest jednak wówczas nieco inny. W tym przypadku od źródła rozchodzi się fala o określonej częstotliwości. Gdy odbiornik zbliża

się do źródła, czas, jaki mija między zarejestrowanymi kolejnymi grzbietami, jest krótszy, niż gdyby odbiornik się nie poruszał. W jednostce czasu zostanie zarejestrowanych więcej drgań, więc rejestrowana częstotliwość jest większa.

Zależność rejestrowanej częstotliwości od prędkości źródła i odbiornika

Niezależnie od tego, czy porusza się źródło fali, czy odbiornik, częstotliwość rejestrowanej fali zależy od częstotliwości źródła i jego prędkości względem odbiornika. Im większa jest ta prędkość, tym większa jest zmiana częstotliwości. Gdy prędkość źródła względem odbiornika jest znacznie mniejsza od prędkości fali, odbieraną częstotliwość można z dobrym przybliżeniem obliczyć ze wzoru:

s. 211

$$f = f_0 \left(1 \pm \frac{v}{u} \right) \quad (1)$$

gdzie:

f_0 – częstotliwość źródła fali,

f – częstotliwość rejestrowana przez odbiornik,

v – prędkość źródła względem odbiornika,

u – prędkość fali.

Znak „+” we wzorze piszemy w sytuacji, gdy odbiornik i źródło zbliżają się do siebie, natomiast znak „–” piszemy, gdy się oddalają.

PRZYKŁAD 1.

Statek płynął w stronę góry lodowej i zbliżał się do niej z prędkością 12 m/s. W pewnym momencie syrena statku wyemitowała krótki sygnał dźwiękowy o częstotliwości 60 Hz. Po chwili załoga usłyszała echo syreny. Obliczmy:

- częstotliwość fali dźwiękowej odbitej od góry lodowej;
- częstotliwość dźwięku, który usłyszała załoga statku.



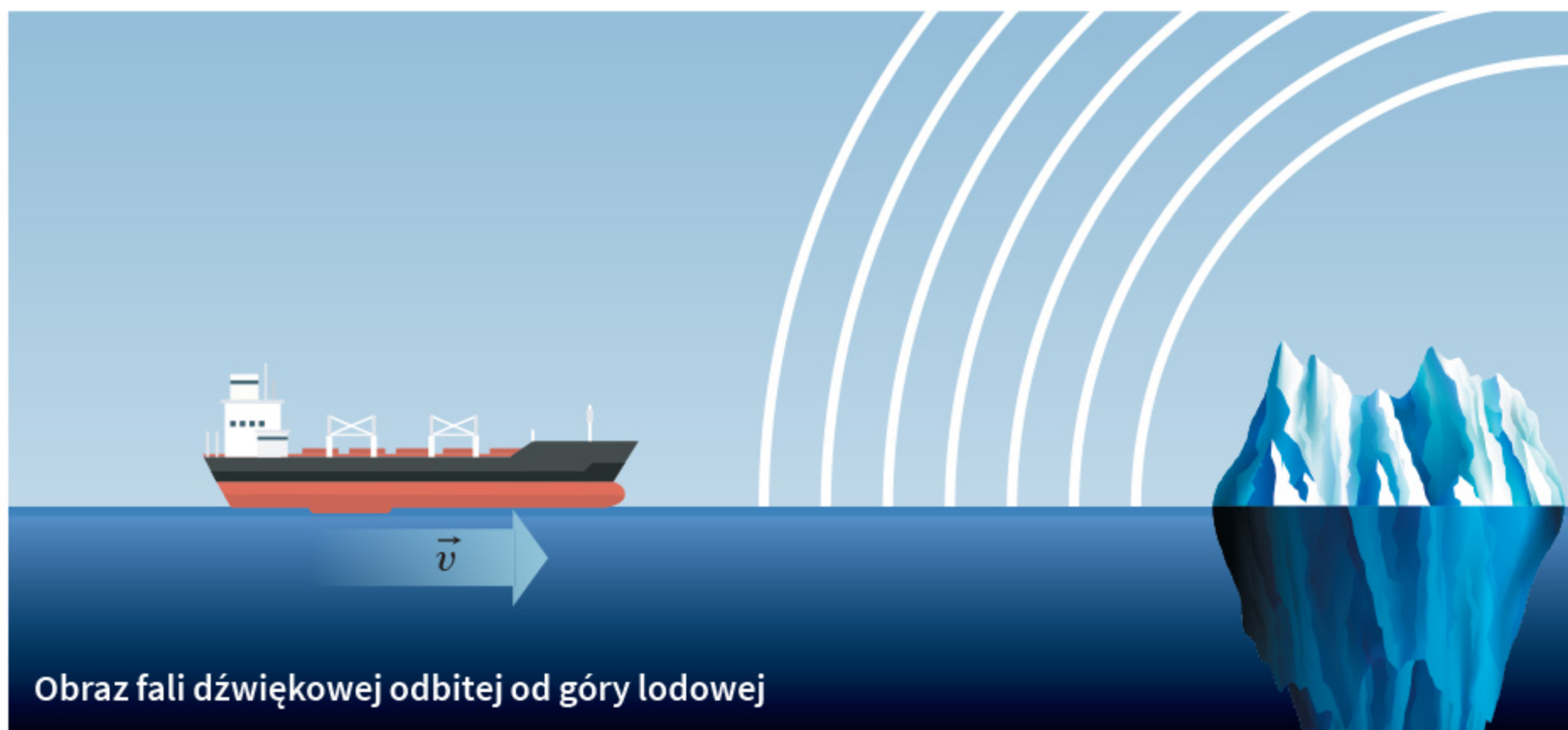
- Fala dźwiękowa została wyemitowana ze statku zbliżającego się do góry, więc częstotliwość fali, która dotarła do góry, obliczymy ze wzoru:

$$f_1 = f_0 \left(1 + \frac{v}{u} \right)$$

Prędkość dźwięku w powietrzu wynosi 340 m/s, więc po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$f_1 = 60 \text{ Hz} \cdot \left(1 + \frac{12 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right) \approx 62 \text{ Hz}$$

Fala podczas odbicia od nieruchomego obiektu nie zmienia swojej częstotliwości, więc częstotliwość fali odbitej jest równa częstotliwości fali padającej na ścianę góry lodowej.



- b) Załoga statku usłyszy inny dźwięk niż ten odbity od góry, gdyż się do niej zbliża. W tej sytuacji źródłem dźwięku jest góra lodowa, a członkowie załogi – odbiornikami. Częstotliwość dźwięku, który usłyszy załoga, będzie wynosiła:

$$f_2 = f_1 \left(1 + \frac{v}{u} \right)$$

$$f_2 = 62 \text{ Hz} \cdot \left(1 + \frac{12 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right) \approx 64 \text{ Hz}$$

Zastosowania zjawiska Dopplera

Gdy źródło emituje falę o znanej częstotliwości, a do nas dociera fala o innej częstotliwości, łatwo można wywnioskować, czy źródło fali zbliża się do nas, czy od nas oddala. Jeśli znamy częstotliwość fali nadawanej i częstotliwość fali rejestrowanej, to ze wzoru (1) można wyznaczyć prędkość, z jaką zbliża się do nas lub od nas oddala obserwowane źródło fali. Tą metodą astronomowie wyznaczają prędkości odległych galaktyk i innych obiektów – analizują zmiany częstotliwości światła docierającego do Ziemi w stosunku do światła wyemitowanego (częstotliwość wyemitowanego światła można określić na podstawie badań charakterystycznego świecenia różnych pierwiastków).

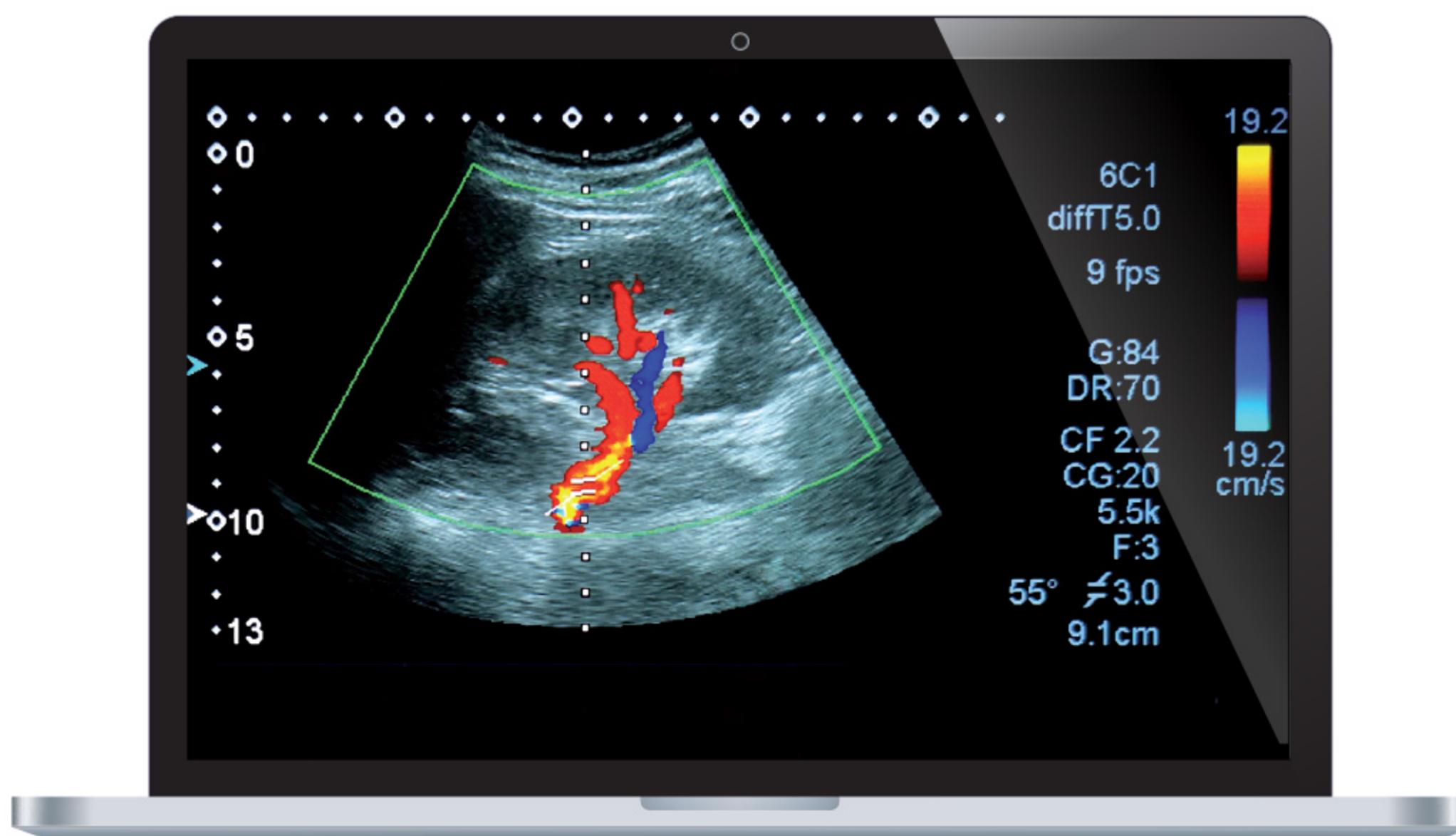
Dzięki zjawisku Dopplera potrafimy również wyznaczyć prędkość obiektów, które odbijają wysyłaną przez nas falę. W tym przypadku wykorzystuje się fakt, że fala w trakcie odbicia od ruchomego obiektu zmienia częstotliwość. Jeśli zmierzmy częstotliwość fali

nadawanej i częstotliwość fali odbitej, możemy wyznaczyć prędkość obiektu. Efekt zmiany częstotliwości fali po odbiciu od ruchomego obiektu jest wykorzystywany w radarach policyjnych do pomiaru prędkości samochodów, a w radarach wojskowych i cywilnych – do monitorowania ruchu statków i samolotów (ryc. 9.4).



Ryc. 9.4. Radary są stosowane w policji do mierzenia prędkości samochodów. W wojsku radary są jednym z urządzeń do kontroli obszaru

Za pomocą zjawiska Dopplera można badać prędkość przepływu płynów w przestrzeniach, do których nie mamy bezpośredniego dostępu. Na przykład ultrasonograf dopplerowski pozwala zobrazować prędkość przepływu krwi w naczyniach krwionośnych (ryc. 9.5).



Ryc. 9.5. Główne naczynia krwionośne nerki zobrazone za pomocą USG dopplerowskiego. Czerwono-żółty obszar to tętnica nerkowa. Po prawej stronie zdjęcia widoczna skala prędkości przepływu krwi

Fale uderzeniowe

Fala uderzeniowa powstaje, gdy źródło fali porusza się z prędkością większą niż prędkość fali w danym ośrodku. Jest skutkiem nałożenia się na siebie powierzchni falowych wyemitowanych przez źródło w stałych odstępach czasu. Fale uderzeniowe mogą powstawać w różnych ośrodkach.

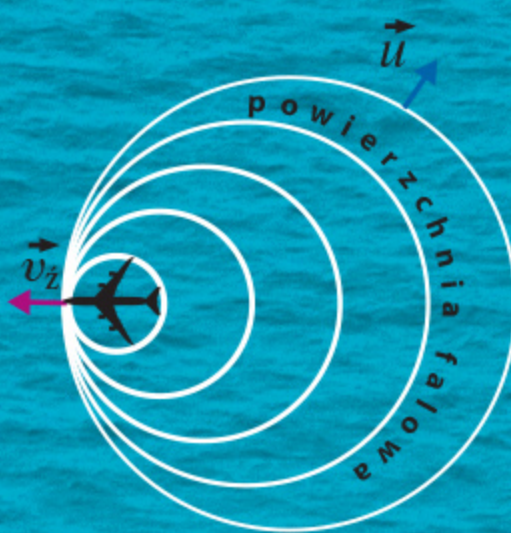


nieruchome źródło



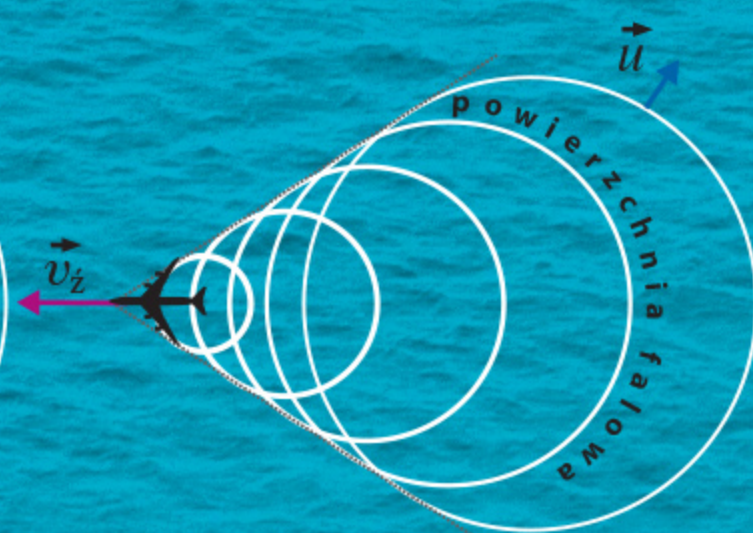
źródło poruszające się z prędkością mniejszą od prędkości fali w ośrodku – efekt Dopplera

$$v_z < u$$



źródło poruszające się z prędkością równą prędkości fali w ośrodku

$$v_z = u$$



źródło poruszające się z prędkością większą niż prędkość fali w ośrodku – fala uderzeniowa

$$v_z > u$$



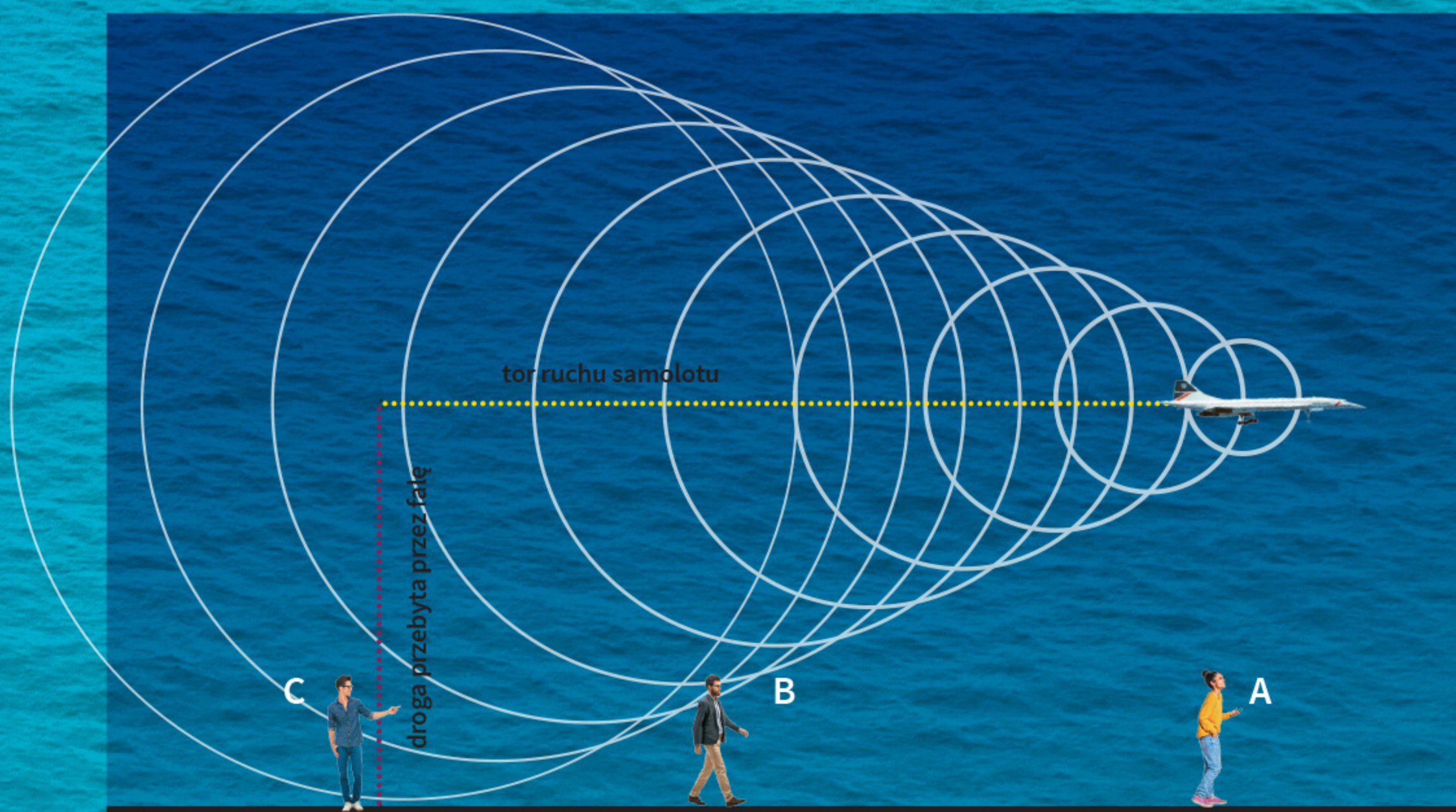
Fala dziobowa

Falę uderzeniową, która powstaje na powierzchni wody za płynącą łodzią, nazywamy falą dziobową. Wysokość tej fali jest wprost proporcjonalna do masy płynącego obiektu i do mocy jego napędu. Z tego powodu mały skuter wodny z potężnym silnikiem wytwarza falę porównywalną z płynącą powoli barką.

Szybki ptak

Źródłem fali dziobowej może być również ptak, jeśli będzie płynął z prędkością większą niż prędkość rozchodzenia się fali w wodzie.





Obserwator C słyszy dźwięk dochodzący od samolotu.

Obserwator B słyszy huk fali uderzeniowej, będący skutkiem nałożenia się powierzchni falowych.

Obserwator A widzi przelatujący samolot, ale go nie słyszy.



Samolot ponaddźwiękowy

Za samolotem lecącym z prędkością większą niż prędkość dźwięku w powietrzu (ok. 1220 km/h = 1 Ma) powstaje fala uderzeniowa. Widoczne na fotografii obłoki skroplonej pary wodnej powstają na skutek gwałtownej zmiany ciśnienia powietrza, wywołanej tą falą.



Lecący pocisk

Wystrzelony pocisk wytwarza falę uderzeniową. Na zdjęciu widać obłoczki skroplonej pary wodnej w obszarach, w których zmiany ciśnienia powietrza są bardzo duże.

s. 211

PRZYKŁAD 2.

System pokładowy samolotu pasażerskiego co kilka sekund wysyła do stacji naziemnych raport pozycyjny zawierający parametry lotu, z wykorzystaniem fal radiowych o częstotliwości 140 MHz. Częstotliwość fali, która dotarła do jednej ze stacji rejestrujących raport, była o 112 Hz mniejsza od częstotliwości fali nadawanej. Obliczmy prędkość, z jaką samolot oddala się od stacji naziemnej.

Wiemy, że samolot się oddala, gdyż częstotliwość zarejestrowanej fali jest mniejsza od częstotliwości fali nadawanej. Skorzystamy zatem ze wzoru (1) ze znakiem „-”:

$$f = f_0 \left(1 - \frac{v}{c} \right)$$

Prędkość fali oznaczyliśmy literą c , gdyż fala radiowa porusza się z prędkością światła.

Po przekształceniu otrzymujemy:

$$v = \frac{f_0 - f}{f_0} \cdot c$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$v = \frac{112 \text{ Hz}}{140 \cdot 10^6 \text{ Hz}} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 240 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Samolot oddala się z prędkością 240 m/s.

PODSUMOWANIE

- ▶ **Zjawisko Dopplera:** częstotliwość rejestrowanej fali jest wyższa od częstotliwości fali nadawanej, gdy źródło fali i odbiornik zbliżają się do siebie, a niższa – gdy się od siebie oddalają.
- ▶ Zjawisko Dopplera pozwala wyznaczyć prędkości poruszających się obiektów.

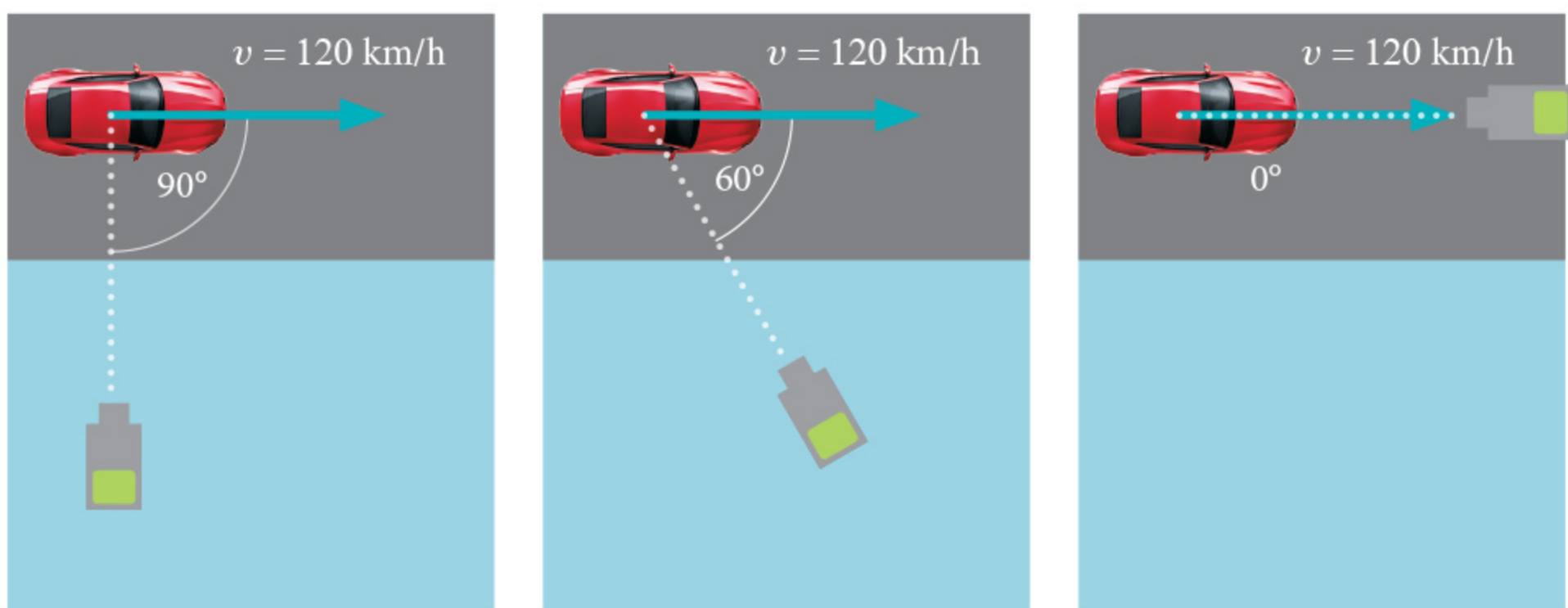
PYTANIA I ZADANIA

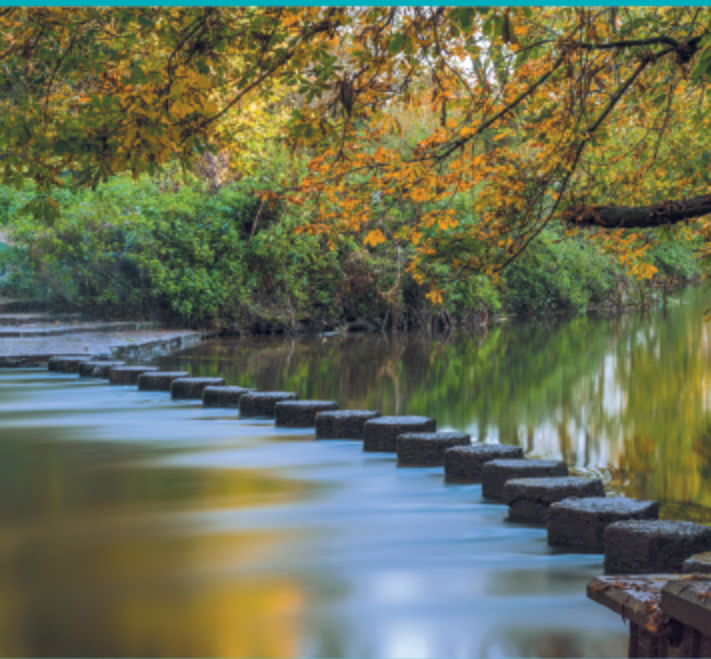
1. Gdy zbliża się do nas jadący szybko samochód, słyszymy dźwięk coraz głośniejszy, a gdy nas minie – coraz cichszy. Czy wysokość słyszanego dźwięku również rośnie podczas zbliżania się samochodu i maleje podczas jego oddalania? Odpowiedź uzasadnij.
2. Klakson samochodu osobowego ma częstotliwość 600 Hz. Jaka będzie częstotliwość dźwięku, który usłyszymy, gdy auto z włączonym klaksonem będzie się zbliżało z prędkością 25 m/s?
3. Gdy na jeziorze wieje wiatr, tworzy się fala poruszająca się zgodnie z jego kierunkiem. Czy częstotliwość kołysania łodzi płynącej pod wiatr będzie taka sama jak łodzi płynącej z wiatrem? Uzasadnij odpowiedź.



4. Zdjęcie przedstawia galaktykę M104 (Sombrero). Częstotliwość docierającego z niej światła jest o 0,36 % mniejsza od częstotliwości światła emitowanego. Czy ta galaktyka się od nas oddala, czy się do nas zbliża? Z jaką to się dzieje prędkością?

5. Pomiar prędkości samochodu przez radar policyjny trwa na tyle krótko, że możemy założyć, iż droga przebyta przez pojazd podczas tego pomiaru jest do pominięcia.
- Czy w każdej sytuacji przedstawionej na rysunkach radar policyjny pokaże tę samą prędkość?
 - Oblicz, jakie będą wskazania radaru w każdej z przedstawionych sytuacji.





10. Dyfrakcja i nakładanie się fal

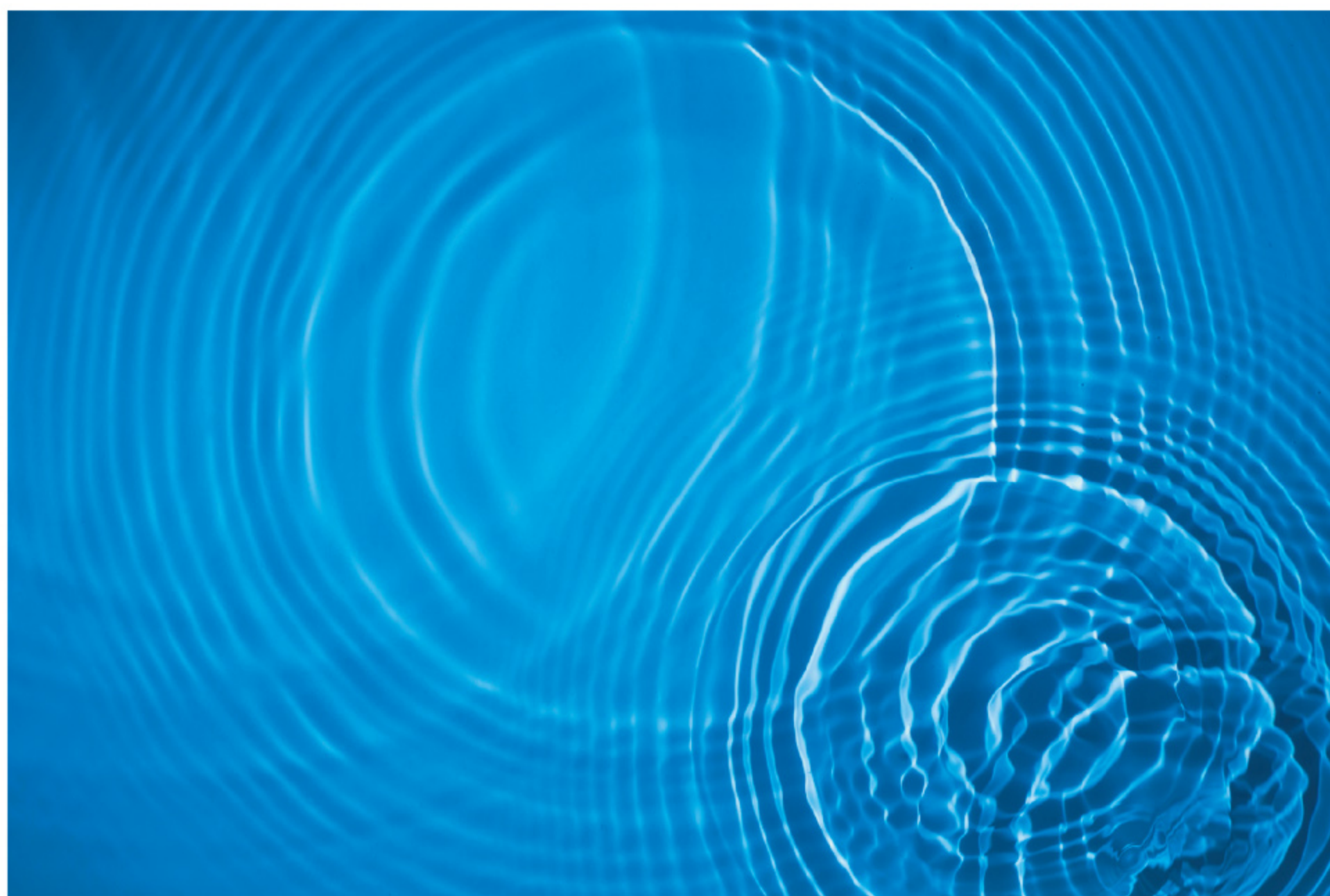
- Dyfrakcja fal
- Nakładanie się fal
- Rozpraszanie fal

→ **Przypomnij sobie** podstawowe wielkości fizyczne opisujące fale.

Fale przemieszczają się i przenoszą energię inaczej niż poruszające się ciała. Czy fale mogą zderzać się ze sobą tak jak kule? Czy można zmienić kierunek biegnącej fali? W tym rozdziale poznamy odpowiedzi na te pytania.

Dyfrakcja

Chyba każdy widział fale rozchodzące się na wodzie w czasie deszczu. Uderzenie każdej kropli w powierzchnię wody powoduje drgania tej powierzchni, które rozchodzą się w postaci fali kołowej. Tak dzieje się zawsze wtedy, gdy ośrodek jest jednorodny, czyli wszędzie taki sam. **Każdy punkt, do którego dociera fala, zaczyna drgać, zatem staje się źródłem nowej fali.**

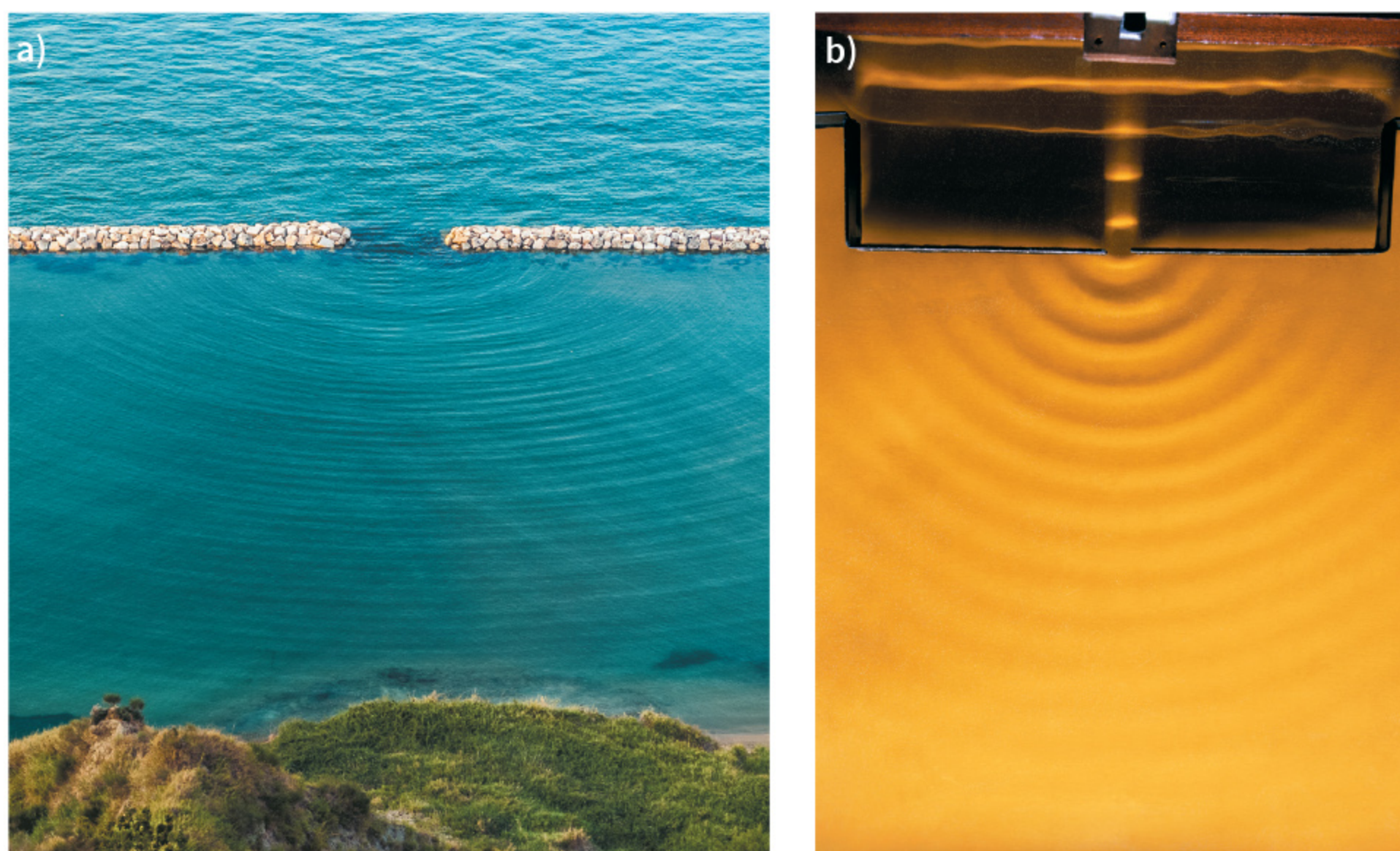


Ryc. 10.1. Fale kołowe na powierzchni wody

Punktowe źródło fali w ośrodku jednorodnym wywołuje w przestrzeni falę kulistą. Każdy punkt ośrodka, do którego dochodzi fala, staje się źródłem nowej fali kulistej.

DOŚWIADCZENIE 1.

Do wanny lub dużej miski nalej centymetrową warstwę wody. Ustaw na środku naczynia przeszkodę z niewielkim otworem (mogą to być dwie deseczki zbliżone do siebie). Uderzaj miarowo w powierzchnię wody dłuższą krawędzią linijki, ustawioną równoległe do przeszkody – w ten sposób wytworzysz falę płaską. Co widzisz za otworem?



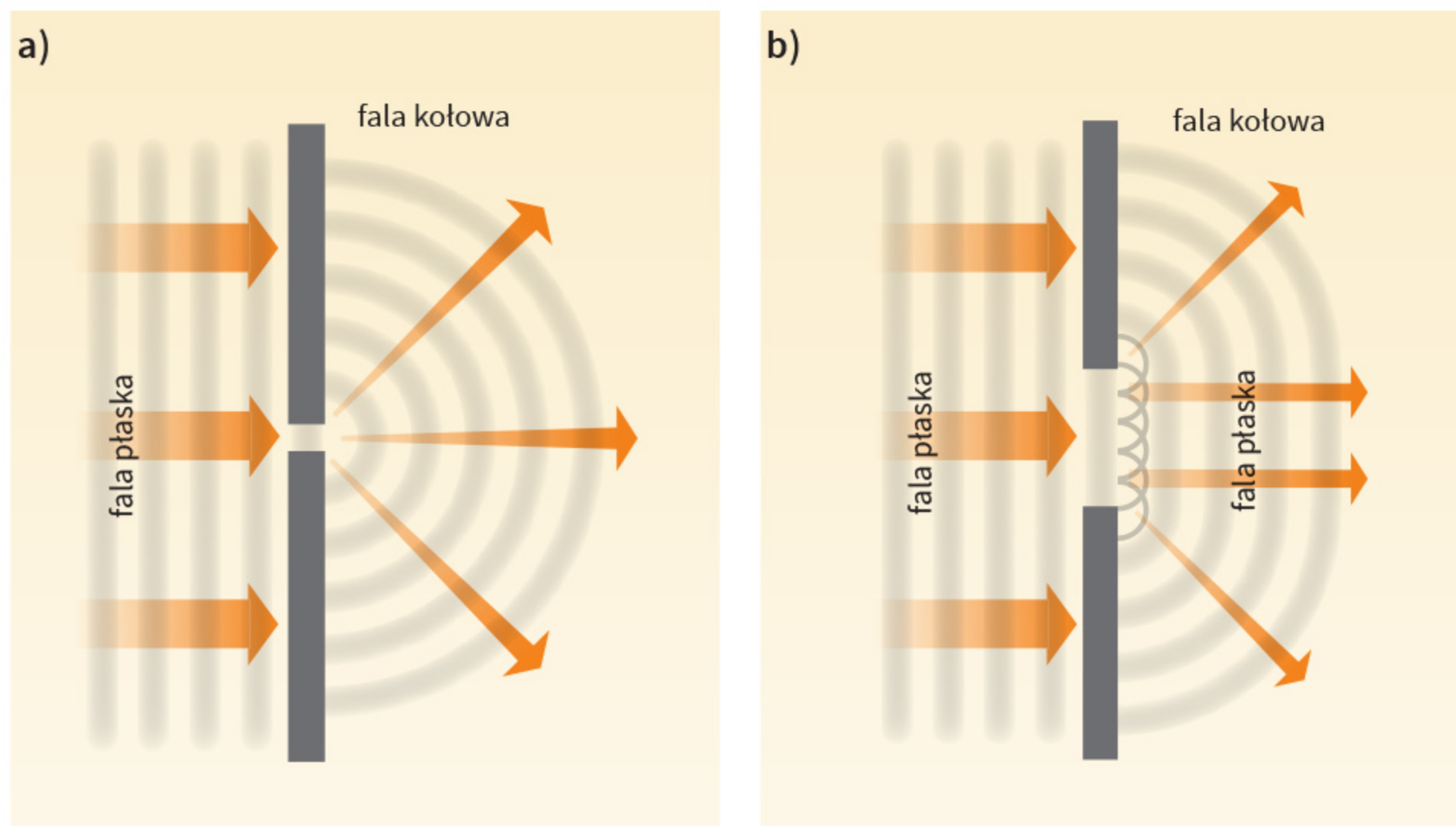
Ryc. 10.2. Fale na wodzie po przejściu przez szczelinę w warunkach naturalnych (a) i w warunkach doświadczenia szkolnego (b)

Gdy fala pada na niewielką szczelinę w przeszkodzie, za szczeliną rozchodzi się fala kołowa (ryc. 10.2). Zjawisko to nazywane jest ugięciem lub dyfrakcją fali.

Dyfrakcja (ugięcie) fali to zjawisko polegające na zmianie kształtu powierzchni falowych po ominięciu przez falę przeszkody.

Zmiana kształtu powierzchni falowych oznacza również zmianę kierunku rozchodzenia się fali. Gdy fala natrafia na przeszkodę ze szczeliną, może rozchodzić się dalej tylko od jednego miejsca drgającego, tego w szczelinie. Jeśli szczelina jest odpowiednio mała, można w przybliżeniu przyjąć, że drga tylko jeden punkt ośrodka. Zgodnie z wyżej wyrażoną zasadą wytwarza on falę kołową.

Jeśli szczelina jest szersza, punktów drgających jest więcej (ryc. 10.3). Przypuśćmy, że w danym momencie w szczelinie znajduje się akurat grzbiet fali. Od każdego z drgających punktów narysujmy półokrąg o promieniu równym długości fali. Jeżeli teraz połączymy gładką linią zewnętrzne części półokręgów, otrzymamy grzbiet fali, która przeszła przez szczelinę.



Ryc. 10.3. Fala płaska podczas przejścia przez wąską szczelinę (a) i szeroką szczelinę (b)

Jeśli będziemy poszerzać szczelinę, odpowiednio zwiększy się za nią obszar fali płaskiej, a jednocześnie skurczą się boczne obszary fali kołowej. Dla bardzo szerokich szczelin efekt dyfrakcyjny (czyli skracanie fali po bokach) będzie praktycznie niewidoczny. Można wówczas przyjąć, że z otworu wydostaje się fala płaska.

Dokładniejsza analiza pokazuje, że wyraźną dyfrakcję obserwuje się, gdy szerokość szczeliny jest porównywalna z długością fali λ . Gdy ta szerokość jest zdecydowanie większa od λ , po przejściu przez szczelinę fala tworzy wiązkę o szerokości praktycznie równej szerokości szczeliny.

Dyfrakcja zachodzi nie tylko przy przejściu fali przez szczelinę, ale także w sytuacji, gdy fala mija przeszkodę. Dzięki zjawisku dyfrakcji („skręcania”) fali m.in. dźwięki nie rozchodzą się tylko wzdłuż linii prostej, lecz są dobrze słyszalne również za różnymi przeszkodami.

Zasada superpozycji

Co się dzieje, gdy fale wytworzone przez dwa źródła się spotykają? Można to zaobserwować na przykładzie kropli deszczu padających na taflę wody (ryc. 10.4).



Ryc. 10.4. Krople deszczu padające na taflę wody

DOŚWIADCZENIE 2.

Nalej centymetrową warstwę wody do miski lub wanienki. Wytwarzaj dwie fale:

- a) kołowe, np. przez rytmiczne uderzanie w powierzchnię wody dwoma palcami;
- b) płaskie, np. przez rytmiczne uderzanie w powierzchnię wody dwiema linijkami.

Obserwuj, czy fale podczas mijania się zmieniają swoją postać. Jeśli dobrze tego nie widać, nakręć filmy i odtwarzaj je w zwolnionym tempie.

Fale mijające się w tym samym ośrodku nie oddziałują ze sobą. Po prostu mijają się bez zmiany swoich własności, jakby się w ogóle nie zauważały. Jakie drgania obserwujemy zatem w punkcie mijania się fal? Odpowiedzią na to pytanie jest zasada superpozycji.

Zasada superpozycji

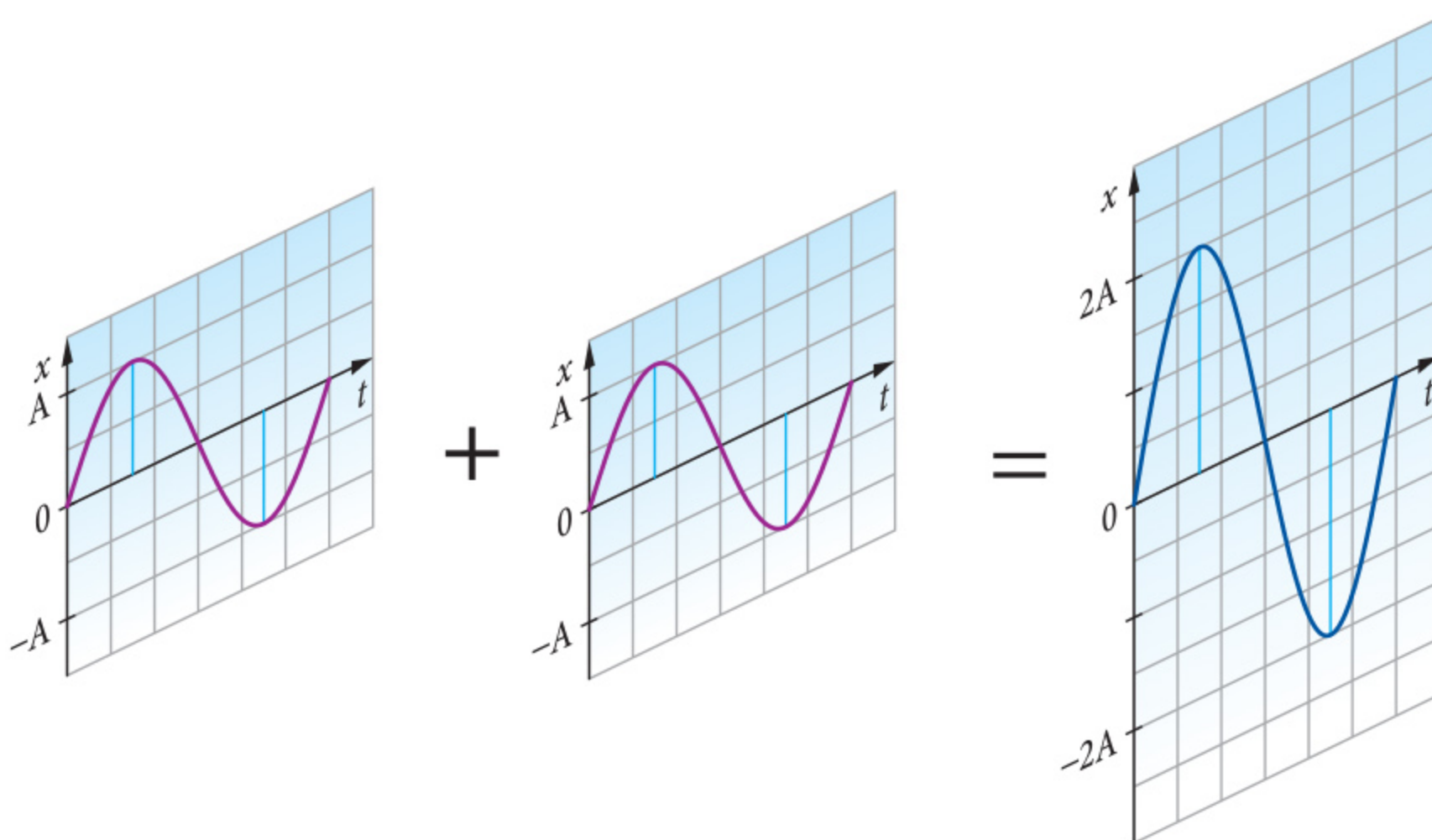
Wychylenie punktu, do którego dochodzą dwie fale, jest sumą wychyleń pochodzących od obu fal.

Rozważmy, jak będzie drgał punkt, do którego dochodzą dwie identyczne fale w tych samych fazach (tzn. grzbiety obu fal docierają do tego punktu jednocześnie).

Jeśli spotykają się dwa takie same grzbiety, to wychylenie wynikające z każdej z dwóch fal jest maksymalne i równe A , czyli amplitudzie fali. Wychylenie danego punktu jest zatem sumą obu wychyleń, czyli w tym momencie wynosi $2A$ (ryc. 10.5). Jeśli właśnie spotykają się doliny obu fal, to wychylenie danego punktu jest równe $-2A$. W tym punkcie będziemy zatem widzieć dwukrotnie wyższe grzbiety i dwukrotnie głębsze doliny.

Oznacza to, że w danym punkcie ośrodka drgania mają dwukrotnie większą amplitudę, czyli efektem nałożenia się fal jest wzmocnienie drgań ośrodka.

Dwie takie same fale **wzmacniają się** maksymalnie w punktach, do których docierają drgania w tych samych fazach.



Ryc. 10.5. Gdy nakładają się na siebie takie same drgania w tej samej fazie, powstają drgania o dwukrotnie większej amplitudzie

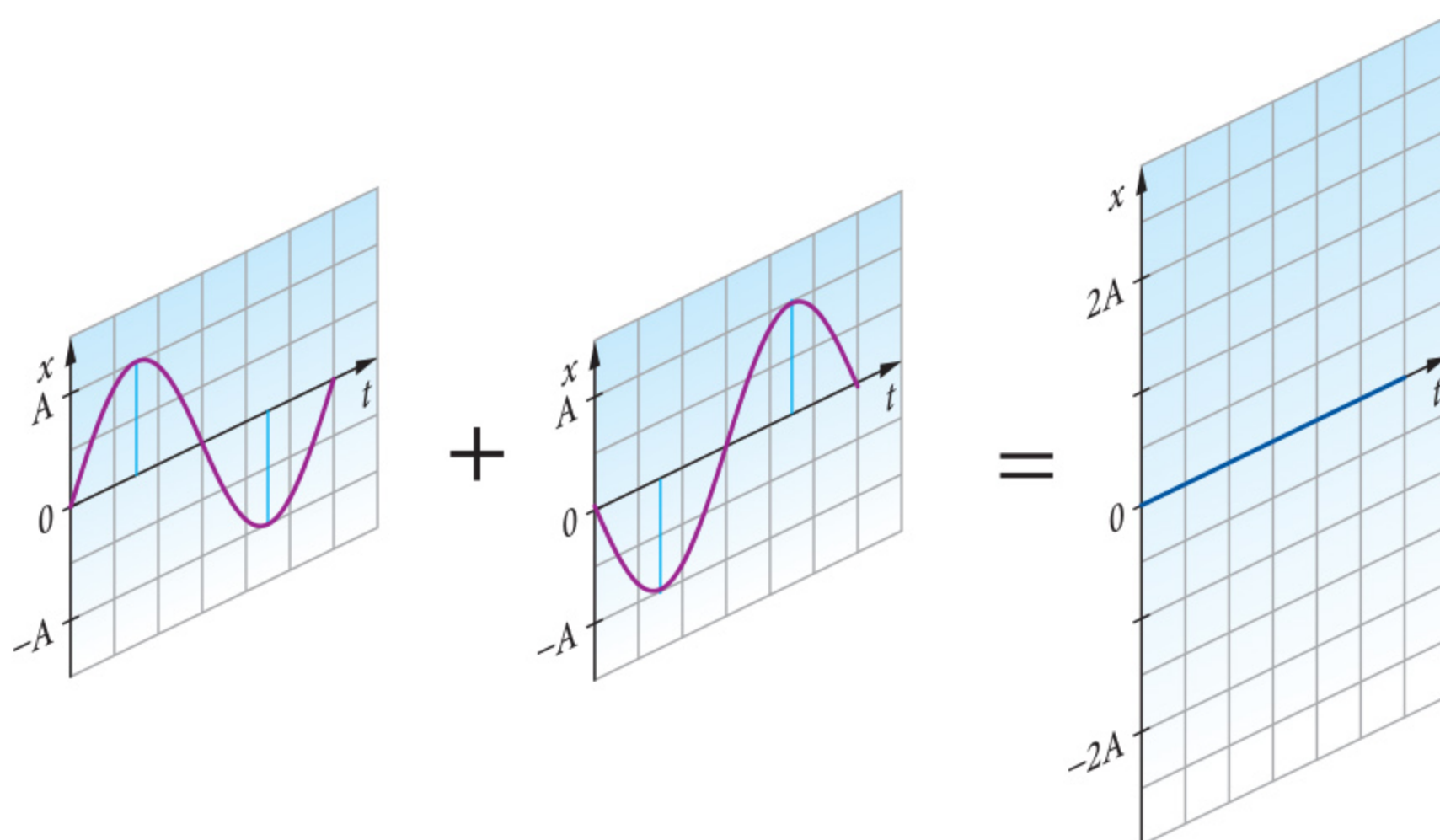
Rozważmy teraz, jak będzie drgał punkt, do którego dochodzą dwie identyczne fale w przeciwnych fazach. Jeśli grzbiet fali spotyka się z doliną, to wychylenie jednej fali ma wartość A , a drugiej jest równe $-A$, gdzie A jest amplitudą fali.

Wychylenie danego punktu ośrodka jest sumą obu wychyleń, czyli:

$$x = A + (-A) = 0$$

W tym punkcie wychylenie będzie równe zero (ryc. 10.6). Będzie tak w każdym momencie, o ile fale mają tę samą długość i tę samą amplitudę. Identyczne fale spotykające się w przeciwnych fazach wygaszają się całkowicie.

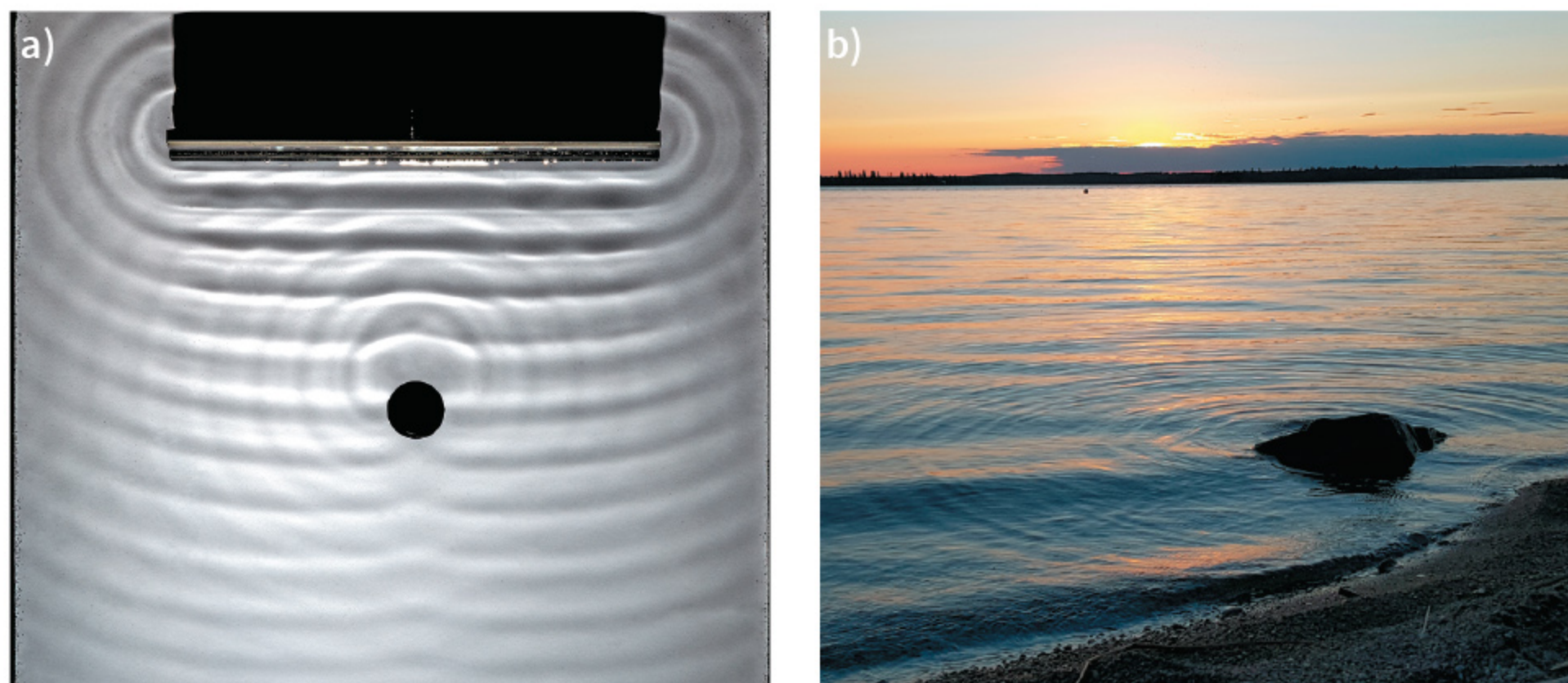
Dwie takie same fale **wygaszają się** w punktach, do których docierają drgania o przeciwnych fazach.



Ryc. 10.6. Gdy w danym punkcie nakładają się takie same drgania o przeciwnych fazach, następuje całkowite wygaszenie drgań

W rzeczywistości to, co widzimy jako jedną falę, jest efektem złożenia wielu mniejszych fal. Z każdego drgającego punktu rozchodzi się fala kulista. Fale te nakładają się na siebie, a matematycznie wyraża to zasada superpozycji. Fala, którą obserwujemy, jest wynikiem nałożenia się ogromnej liczby fal kulistych.

Rozpraszanie fal



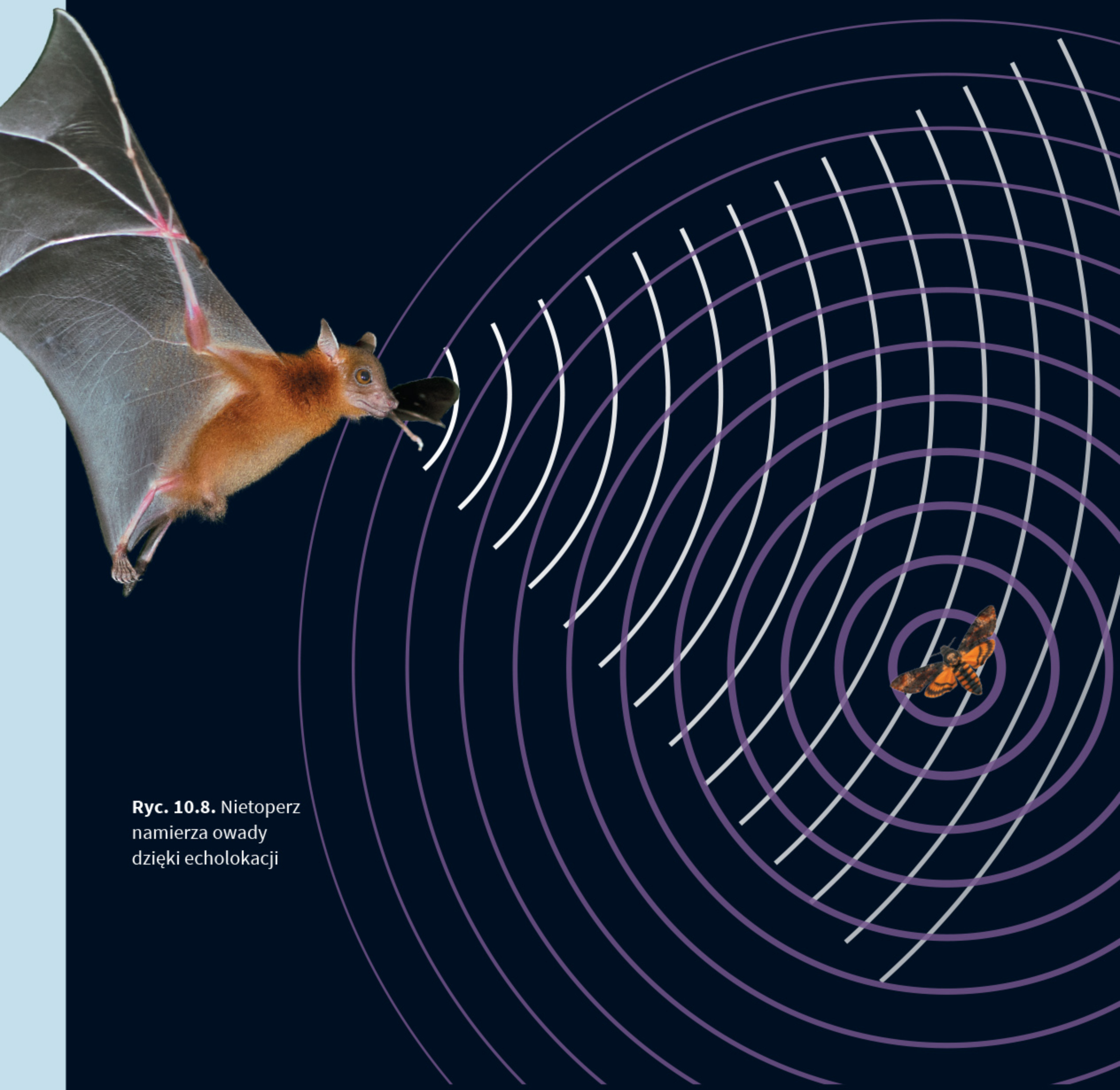
Ryc. 10.7. a) Fale na wodzie wzbudzone w waniencie z nieruchomą przeszkodą. b) Leżący kamień rozprasza falę na wodzie

Co się dzieje, gdy fala napotyka przeszkodę o rozmiarach porównywalnych z jej długością? Rycina 10.7 przedstawia dwa przykłady fali płaskiej, która napotyka widoczną przeszkodę. Widzimy fale kołowe rozchodzące się wokół przeszkody.

Gdy na drodze fali znajduje się obiekt o rozmiarach porównywalnych z jej długością, rozchodzi się od niego fala kulista (na płaszczyźnie kołowa). Zjawisko to nazywamy rozproszeniem fali.

Na przykład gdy krzykniemy w lesie, fala dźwiękowa rozprasza się na pniach drzew. Do słuchającego z różnych kierunków docierają fale rozproszone, dlatego często ma on kłopot z ustaleniem kierunku, z którego dochodzi wołanie.

Rozpraszanie fal dźwiękowych na małych przeszkodach wykorzystują między innymi nietoperze. Emitują one ultradźwięki o częstotliwościach do 200 kHz. Te fale są rozpraszane przez latające owady. Dzięki odebraniu fali rozproszonej nietoperz jest w stanie ustalić dokładne położenie owada.



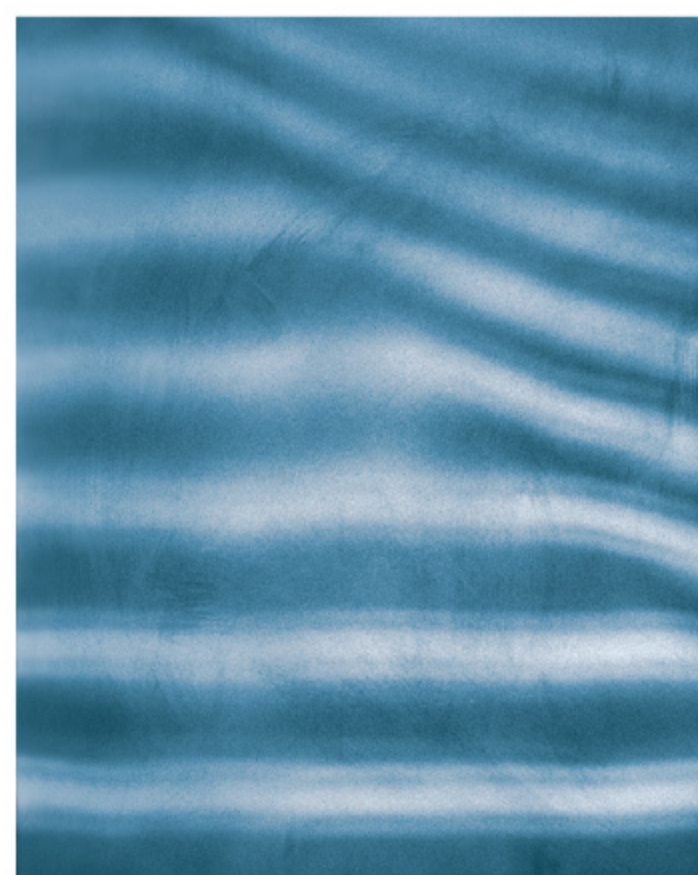
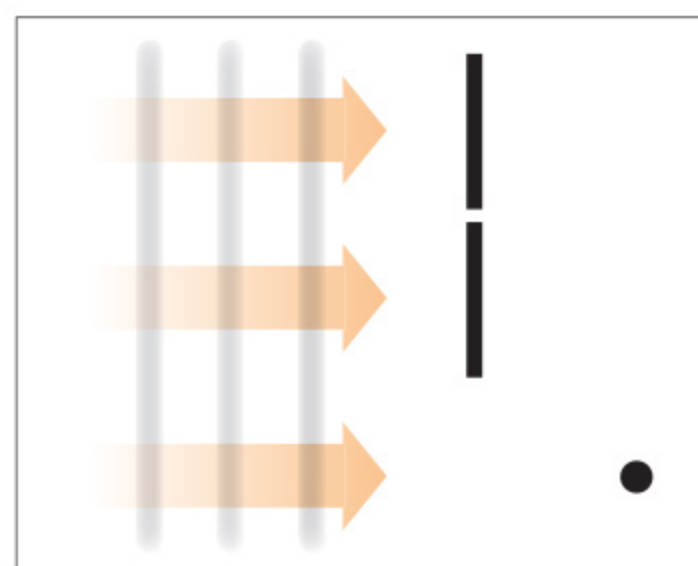
Ryc. 10.8. Nietoperz namierza owady dzięki echolokacji

PODSUMOWANIE

- ▶ Każdy punkt drgający w ośrodku jednorodnym wytwarza falę kulistą.
- ▶ **Dyfrakcja (ugięcie) fali** to zmiana kształtu powierzchni falowych po ominięciu przez falę przeszkody.
- ▶ **Zasada superpozycji:** wychylenie punktu, do którego dochodzą dwie fale, jest sumą wychyleń pochodzących od obu fal.
- ▶ Dwie takie same fale **wzmacniają się** w punktach, do których docierają drgania w tych samych fazach, a **wygaszają się** w punktach, do których docierają drgania w fazach przeciwnych.

PYTANIA I ZADANIA

1. Przerysuj do zeszytu schemat, który widać obok, i dorysuj na nim dalszy bieg fali – powierzchnie falowe i kierunki rozchodzenia się.
2. Gdy słuchamy śpiewającego duetu, słyszymy głos każdego śpiewaka niezależnie od drugiego. Jeden dźwięk nie wpływa na brzmienie drugiego dźwięku. Dlaczego tak się dzieje?
3. Do danego punktu ośrodka w pewnym momencie dotarły dwie fale. Pierwsza z nich spowodowałaby w tym punkcie wychylenie $x = 0,6 \text{ cm}$, a druga $x = -2 \text{ mm}$. Jakie jest obserwowane wychylenie tego punktu ośrodka w danym momencie?
4. Dwie fale mogą wygasić się całkowicie w pewnych punktach ośrodka. Ustal, czy nie jest to sprzeczne z zasadą zachowania energii.
5. Po wpisaniu w wyszukiwarkę internetową hasła „dyfrakcja” można znaleźć zdjęcia podobne do tego obok, przedstawiającego fale na wodzie. Czy to rzeczywiście przykład dyfrakcji? Uzasadnij odpowiedź.



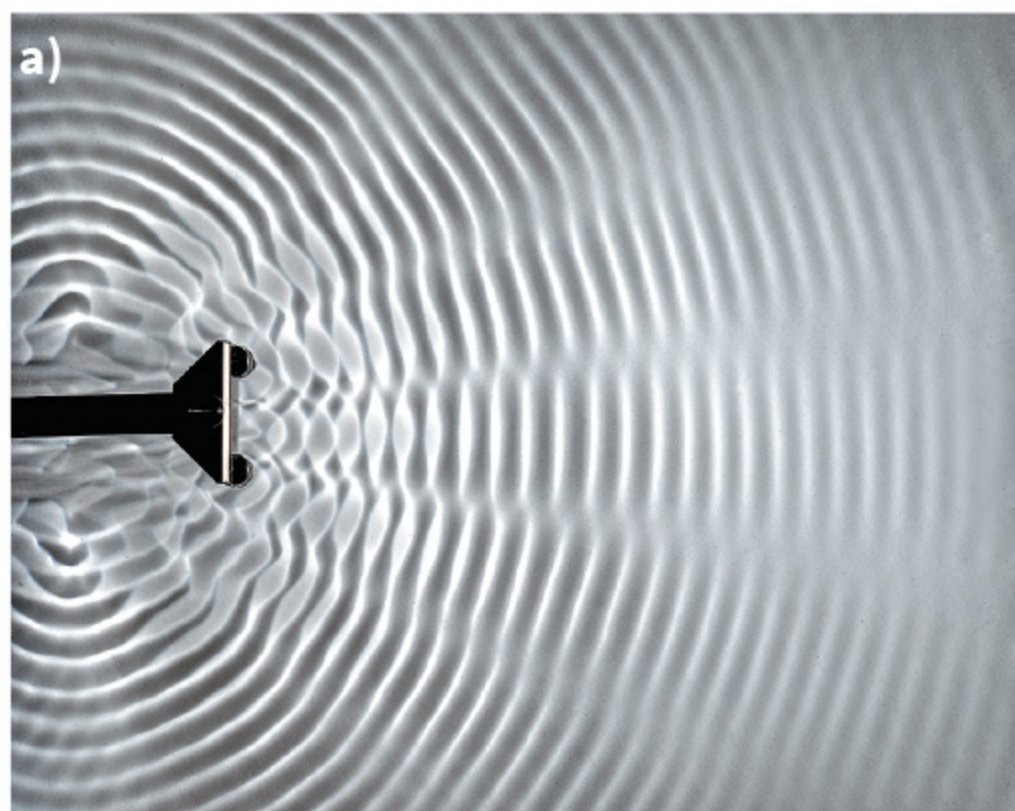


11. Interferencja fal

- Interferencja fal z dwóch źródeł
- Fale stojące

→ **Przypomnij sobie** zasadę superpozycji fal.

Każdy drgający punkt ośrodka wytwarza falę kulistą. Wszystkie fale nakładają się zgodnie z zasadą superpozycji. Efekty nakładania się bywają nieoczekiwane. Warto poznać niektóre przykłady.



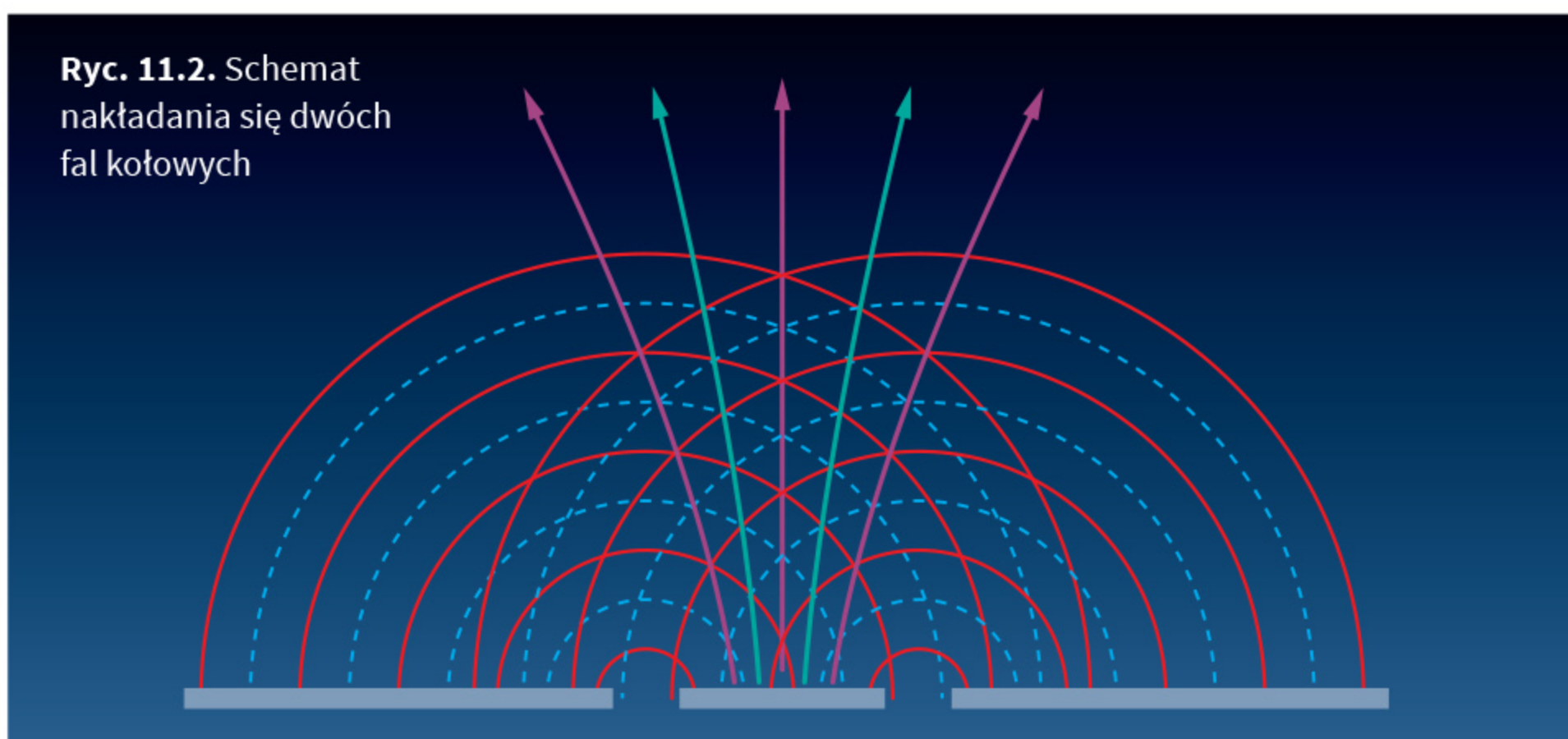
Ryc. 11.1. Dwie nakładające się fale kołowe, wytworzone przez dwa źródła (a) i wychodzące z dwóch szczelin (b)

Interferencja fal z dwóch źródeł

Zbadajmy, jaki jest efekt nakładania się dwóch fal kołowych wytwarzanych przez źródła wykonujące drgania o tej samej częstotliwości. W tym celu można wprawić w drgania dwa ostrza, które uderzają rytmicznie o powierzchnię wody (ryc. 11.1a), lub skierować falę płaską na przeszkodę, w której są dwie małe identyczne szczeliny (ryc. 11.1b).

Na ilustracjach 11.1 widoczne są linie, wzdłuż których woda praktycznie nie faluje. Dlaczego tak się dzieje? W całym widocznym obszarze na powierzchni wody rozchodzą się dwie takie same fale kołowe. W każdym punkcie powierzchni wody te fale nakładają się na siebie, a więc – zgodnie z zasadą superpozycji – wychylenie każdego punktu jest sumą wychyleń pochodzących od obu fal. W wyniku nakładania się fale mogą się wzmacniać lub wygaszać.

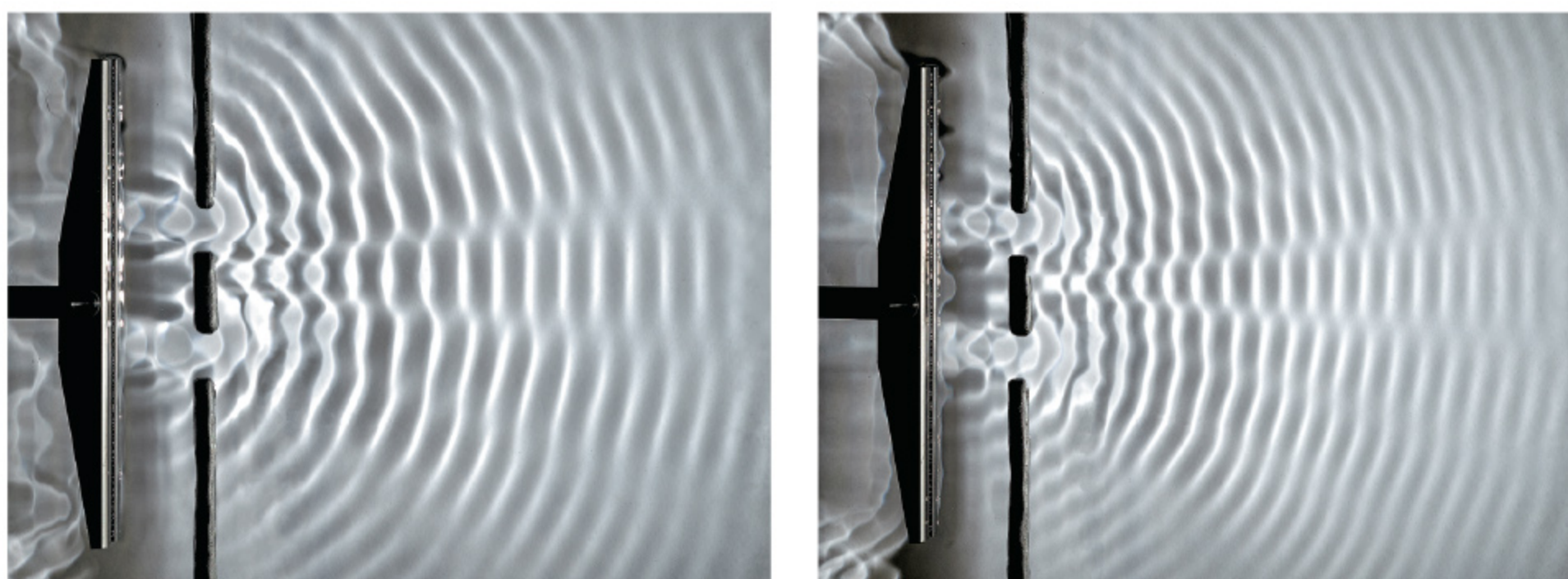
Ryc. 11.2. Schemat nakładania się dwóch fal kołowych



Na rycinie 11.2 czerwone linie przedstawiają kolejne grzbiety fal, a niebieskie – kolejne doliny. W niektórych punktach czerwone linie się przecinają. To miejsca, w których grzbiet spotyka się z grzbietem i następuje wzmocnienie fali (poszczególne wychylenia się dodają). Punkty przecięcia dwóch niebieskich okręgów oznaczają miejsca, w których spotykają się doliny fali, zatem powstaje w nich głębsza dolina (patrz rozdział 10.). Okazuje się, że te miejsca „spotkań” grzbietów z grzbietami i dolin z dolinami leżą wzdłuż pewnych linii, które oznaczyliśmy na fioletowo. Wzdłuż tych linii fale maksymalnie się wzmacniają. Spójrzmy teraz na punkty, w których przecinają się okręgi czerwone z niebieskimi. Oznaczają one miejsca, w których grzbiety fal spotykają się z dolinami. One również układają się wzdłuż pewnych linii, zaznaczonych na rysunku na zielono. Amplitudy obu fal są prawie takie same, więc możemy przyjąć, że wysokość grzbietu jest taka sama jak głębokość doliny. Oznacza to, że wychylenie w tych miejscach jest równe:

$$x = A + (-A) = 0$$

Efekty przestrzenne powstałe w wyniku nałożenia się fal nazywamy **interferencją**.



Ryc. 11.3. Interferencja fal przechodzących przez dwie szczeliny. Na zdjęciu po prawej stronie długość fali jest mniejsza, stąd inny obraz interferencyjny

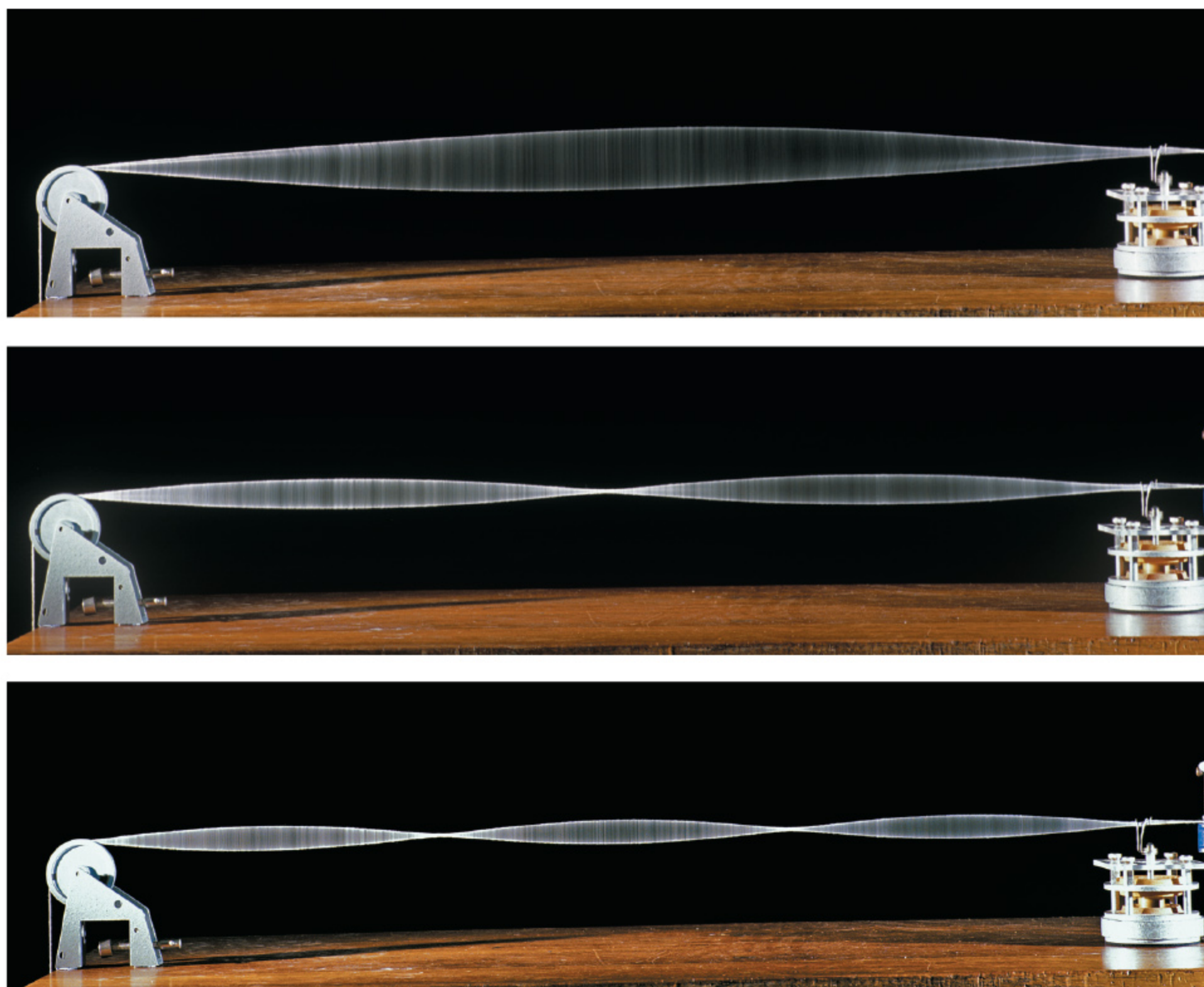
Linie wzmocnień i wygaszeń zaznaczone na rycinie 11.2 łatwo można odnaleźć na zdjęciach 11.1. Jednak obraz interferencyjny nie zawsze jest taki sam. Na rycinie 11.3 przedstawiono zdjęcia interferencji dwóch fal nieznacznie różniących się długością, które przeszły przez te same szczeliny. Widać, że wzdłuż prostej prostopadłej do przeszkody ze szczelinami fale zawsze się wzmacniają. Pozostałe linie wzmocnień są położone symetrycznie w stosunku do linii środkowej. Liczba linii wzmocnień oraz ich kierunki zależą zarówno od długości fali, jak i od odległości między szczelinami.

DOŚWIADCZENIE 1.

Ustaw dwa głośniki w odległości co najmniej metra od siebie, tak aby przed nimi było sporo wolnej przestrzeni. Podłącz je do generatora dźwięków (np. w komputerze). Odpowiedni generator można znaleźć w internecie. Ustaw częstotliwość w generatorze tak, aby głośniki emitowały dźwięki o długości fali 3–5 razy mniejszej od odległości między głośnikami. Zastój ręką jedno ucho i powoli zmieniaj miejsce nasłuchu w pomieszczeniu. Czy dźwięk jest tak samo głośny w każdym miejscu? Wyjaśnij obserwowany efekt.

Fale stojące

Szczególnym przypadkiem interferencji fal są tzw. fale stojące.

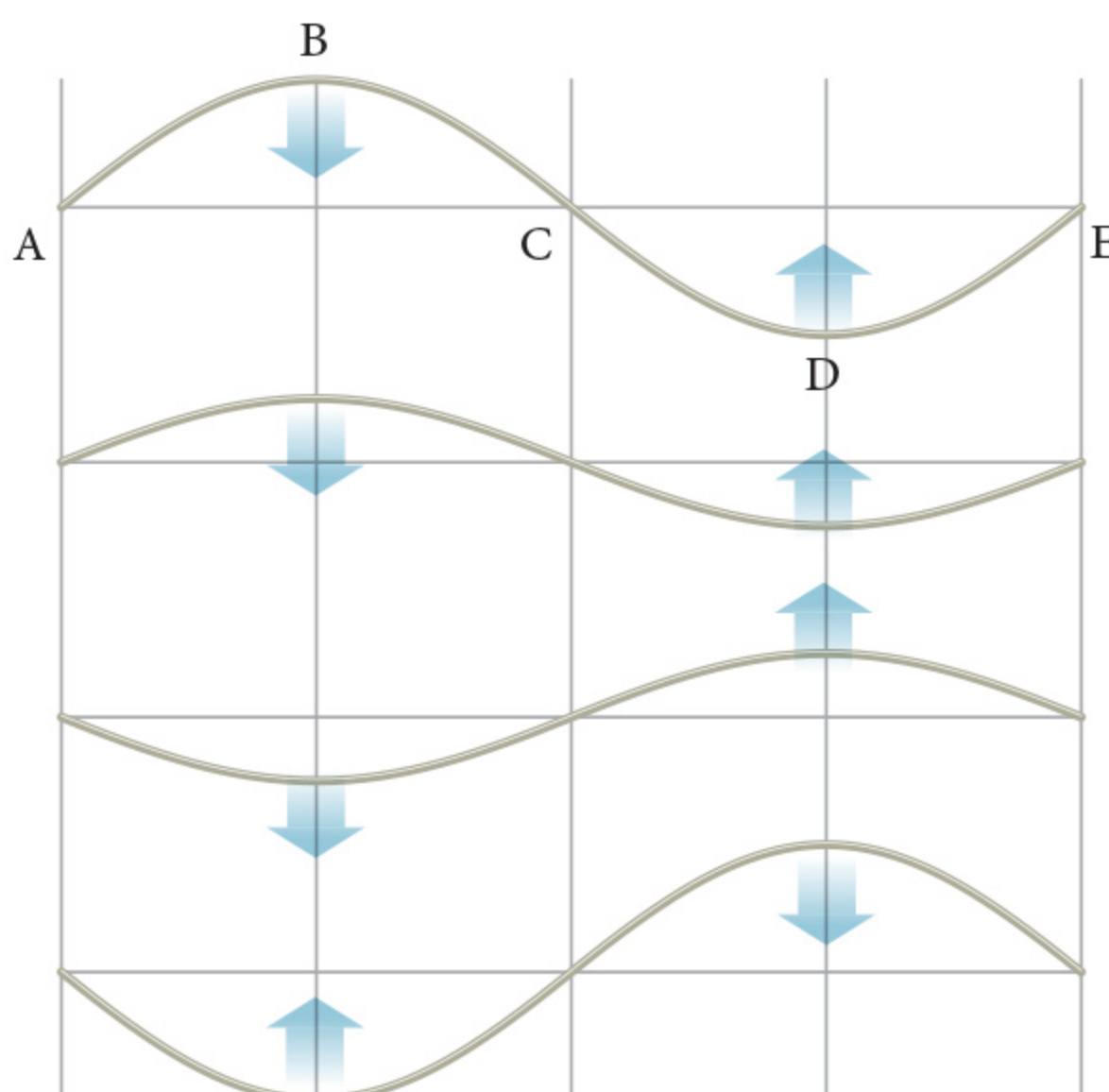


Ryc. 11.4. Fale stojące na sznurze

DOŚWIADCZENIE 2.

Jeden koniec sznura o długości około 2 m przymocuj np. do klamki (może go też trzymać druga osoba). Weź do ręki drugi koniec sznura i szarpnij nim poprzecznie. Czy widzisz falę odbitą od drugiego końca? Zaczynij wytwarzać falę ciągłą. Dobierz częstotliwość tak, by środkowy punkt sznura w ogóle nie drgał.

Jeśli zamocujemy jeden koniec sznura, a drugi koniec będzie ciągłym źródłem fali, na sznurze będą się rozchodzić jednocześnie dwie takie same fale: jedna wytwarzana przez źródło i druga odbita od zamocowanego końca, biegnąca w przeciwną stronę. Fale nakładają się na siebie, a wynikiem tej interferencji jest **fala stojąca** (ryc. 11.4).



Ryc. 11.5. Kształt sznura (schemat) w kolejnych fazach fali stojącej. Punkty B i D (tzw. strzałki) drgają z maksymalną amplitudą. Punkty A, C i E (tzw. węzły) nie drgają wcale

W fali stojącej nie obserwujemy przemieszczających się grzbietów i dolin, tak jak w fali biegnącej. Poszczególne elementy sznura drgają ze stałą amplitudą, jednak dla różnych elementów amplituda jest różna. W niektórych miejscach wynosi ona $2A$, gdzie A jest amplitudą pojedynczej fali biegnącej (punkty B i D na ryc. 11.5). W tych miejscach stale następuje maksymalne wzmocnienie – są to tzw. **strzałki fali stojącej**. Z kolei w innych fragmentach ośrodku w ogóle nie ma drgań. To znaczy, że fale składowe w tych punktach ciągle się wygaszają (np. punkt C na ryc. 11.5). To tzw. **węzły fali stojącej**.

DOŚWIADCZENIE 3.

Nalej do butelki trochę wody. Dmuchaaj tuż nad otworem butelki, by wytworzyć dźwięk. Następnie dolej wody i powtórz dmuchanie. Czy wraz ze wzrostem poziomu wody w butelce wysokość dźwięku maleje, rośnie czy jest stała? Zastanów się, jak długość słyszanej fali dźwiękowej wytwarzanej w butelce zależy od wysokości zawartego w niej słupa powietrza.

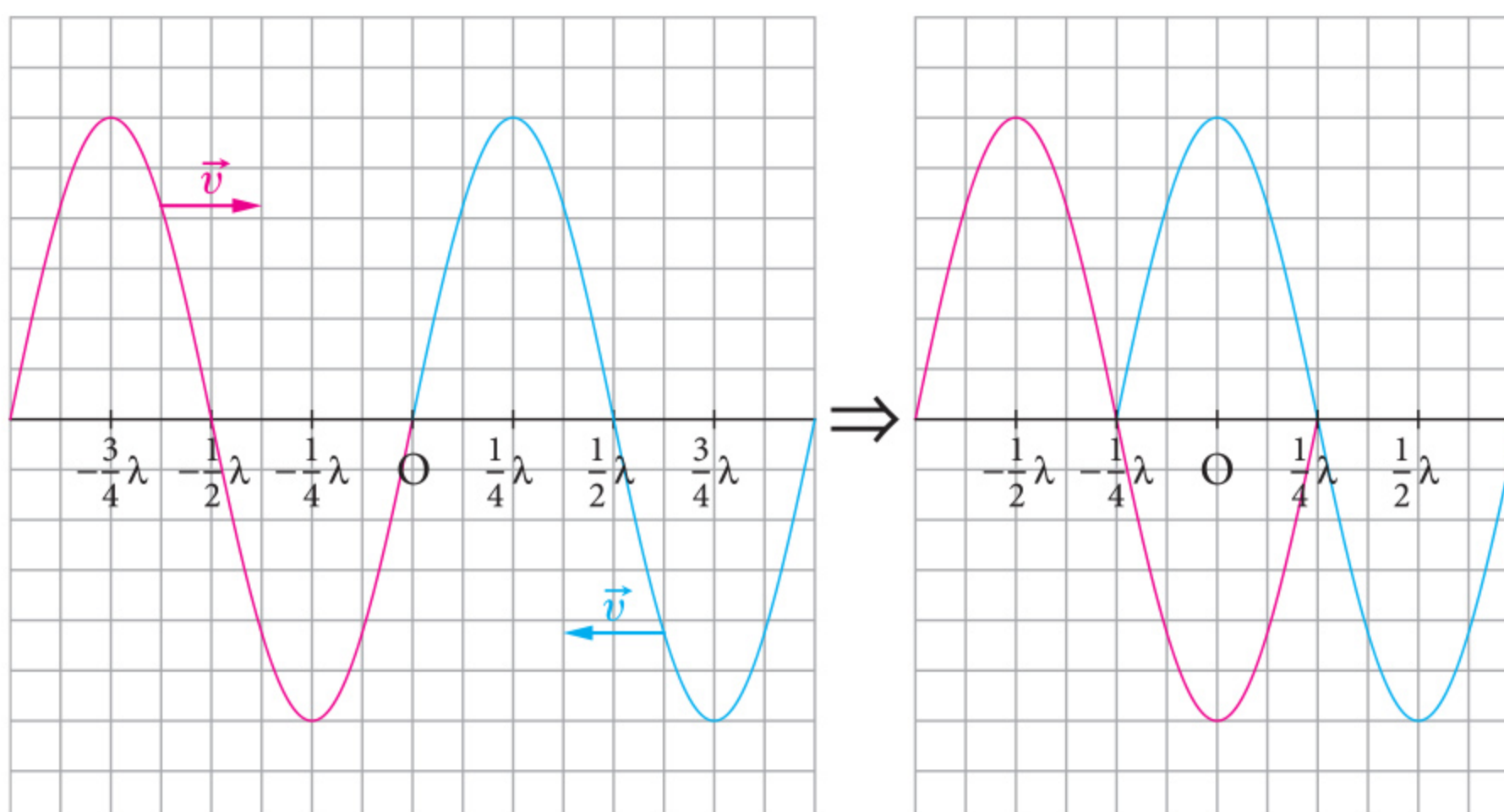


WARTO WIEDZIEĆ

Powstawanie fali stojącej

Aby zrozumieć, jak powstaje fala stojąca, przeanalizujmy rysunek. Dwie identyczne fale – różowa biegnąca w prawo, niebieska w lewo – nakładają się w punkcie O. W momencie gdy fale dotrą do tego punktu, będzie on miał wychylenie równe 0. Gdy następnie fale przesuną się o $\frac{1}{4}\lambda$, wychylenie różowej fali w punkcie O będzie równe $-A$, a niebieskiej $+A$. Wobec tego obserwowane wychylenie punktu O nadal będzie równe zeru. Gdy przeanalizujemy kolejne fazy nakładania się fal, przekonamy się, że punkt O w ogóle nie drga. Podobne rozumowanie można przeprowadzić dla innych punktów fali stojącej.

Mechanizm tworzenia się fal stojących można prześledzić w aplikacjach dostępnych w internecie, np. na stronie phet.colorado.edu.



Prawie wszystkie instrumenty muzyczne wykorzystują zjawisko powstawania dźwiękowej fali stojącej. Dźwięk instrumentów muzycznych jest odpowiednio głośny właśnie dlatego, że amplituda fali stojącej jest duża, ponieważ powstaje w wyniku nakładania się fal. Na przykład organy składają się z wielu piszczałek o różnych długościach i w każdej z nich powstaje inna dźwiękowa fala stojąca. Im dłuższa jest piszczałka, tym niższy wytwarza dźwięk (scenariusz doświadczenia 5, s. 207).

s. 207

Z kolei brzmienie instrumentów strunowych (gitara, skrzypce, kontrabas) zawdzięczamy falom stojącym, jakie powstają w pudle rezonansowym instrumentu. W tym przypadku źródłem fali jest drgająca struna, ale sama struna daje dźwięk bardzo cichy. Jednak wewnątrz pudła rezonansowego fala dźwiękowa wielokrotnie odbija się od jego ścianek i dzięki interferencji fal odbitych powstaje fala stojąca o dużej amplitudzie. Podobnie jak w przypadku piszczałek, większe pudło emituje niższy dźwięk. Z tego powodu kontrabas ma znacznie większe pudło rezonansowe niż skrzypce.

Fale stojące dominują w obszarach zamkniętych (choćby z jednej strony), gdyż fala wpadająca do takiego obszaru odbija się od jego granic i interferuje z falą padającą. Powstaje wówczas fala stojąca o dużej amplitudzie. Można to zaobserwować np. na basenie. Gdy woda w nim faluje, nie obserwujemy biegnących grzbietów jak na jeziorze. Widzimy natomiast, że powierzchnia wody w pewnych miejscach unosi się i opada (scenariusz doświadczenia 3, s. 203).

s. 203



Ryc. 11.6. Fale stojące powstające na płaszczyźnie mogą mieć dosyć skomplikowany charakter. Na zdjęciach białe obszary to miejsca, w których nie obserwuje się drgań ośrodka.

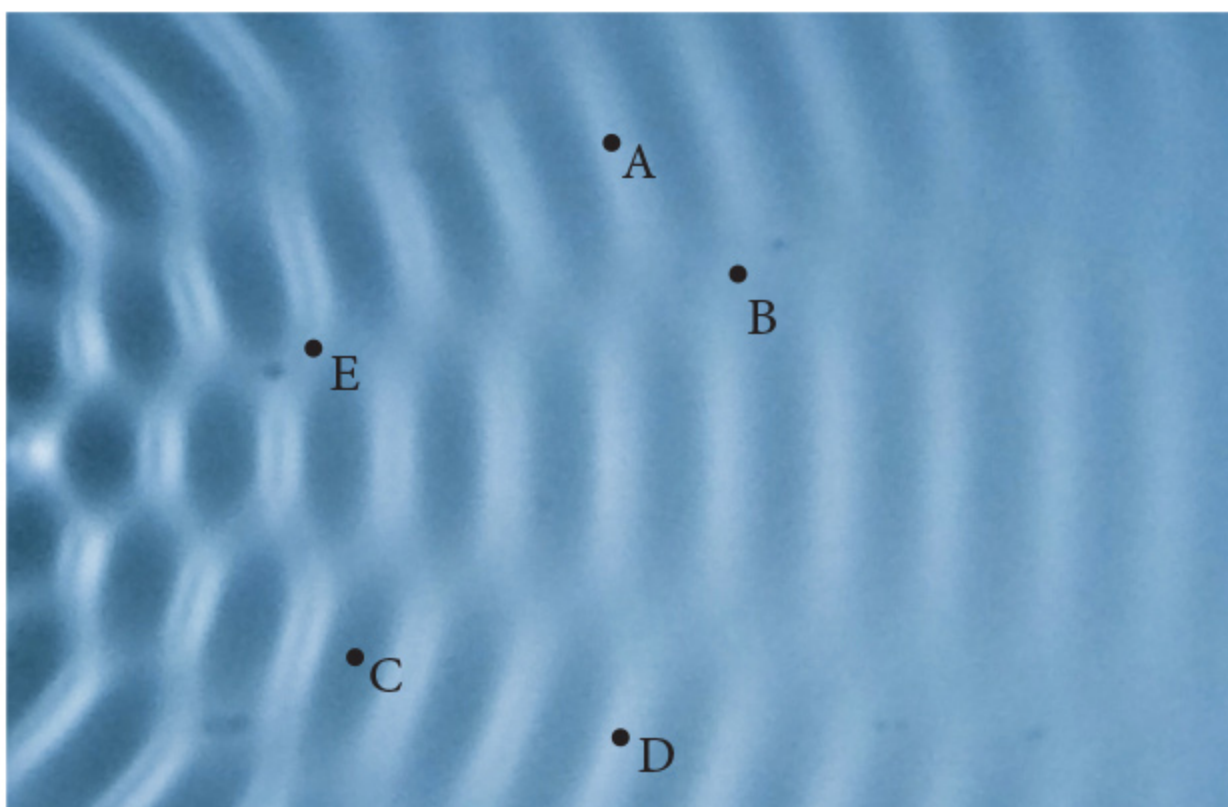
PODSUMOWANIE

- ▶ **Interferencja** to efekty przestrzenne powstałe w wyniku nałożenia się fal.
- ▶ Wynikiem nakładania się dwóch fal kołowych są linie wzmocnień i wygaszeń.
- ▶ Dwie identyczne fale biegnące w przeciwne strony po nałożeniu się na siebie tworzą **fale stojące**. Cechą charakterystyczną fal stojących są niedrgające punkty o stałym położeniu.

PYTANIA I ZADANIA

1. Dwa głośniki stojące 2 m od siebie emitują dźwięk o długości fali 60 cm. Narysuj w odpowiedniej skali, w jakich trzech punktach można oczekiwać maksymalnego wzmocnienia dźwięku. Każdy z tych punktów powinien leżeć na innej linii wzmocnień.
2. Uzasadnij twierdzenie: „Jeśli długość fali przechodzącej przez dwie szczeliny jest większa od odległości między tymi szczelinami, powstaje tylko jedna linia wzmocnień”. Wskazówka: wykonaj dwa rysunki podobne do ryciny 11.2, tak by na jednym długość fali była trochę mniejsza, a na drugim trochę większa od odległości między szczelinami.

3. Na zdjęciu poniżej przedstawiono obraz interferencji dwóch fal kołowych na wodzie. W których z zaznaczonych punktów fale się wzmacniają, a w których wygaszają?



4. Nagłośnienie koncertów na otwartej przestrzeni najczęściej zapewniają dwa zestawy głośników po obu stronach sceny (fot). Dlaczego słuchacze zgromadzenia przed sceną nie obserwują linii wzmocnień i wygaszeń dźwięku?



5. Na rysunku przedstawiono falę powstałą w wyniku nałożenia się dwóch fal o różnych długościach i amplitudach. Oszacuj długości fal składowych.





12. Światło jako fala

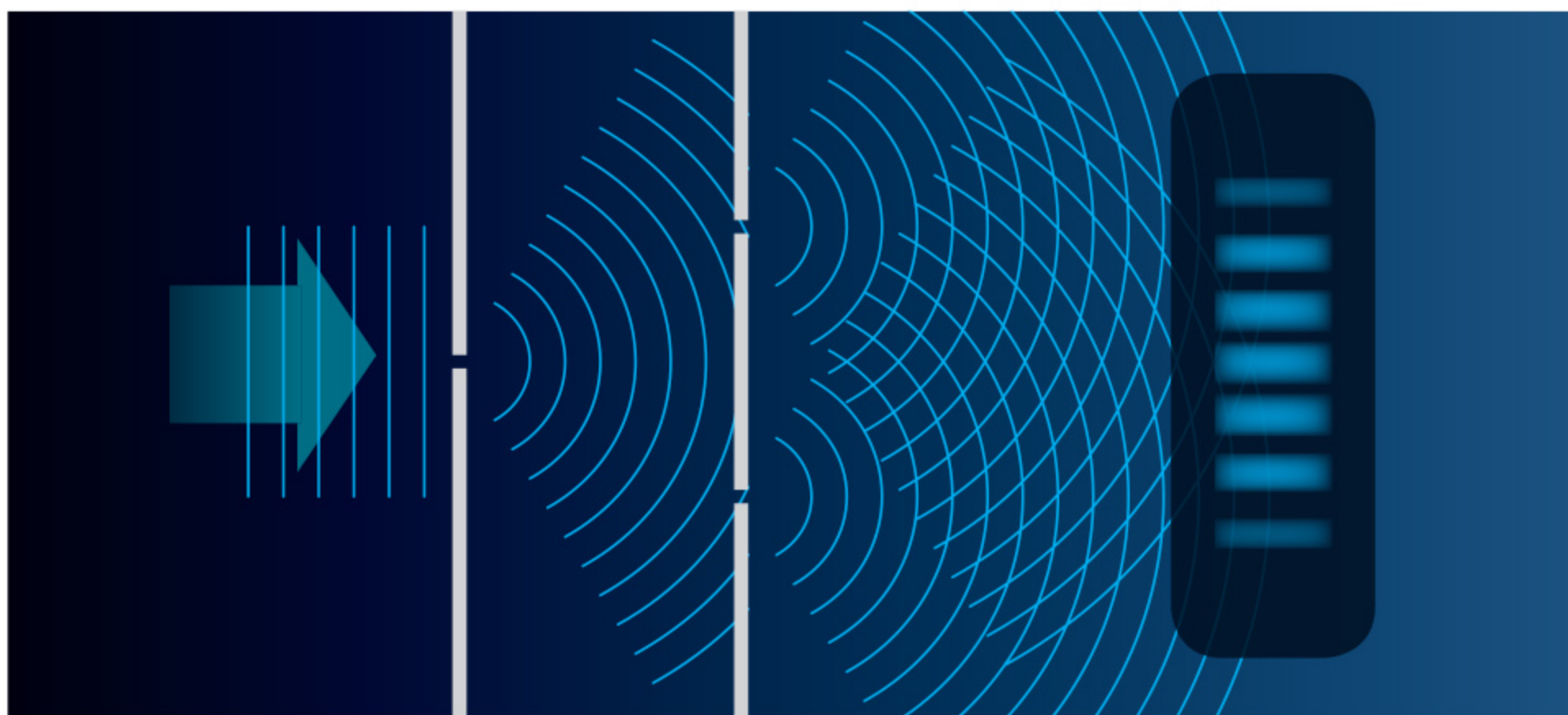
- Doświadczenie Younga
- Fale elektromagnetyczne
- Polaryzacja światła

→ **Przypomnij sobie** zjawiska dyfrakcji i interferencji fal.

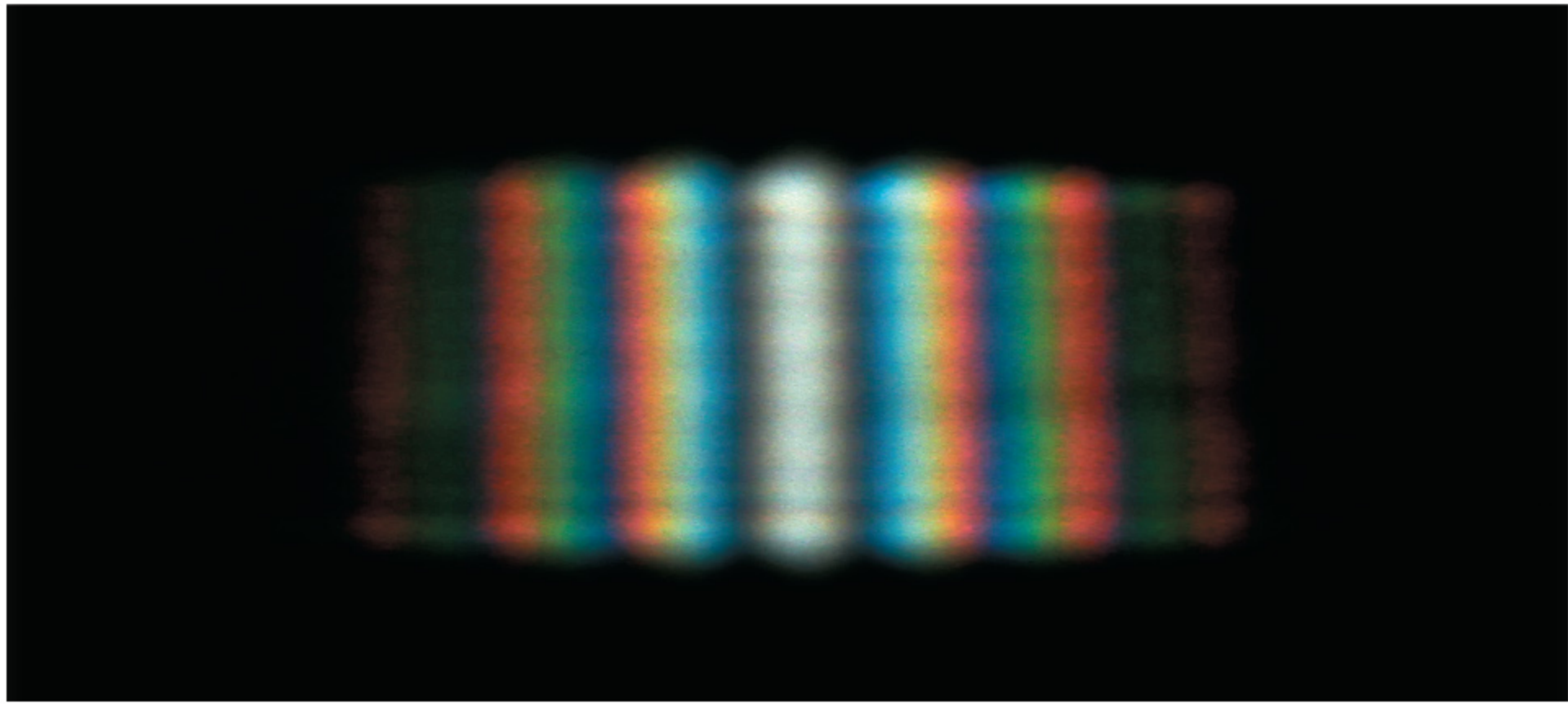
Zdecydowaną większość informacji o otaczającym świecie dostarcza nam światło wpadające do naszych oczu. To właśnie dzięki niemu widzimy wszystkie przedmioty. Gdy patrzymy np. na stół, ścianę czy niebo za oknem, widzimy światło rozproszone przez cząsteczki. Przyjrzyjmy się bliżej własnościom światła.

Doświadczenie Younga

Czym jest światło? Na to pytanie szukało odpowiedzi wiele pokoleń uczonych. Isaac Newton sądził, że światło jest strumieniem małych cząstek. Ogromny autorytet Newtona ułatwił upowszechnienie się jego teorii. Jednak na początku XIX wieku angielski fizyk Thomas Young przeprowadził doświadczenie, które dziś uznawane jest za jedno z najważniejszych w dziejach fizyki. W jego eksperymencie światło przechodziło przez układ szczelin: najpierw przez jedną, a następnie przez dwie szczeliny położone bardzo blisko siebie. Na ekranie pojawiał się obraz jasnych i ciemnych prążków (ryc. 12.1).



Ryc. 12.1. Falowe wyjaśnienie powstawania jasnych i ciemnych prążków w doświadczeniu Younga. Światło ulega dyfrakcji najpierw na jednej szczelinie, później na dwóch szczelinach, a jeszcze później dwie fale nakładają się i powstaje obraz interferencyjny



Ryc. 12.2. Prążki na ekranie uzyskane po przejściu światła białego przez układ dwóch szczelin

Na rycinie 12.2 widzimy obraz interferencji fal, którego powstawanie wyjaśniliśmy w rozdziale 11. (patrz ryc. 11.2). Na środku obrazu 12.2 widnieje biały prążek – to środkowa linia wzmocnień światła. Występuje ona zawsze, niezależnie od długości fali. Kolejne prążki to wzmocnienia rozmieszczone symetrycznie względem środkowego. Dlaczego są one barwne? Światło o danej częstotliwości fali wywołuje wrażenie określonej barwy (z zestawu kolorów tęczy). Światło białe jest mieszaniną fal o wszystkich częstotliwościach. Z częstotliwością związana jest długość fali:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

(1)

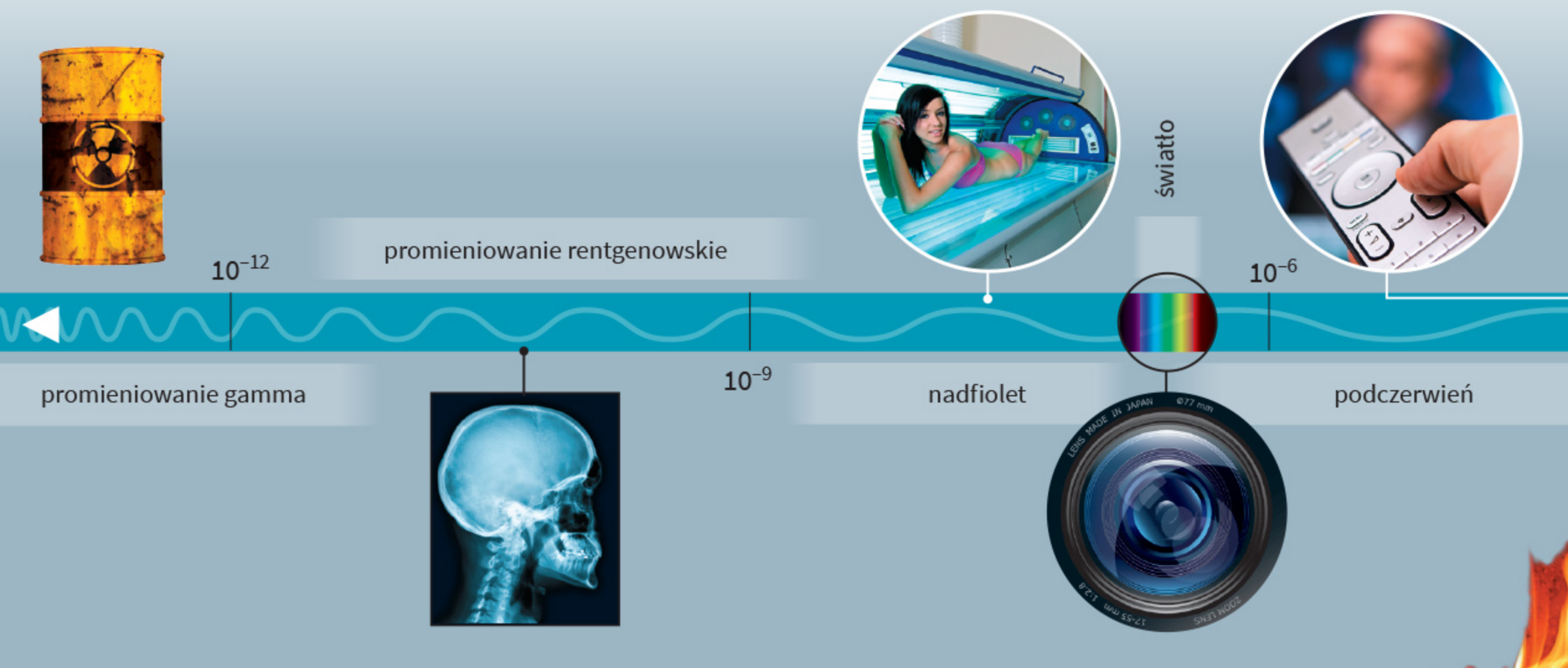
gdzie:

λ – długość fali,

c – prędkość światła,

f – częstotliwość fali.

Położenie linii wzmocnień (poza środkową) zależy od długości fali, a więc światło o różnych długościach fali (czyli różnych barwach) wzmacnia się w różnych miejscach ekranu.



DOŚWIADCZENIE 1.

Doświadczenie przeprowadź w dość ciemnym pokoju. Połóż na stole płytę kompaktową, „zapisaną” częścią do góry. Skieruj na nią prawie pionowo promień lasera. Uwaga, światło laserowe może trwale uszkodzić wzrok! Obserwuj odbicia lasera od płyty na suficie. Ile ich jest? Czy DVD daje taki sam obraz jak CD? Skieruj na płytę wąską wiązkę światła białego. Co teraz obserwujesz na suficie?

Informacja na płycie kompaktowej jest zapisana w postaci równoległych wypukłości i rowków różnej długości. Takie równoległe drobne wypukłości fizycy nazywają odbiciową siatką dyfrakcyjną. Gdy płyta jest oświetlona, na wypukłościach powstają fale kuliste, które się nakładają. Wówczas otrzymujemy kolorowe „odbicia”.

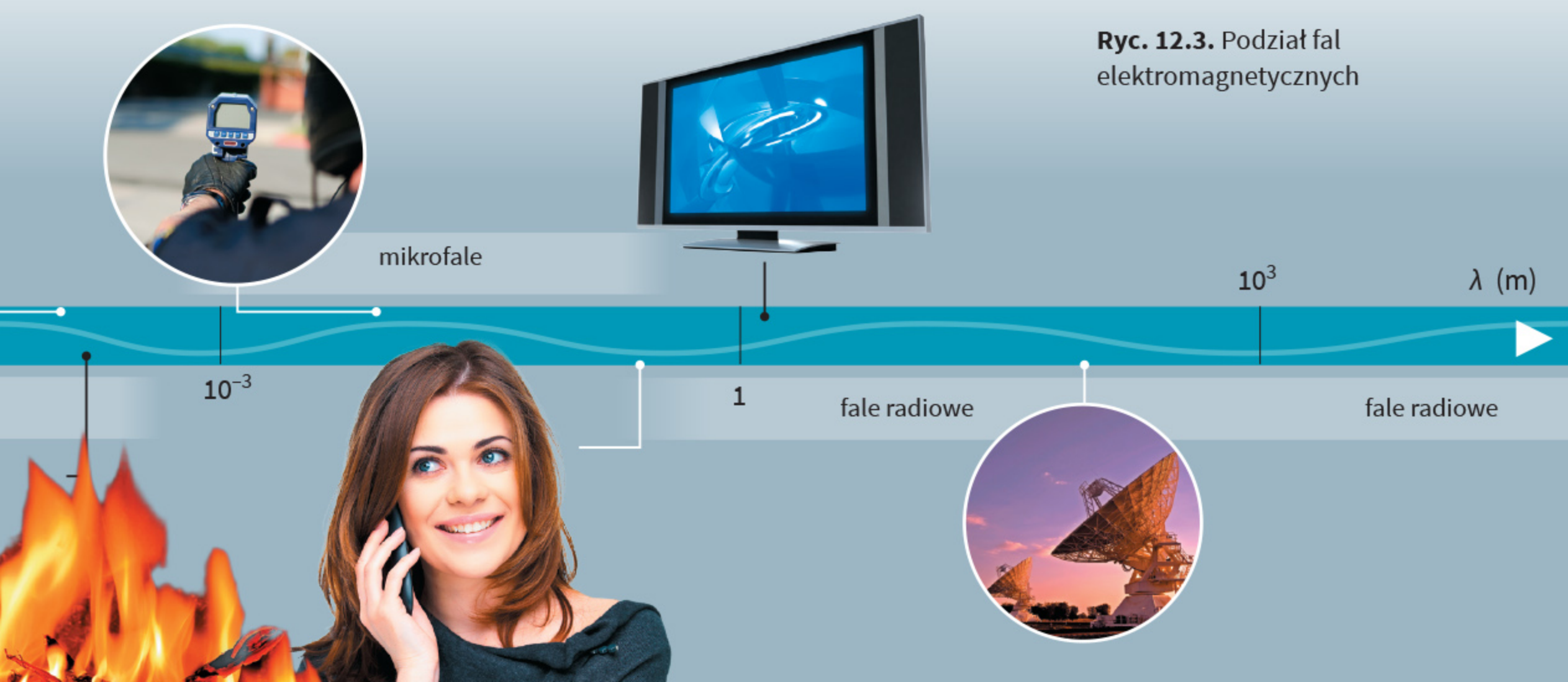
Z płyty kompaktowej możesz również uzyskać siatkę dyfrakcyjną ze szczelinami, która daje lepsze efekty dyfrakcyjne. W tym celu przyklej do „opisowej” strony płyty taśmę klejącą, a następnie ją zedrzyj. Taśma oderwie się razem z zewnętrzną warstwą płyty.

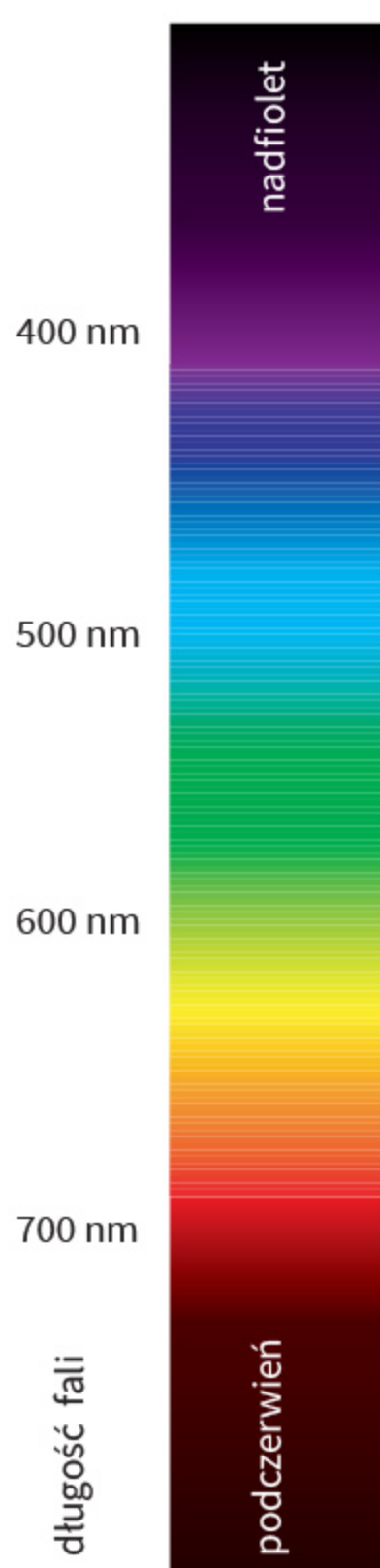
Wykonaj doświadczenie jeszcze raz, ale tym razem przepuść światło lasera przez otrzymaną siatkę dyfrakcyjną.

Światło jako fala elektromagnetyczna

Fala elektromagnetyczna to rozchodzące się zmienne pola elektryczne i magnetyczne. Jej źródłem są drgające ładunki elektryczne (więcej będzie o tym w następnej klasie). Fale elektromagnetyczne to fale poprzeczne.. Mogą rozchodzić się zarówno w ośrodkach materialnych, jak i w próżni. W próżni mają prędkość ok. 300 000 km/s (tzw. prędkość światła, oznaczana literą c). To maksymalna prędkość przekazywania energii w przyrodzie.

Fale elektromagnetyczne mają różne własności, związane z ich częstotliwością. Z tego względu podzielono je na kilka zakresów: fale radiowe, mikrofae, podczerwień, światło, nadfiolet, promieniowanie rentgenowskie (X) oraz promieniowanie gamma (ryc. 12.3). Tylko światło odbieramy za pomocą oczu. Pozostałe zakresy fal elektromagnetycznych rejestrujemy za pomocą specjalistycznych urządzeń, takich jak radioteleskopy czy aparaty rentgenowskie.





Światło to fale elektromagnetyczne o długościach w przybliżeniu od 400 nm do 700 nm (precyzyjne granice przedziału są trudne do określenia ze względu na różną wrażliwość ludzkich oczu). Nanometr (nm) to jedna miliardowa metra ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), zatem długości fal świetlnych to nieco poniżej 1 mikrometra ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$). Z tego powodu dyfrakcja światła jest zauważalna wówczas, gdy światło przechodzi przez bardzo małe otwory. Z drugiej strony ilość światła przechodząca przez tak małe otwory jest znikoma, co utrudnia obserwacje. Nic więc dziwnego, że falowa natura światła długo była nieznana. Żeby wyraźnie zobaczyć interferencję światła, trzeba użyć przeszkody o szczelinach odległych od siebie o ułamki milimetra. Przy przejściu światła przez otwory o rozmiarach kilku milimetrów nie obserwuje się dyfrakcji, widzimy już wyraźną jedną wiązkę światła, nazywaną promieniem.

Każda długość fali (i jej częstotliwość) odpowiada innej barwie. Na przykład światło o długości fali 400 nm wywoła w oku (a właściwie w mózgu) wrażenie barwy fioletowej, a światło o długości 700 nm – barwy czerwonej. Za światłem fioletowym rozciąga się nadfiolet, a za czerwonym – podczerwień (ryc. 12.4).

Ryc. 12.4. Światło białe rozszczepione na wszystkie barwy składowe

s. 209

PRZYKŁAD 1.

Obliczmy częstotliwość światła zielonego o długości fali 550 nm.

Dane zapisujemy w jednostkach podstawowych:

$$\lambda = 550 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

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

Przekształcamy wzór (1) do postaci:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$f = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \approx 5,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

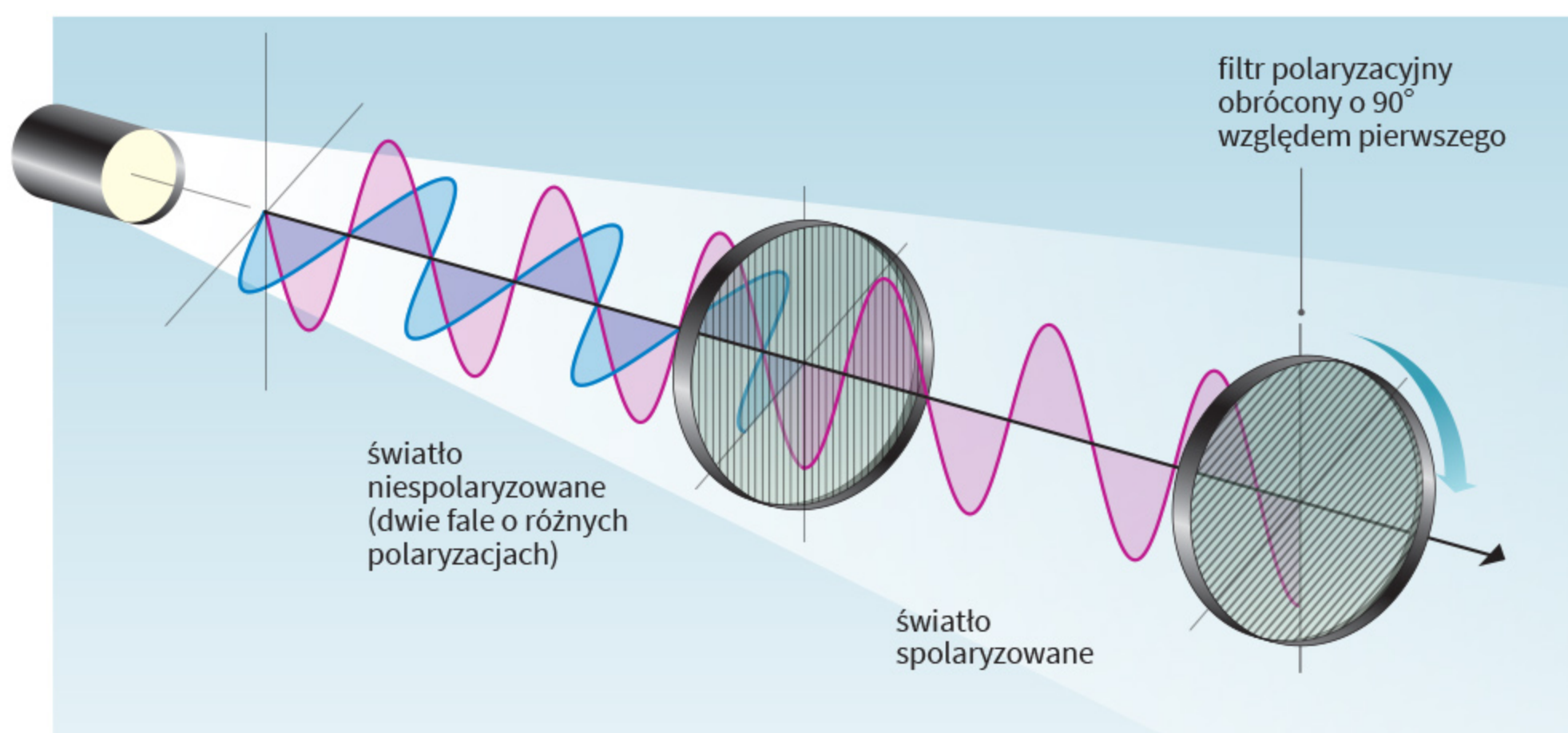
Otrzymaliśmy częstotliwość światła rzędu 10^{14} Hz , czyli sto bilionów herców. Tak szybkich drgań praktycznie nie da się bezpośrednio obserwować.

Polaryzacja światła

W wielu falach poprzecznych drgania mają różne kierunki, zawsze jednak prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Taką falę można wzbudzić na sznurze. Tego typu falę nazywamy **niespolaryzowaną**. Falę poprzeczną, w której kierunek drgań jest okre-

ślony (np. pionowy), nazywamy z kolei **spolaryzowaną**. Falę niespolaryzowaną możemy spolaryzować. Wystarczy przystawić do sznura dwie deseczki ustawione na przykład pionowo. Przez szczelinę przejdą tylko drgania pionowe i za deseczkami fala będzie już spolaryzowana pionowo.

Urządzenie do polaryzowania fali jest nazywane polaryzatorem. Co się stanie, gdy na drodze fali ustawimy drugi polaryzator, prostopadłe do pierwszego? Przepuści on tylko drgania poziome. Jednak w fali, która przeszła przez pierwszy polaryzator, drgań poziomych już nie ma, bo zostały wycięte przez pierwszy polaryzator. Wniosek jest oczywisty: dwa polaryzatory polaryzujące falę w kierunkach prostopadłych do siebie całkowicie wygaszają tę falę (ryc. 12.5).

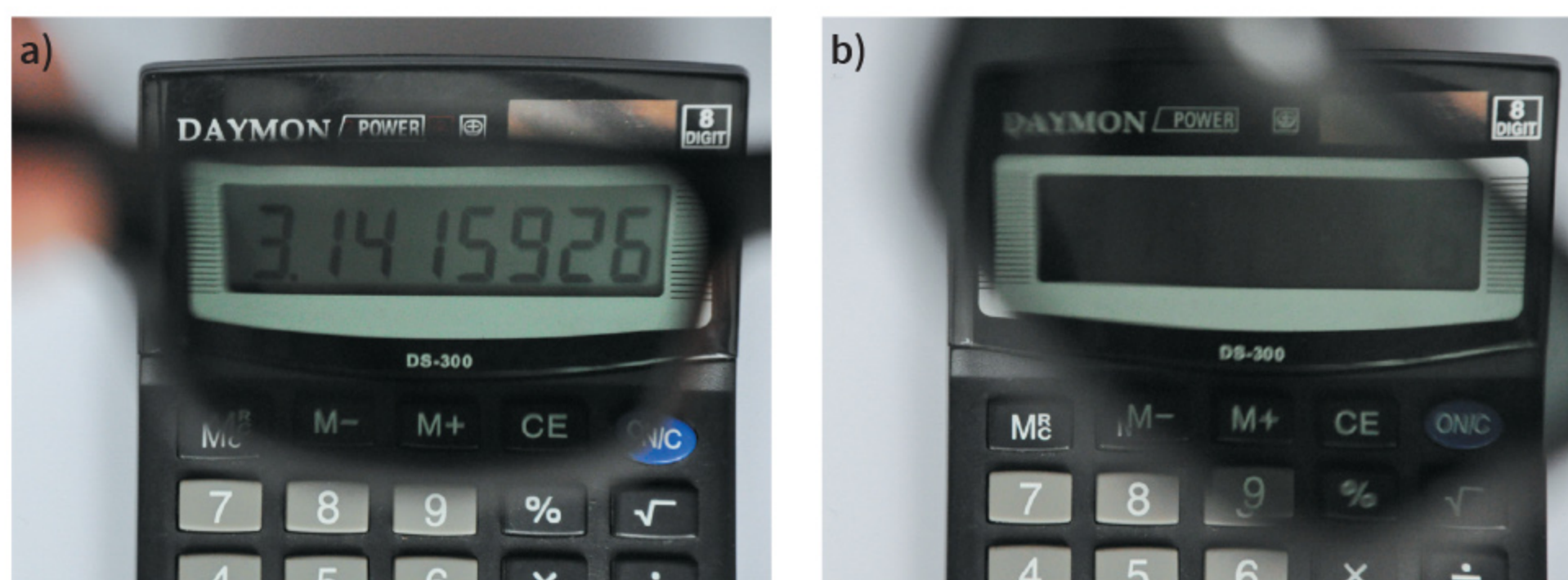


Ryc. 12.5. Światło niespolaryzowane można wygasić za pomocą dwóch odpowiednio ustawionych polaryzatorów. Rysunek schematyczny

Okazuje się, że **światło również można spolaryzować**. Istnieją substancje, które mają takie właściwości – najczęściej są to przezroczyste płytki z odpowiedniego tworzywa sztucznego. Nasze oczy nie odróżniają światła spolaryzowanego od niespolaryzowanego, trzeba więc użyć polaryzatorów, by sprawdzić, czy jest ono spolaryzowane. Gdy ustawimy dwa polaryzatory tak, że kierunki ich polaryzacji będą prostopadłe do siebie, światło zostanie całkowicie wygaszone (ryc. 12.6 i 12.7).



Ryc. 12.6. Niektóre okulary przeciwsłoneczne mają szkła wykonane z polaryzatora, który przepuszcza tylko światło o określonej polaryzacji. Przez skrzyżowane okulary polaryzacyjne światło nie przechodzi



Ryc. 12.7. Ekran kalkulatora widziany przez polaryzacyjne okulary przeciwsłoneczne (a) i widok ekranu po obróceniu okularów o pewien kąt (b)

DOŚWIADCZENIE 2.

Do doświadczenia będą potrzebne okulary przeciwsłoneczne polaryzacyjne lub inny polaryzator (możesz go wymontować z niepotrzebnego już wyświetlacza ciekłokrystalicznego – tzw. LCD – ze starego kalkulatora czy zegarka).

Popatrz przez polaryzator na:

- a) niebieskie niebo w różnych odległościach od Słońca;
- b) światło odbite od powierzchni wody pod różnymi kątami;
- c) wyświetlacz ciekłokrystaliczny (tzw. LCD) z kalkulatora lub zegarka.

W każdym przypadku obracaj polaryzator tak, by sprawdzić, w jakim położeniu wygaszenie światła jest maksymalne.

Światło rozproszone przez powietrze jest częściowo spolaryzowane. Światło odbite od powierzchni wody również jest częściowo spolaryzowane. Dlatego właśnie okulary polaryzacyjne mogą zdecydowanie osłabić światło oślepiające nas w słoneczny dzień.



Ryc. 12.8. W niektórych sytuacjach kolory powstają wyniku interferencji światła na bardzo cienkich warstwach.

PODSUMOWANIE

- ▶ **Światło** jest falą elektromagnetyczną o długościach fal w zakresie od 400 nm do 700 nm.
- ▶ Światło o konkretnej częstotliwości odbieramy jako wrażenie jednej barwy.
- ▶ **Światło białe** to mieszanina różnych barw, czyli fal o różnych częstotliwościach.
- ▶ **Fala spolaryzowana** to fala poprzeczna o drganiach zachodzących tylko w określonym kierunku.
- ▶ Światło może być spolaryzowane.

PYTANIA I ZADANIA

1. Czy podczerwień to fale o długości mniejszej od długości nadfioletu?
2. Przeciwsłoneczne okulary polaryzacyjne skutecznie osłabiają światło słoneczne odbite od powierzchni wody lub śniegu. Czy gdy założymy je "do góry nogami" będą również skutecznie osłabiać odbicia? Uzasadnij odpowiedź.
3. Oszacuj, jakie byłyby odległości między kolejnymi węzłami stojącej fali świetlnej. Wskazówka: przyjmij określoną długość fali świetlnej.
4. Oblicz częstotliwość światła o długościach fal 400 nm i 700 nm.
5. Z jakich faktów podanych w tym rozdziale możesz wywnioskować, że światło jest falą poprzeczną?



13. Odbicie światła

- Polaryzacja światła przy odbiciu
- Prawo odbicia światła
- Obrazy w zwierciadłach płaskich

→ **Przypomnij sobie**, czym jest światło.

Zjawisko odbicia światła obserwujemy na co dzień. Widzimy swój obraz w lustrze, refleksy na wypolerowanej podłodze, możemy zauważyć odbicia w szybie lub na powierzchni wody. Dzięki zjawisku odbicia możemy także skierować światło w pożądaną przez nas stronę. W tych zjawiskach zwykle nie obserwujemy efektów falowych, dlatego posługujemy się pojęciami promień lub wiązka światła.

Powierzchnie odbijające światło

Odbicie światła zachodzi na granicy dwóch ośrodków. Gdy promień światła pada na powierzchnię gładką, wypolerowaną, następuje odbicie, w którym wiązka światła kierowana jest w jednym kierunku. Mówimy wtedy o odbiciu zwierciadlanym. Natomiast gdy powierzchnia, na którą pada światło, jest choć w niewielkim stopniu chropowata, wiązka światła po odbiciu staje się w większym lub mniejszym stopniu rozmyta, rozproszona.

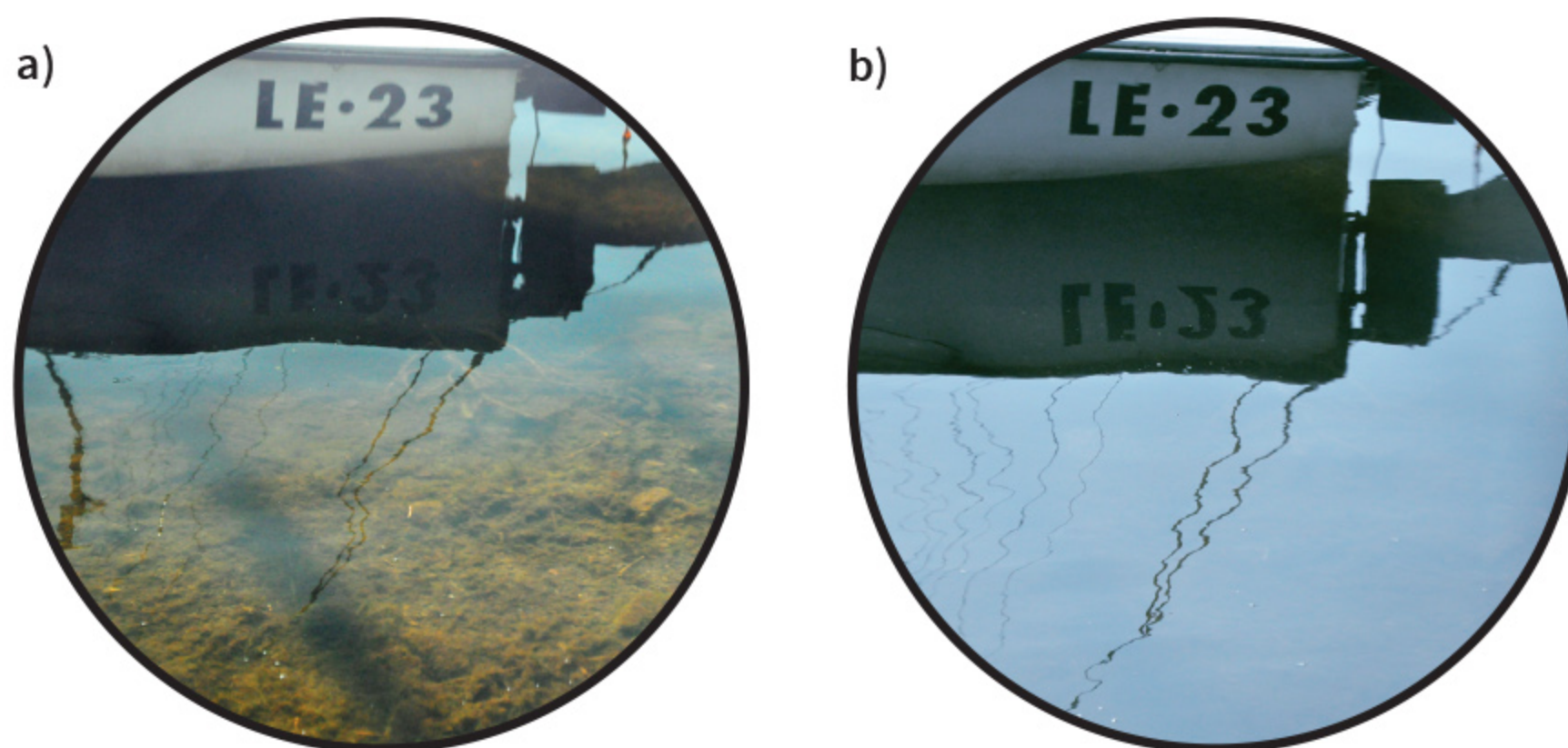
Powierzchnie metalowe odbijają prawie całe padające na nie światło, dlatego zwierciadła (czyli lustra) zwykle wykonuje się z cienkiej warstwy srebra, położonej na odpowiednio uformowanym podłożu, najczęściej szklanym.



Ryc. 13.1. W dolnej części szklanki jest gliceryna, a nad nią woda. Prędkość światła w szkle i w glicerynie jest taka sama, dlatego nie widzimy szklanej rurki w glicerynie

Odbicie światła zachodzi również na granicy dwóch materiałów przezroczystych, takich jak powietrze i woda. W tym przypadku tylko część światła się odbija, a reszta przechodzi do drugiego ośrodka. Ilość światła odbitego zależy od kąta, pod jakim wiązka światła pada na powierzchnię graniczną. Gdy promień jest prostopadły do powierzchni materiału przezroczystego, tylko niewielka część światła ulega odbiciu. Natomiast gdy promień jest niemal równoległy do powierzchni, światło odbija się prawie w całości. Jeżeli w obydwu materiałach światło rozchodzi się z tą samą prędkością, na ich granicy nie nastąpi odbicie, lecz światło będzie biegło dalej po linii prostej. Wówczas nie będziemy widzieć granicy ośrodków (ryc. 13.1).

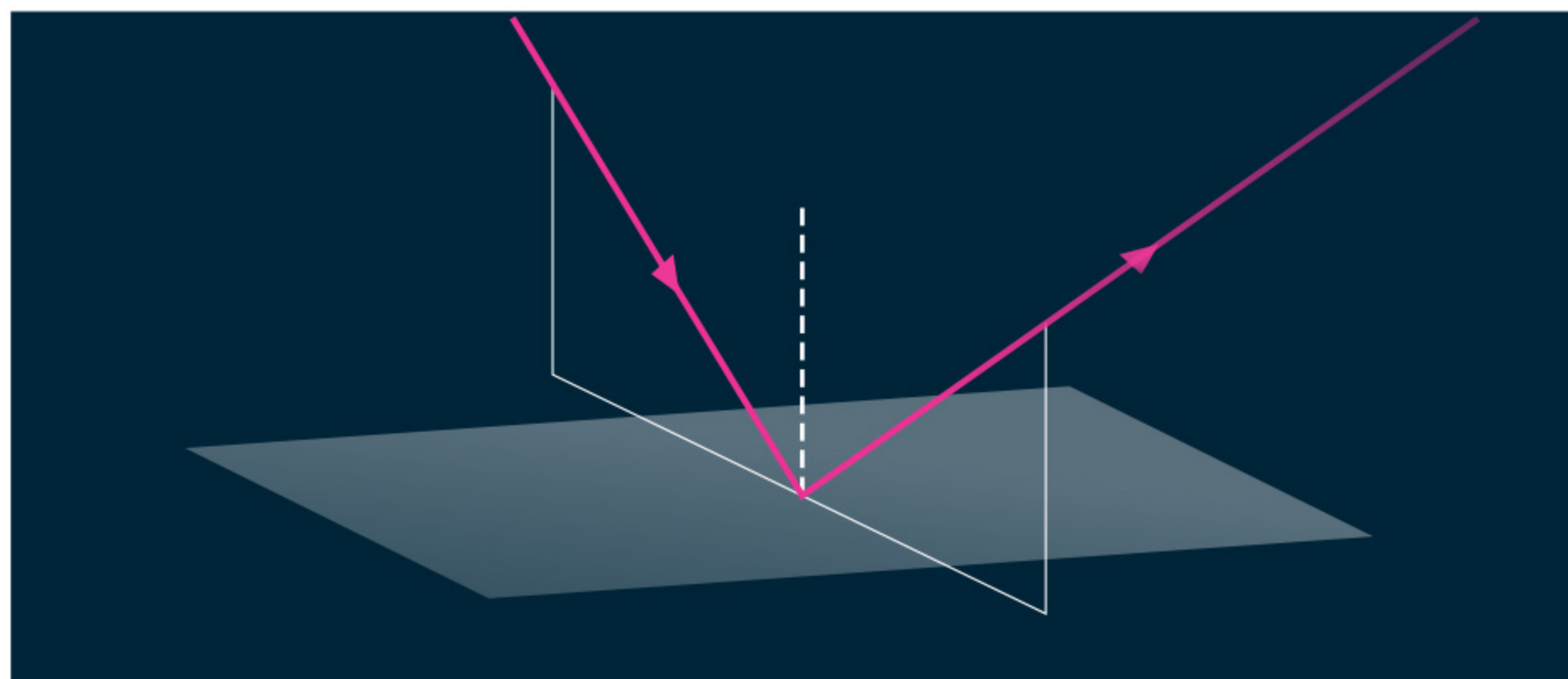
Światło odbite od materiałów przezroczystych **jest częściowo spolaryzowane**. Właśnie dlatego patrzenie na powierzchnię wody lub szkła przez odpowiednio ustawione polaryzatory powoduje, że duża część światła odbitego zostaje wygaszona. Okulary ze szkłami polaryzacyjnymi ułatwiają uprawianie sportów wodnych lub prowadzenie pojazdów (ryc. 13.2). Z kolei za pomocą filtrów polaryzacyjnych nakładanych na obiektyw aparatu fotograficznego można wykonać zdjęcia przedmiotów znajdujących się za szybą, gdy przeszkadzają nam refleksy pochodzące od oświetlenia.



Ryc. 13.2. Powierzchnia wody widziana w słoneczny dzień przez okulary polaryzacyjne. Na zdjęciu (a) okulary ustawione są „normalnie” i osłabiają częściowo spolaryzowane światło odbite od wody. Na zdjęciu (b) okulary przekręcone są o 90° . Widzimy niebo odbite od powierzchni wody

Prawo odbicia światła

Światło odbija się pod takim samym kątem, pod jakim pada na powierzchnię odbijającą. Promień padający, promień odbity i prosta prostopadła do powierzchni granicznej zaznaczona w punkcie padania leżą w jednej płaszczyźnie (ryc. 13.3).



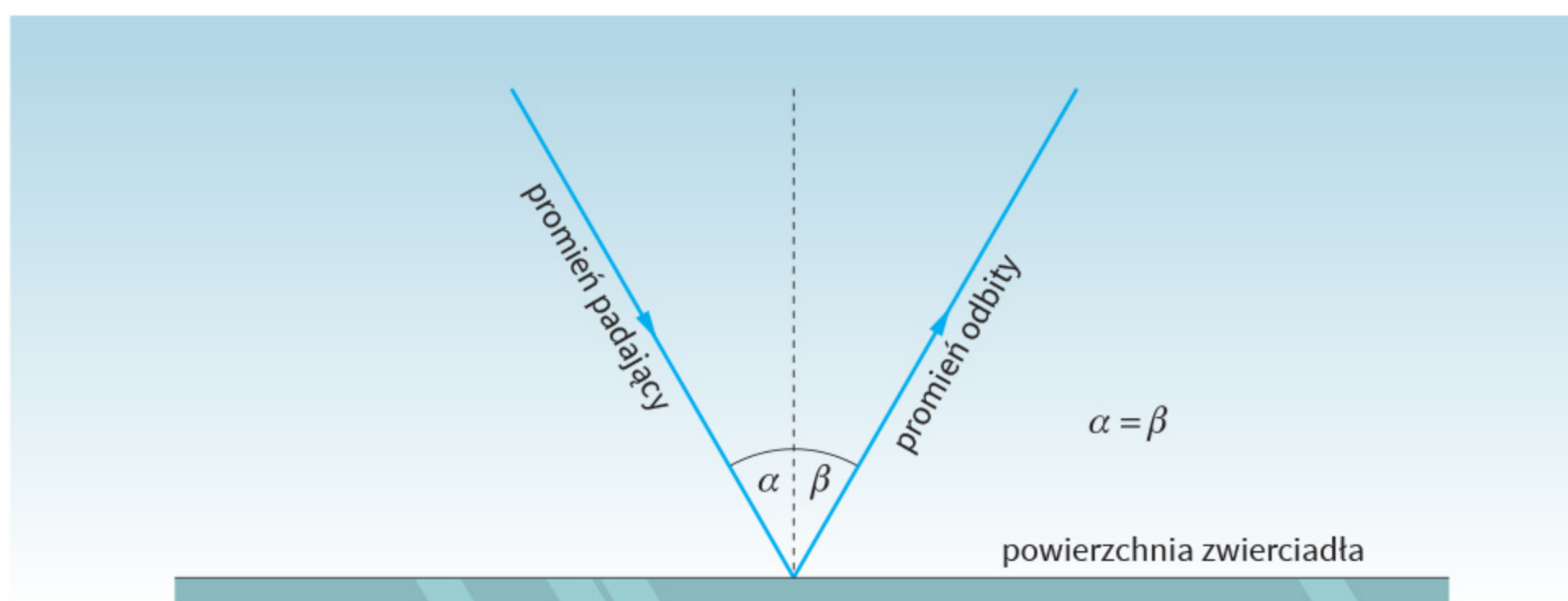
Ryc. 13.3. Płaszczyzna wyznaczona przez promień padający i promień odbity jest prostopadła do płaszczyzny zwierciadła

W optyce kąty padania, odbicia i załamania definiuje się jako kąty między promieniem światła a prostą prostopadłą do powierzchni, na którą pada światło.

Prawo odbicia światła

Kąt odbicia jest równy kątowi padania. Promień padający i promień odbity leżą w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny zwierciadła.

Ponieważ odbicie światła zachodzi w płaszczyźnie prostopadłej do zwierciadła, bieg promieni światła możemy przedstawiać na rysunkach płaskich, na których powierzchnia zwierciadła jest ustawiona prostopadle do płaszczyzny rysunku (ryc. 13.4).



Ryc. 13.4. Promień światła padający i promień odbity od powierzchni zwierciadła. Kąt odbicia β jest równy kątowi padania α

DOŚWIADCZENIE 1.

Przymocuj ołówek (np. za pomocą plasteliny) prostopadle do powierzchni lusterka. Skieruj wiązkę światła latarki na lusterko, a następnie ustaw lusterko tak, aby światło po odbiciu od niego zmieniło kierunek w przybliżeniu o 90° . Oszacuj kąt padania i kąt odbicia. Następnie kilkakrotnie zmień ustawienie lusterka w stosunku do padającego światła i zaobserwuj, czy za każdym razem światło i ołówek leżą w jednej płaszczyźnie.

Zwierciadła płaskie

Obraz widziany w zwierciadle płaskim nie istnieje w rzeczywistości po jego drugiej stronie – to nasz umysł tworzy takie wyobrażenie. Tego typu obrazy w optyce nazywamy **pozornymi**.

DOŚWIADCZENIE 2.

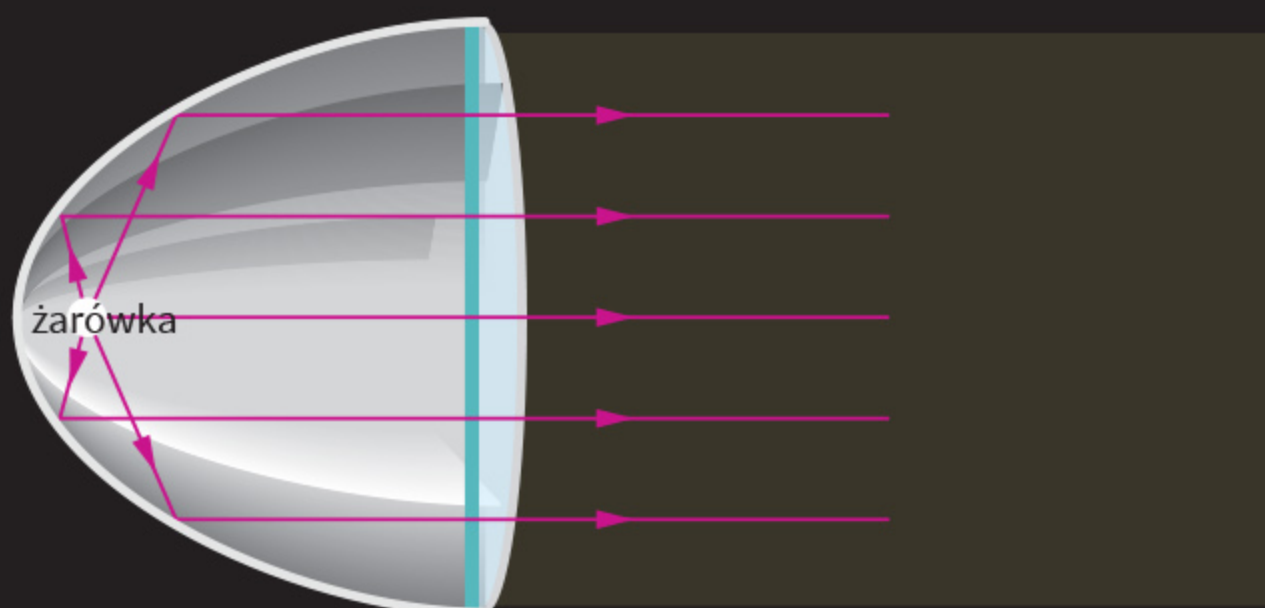
Przygotuj lustro na tyle duże, aby widzieć się w nim mniej więcej do połowy. Ustaw lustro na takiej wysokości, aby widzieć czubek swojej głowy na jego górnej krawędzi. Sprawdź, czy w miarę oddalania się od lustra widzisz coraz większą część swojego ciała. Wyjaśnij swoje obserwacje za pomocą odpowiedniego rysunku.



WARTO WIEDZIEĆ

Reflektor

Prawo odbicia światła pozwala projektować różne układy optyczne, które będą kierować wiązkę światła w określoną stronę. Jednym z takich układów jest reflektor samochodowy. W najprostszej wersji składa się on z żarówki, za którą umieszczone jest zwierciadło o odpowiedniej krzywiznie.



Żarówka emituje światło we wszystkie strony. Promienie padające na zwierciadło są odbijane w jedną stronę, tworzą więc równoległą wiązkę światła. Dzięki temu reflektor dobrze oświetla drogę nawet kilkaset metrów przed samochodem. Warto zwrócić uwagę na fakt, że gdy wiązka światła z reflektora jest skierowana w stronę naszych oczu, jesteśmy tak silnie oślepiani, jakby nasze oko znajdowało się w odległości zaledwie kilku centymetrów od żarówki. Dlatego podczas prowadzenia pojazdów tak ważna jest zmiana świateł drogowych na światła mijania, gdy tylko zauważymy pojazd jadący z naprzeciwka. Światła mijania kierują wiązkę światła nieco w dół, dzięki czemu nie wpada ona bezpośrednio do oczu innych kierowców.

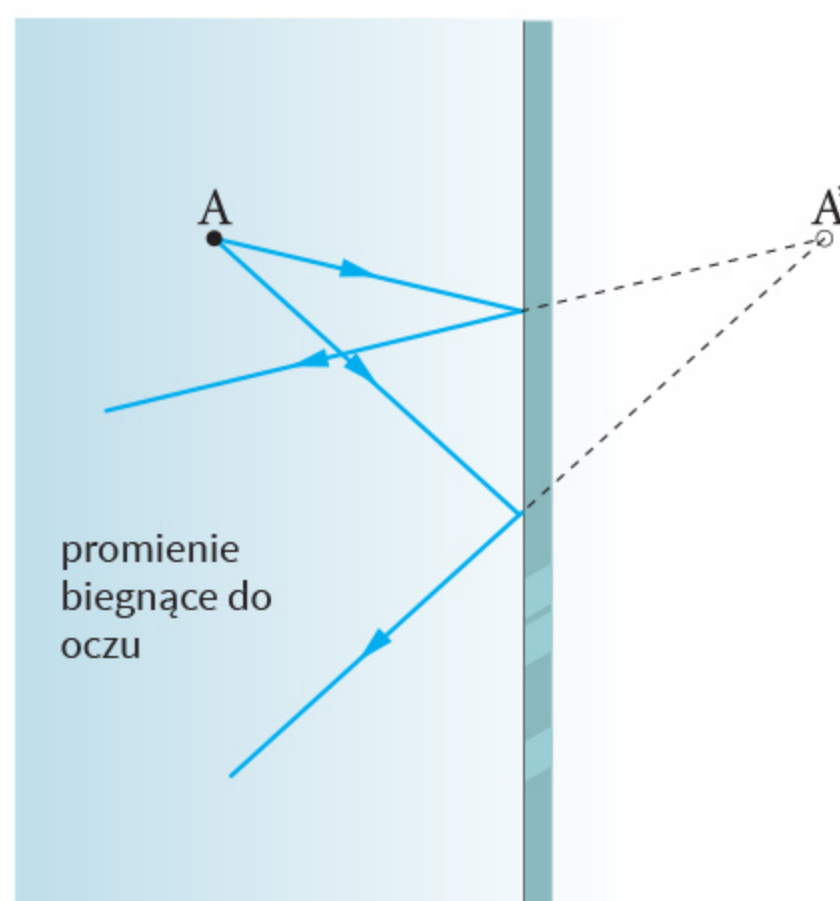
Gdy do naszych oczu wpada światło, nerwy wzrokowe przekazują do mózgu sygnały, które są tam odpowiednio interpretowane. Na ich podstawie mózg buduje obraz otoczenia, w jakim się znajdujemy. Tworzy obraz otaczającej nas przestrzeni, przy założeniu że światło rozchodzi się po liniach prostych od obserwowanego obiektu do naszych oczu. Gdy światło nie biegnie po liniach prostych, tworzony przez mózg obraz otoczenia (czyli obiektów widzianych w przestrzeni) nie jest zgodny z ich



Ryc. 13.5. Osoba i jej obraz widziany w zwierciadle płaskim

rzeczywistym położeniem. Mówimy wtedy o obrazach pozornych. Taki właśnie jest obraz widziany w zwierciadle. Samego zwierciadła nie widzimy. Zauważamy, że jest ono umieszczone w danym miejscu dopiero w momencie, gdy skojarzymy, że w pobliżu widzimy te same obiekty co w zwierciadle.

Jak skonstruować obraz dowolnego punktu w zwierciadle płaskim? Przeanalizujmy rycinę 13.6. Dwa promienie poprowadzone od punktu A w kierunku zwierciadła odbijają się od niego zgodnie z prawem odbicia. Gdy poprowadzimy przedłużenia tych odbitych promieni poza powierzchnię zwierciadła, przetną się one w punkcie A'. I to właśnie jest obraz pozorny punktu A.



Ryc. 13.6. Konstrukcja obrazu punktu w zwierciadle płaskim. Obraz powstaje w miejscu przecięcia się przedłużeń promieni odbitych od zwierciadła

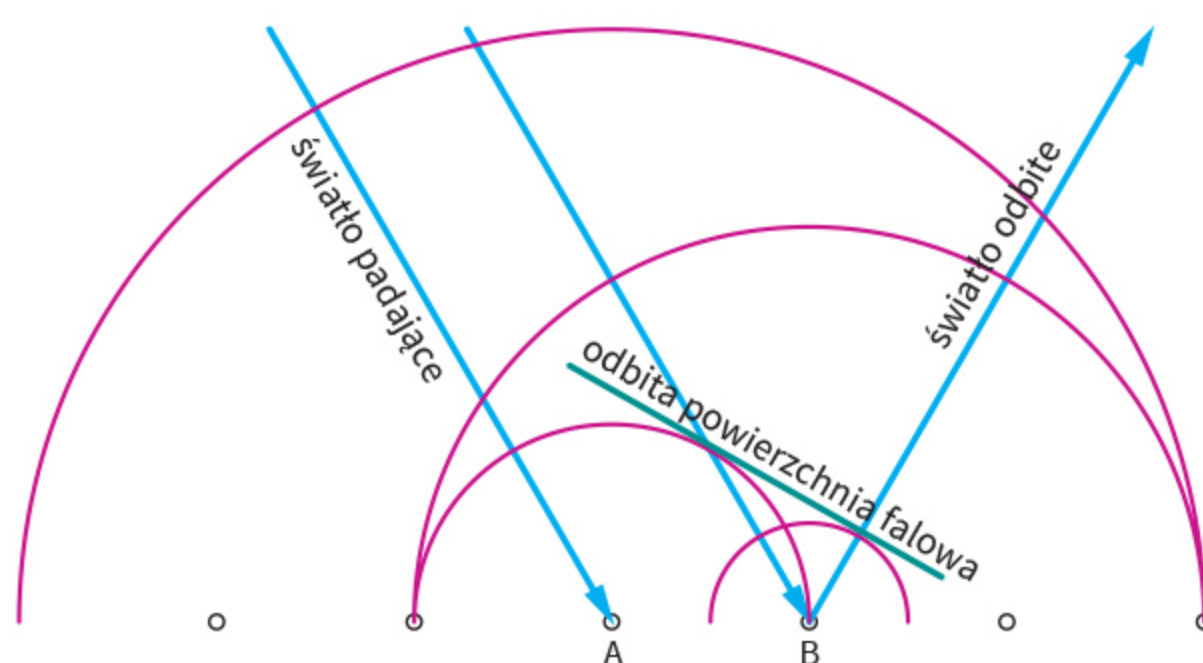
Z prawa odbicia wynika, że **przedmiot i jego obraz** widziane w zwierciadle płaskim są **symetryczne** względem powierzchni zwierciadła.



WARTO WIEDZIEĆ

Odbicie a interferencja

Gdy światło pada na powierzchnię ciała stałego lub cieczy, cząsteczki leżące na powierzchni rozpraszają to światło. Od każdej cząsteczki rozchodzi się fala kulista (ryc.).



Jeśli cząsteczki są ułożone regularnie w jednej płaszczyźnie (jak na wypolerowanej powierzchni ciała krystalicznego), tworzą odbiciową siatkę dyfrakcyjną. Gdy na powierzchnię odbijającą pada fala płaska, do cząsteczki A powierzchnie falowe dochodzą wcześniej niż do B, tak jak na rysunku. Od cząsteczek tych rozchodzą się fale kuliste, które nakładają się na siebie (porównaj z ryc. 11.2). Odległość między atomami jest we wszystkich ciałach mniejsza od długości fali światła, zatem utworzy się tylko jedna linia wzmocnień. Zjawisko to nazywamy odbiciem fali. Promień odbity tworzy ten sam kąt z powierzchnią co promień padający.

PODSUMOWANIE

- ▶ **Prawo odbicia:** kąt odbicia jest równy kątowi padania. Promień padający i promień odbity leżą w płaszczyźnie prostopadłej do zwierciadła.
- ▶ Światło odbite od przezroczystych materiałów jest częściowo **spolaryzowane**.
- ▶ Gdy patrzymy w zwierciadło płaskie, widzimy **obrazy pozorne** przedmiotów. Przedmiot i obraz są symetryczne względem powierzchni zwierciadła.

PYTANIA I ZADANIA

1. W sklepie jubilerskim biżuteria najczęściej prezentowana jest w gablocie za szybą. Kiedy oświetlenie sklepu będzie nam mniej przeszkadzać przy oglądaniu biżuterii: gdy patrzymy prostopadle do szyby czy pod pewnym kątem? Uzasadnij odpowiedź.
2. Promień lasera pada prostopadle na powierzchnię zwierciadła. O jaki kąt należy przekręcić zwierciadło, aby promień padający tworzył z promieniem odbitym kąt 130° ? Przedstaw sytuację na rysunku.
3. Płetwonurek patrzy od strony wody na jej powierzchnię (ryc.). Przerysuj rysunek do zeszytu i narysuj obraz wodorostów widziany przez płetwonurka.



4. Przed ukośnie ustawionym lustrem trzymamy poziomo ołówek. Narysuj konstrukcję powstawania obrazu ołówka w lustrze. Na rysunku ołówek przedstaw jako odcinek. Zaznacz oba końce ołówka.
5. Promienie słoneczne padają pod kątem 30° do poziomu na kałużę i oślepiają stojącą w oknie Justynę. Kałuża znajduje się 8 m od ściany domu. Na jakiej wysokości są oczy Justyny?



14. Załamanie światła

- Prawo załamania światła
- Efekty optyczne związane z załamaniem światła

→ **Przypomnij sobie**, czym są światło i zjawisko odbicia światła, a także jak się konstruuje obrazy pozorne.



Chyba każdy z nas widział kiedyś jakieś efekty optyczne związane z załamaniem światła. Przykładem może być ołówek zanurzony w wodzie. Gdy patrzymy na niego z boku albo przez powierzchnię wody, wygląda, jakby był złamany. W tym rozdziale wyjaśnimy dokładniej przyczyny powstawania tego typu obrazów.

Ryc. 14.1. Zjawisko optyczne związane z załamaniem światła przy przejściu z wody do powietrza

Załamanie światła

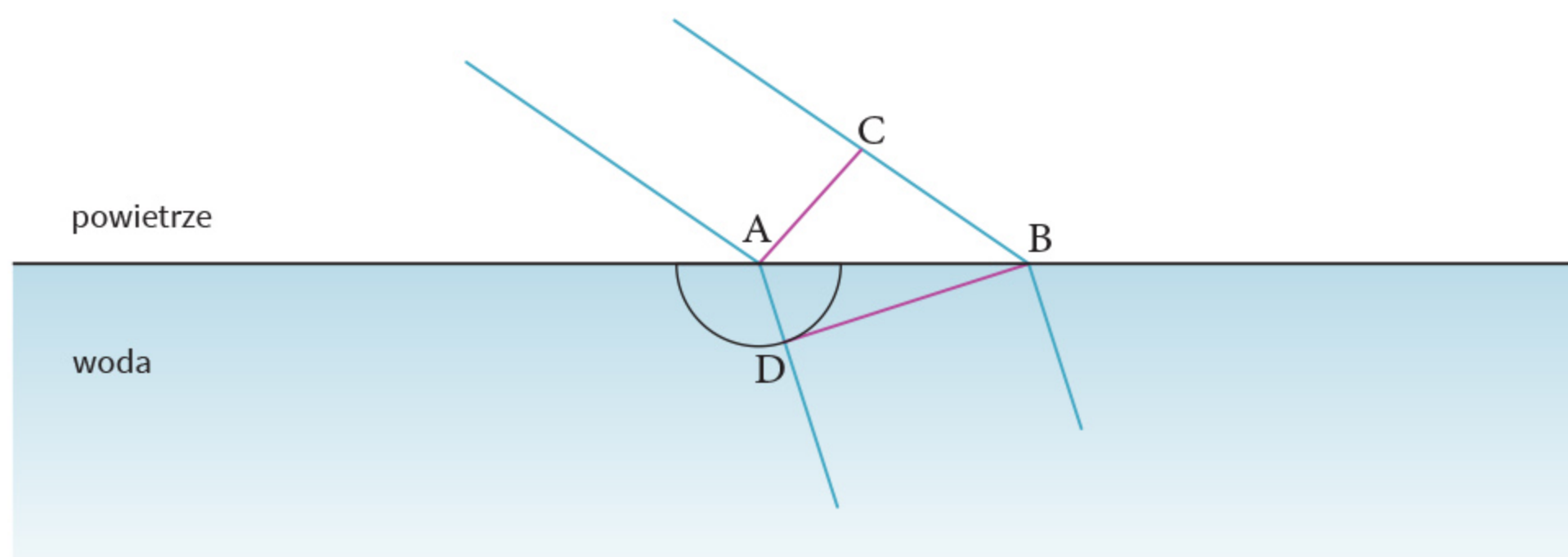
W ośrodku jednorodnym fale rozchodzą się ze stałą prędkością. Prędkość fali zależy od własności ośrodka. Światło jest falą i jego prędkość jest różna w różnych ośrodkach. Gdy światło przechodzi np. z powietrza do wody, na granicy tych ośrodków zmienia się jego prędkość (w wodzie jest mniejsza). Prędkość fali v związana jest z długością fali λ i częstotliwością f wzorem:

$$v = \lambda f$$

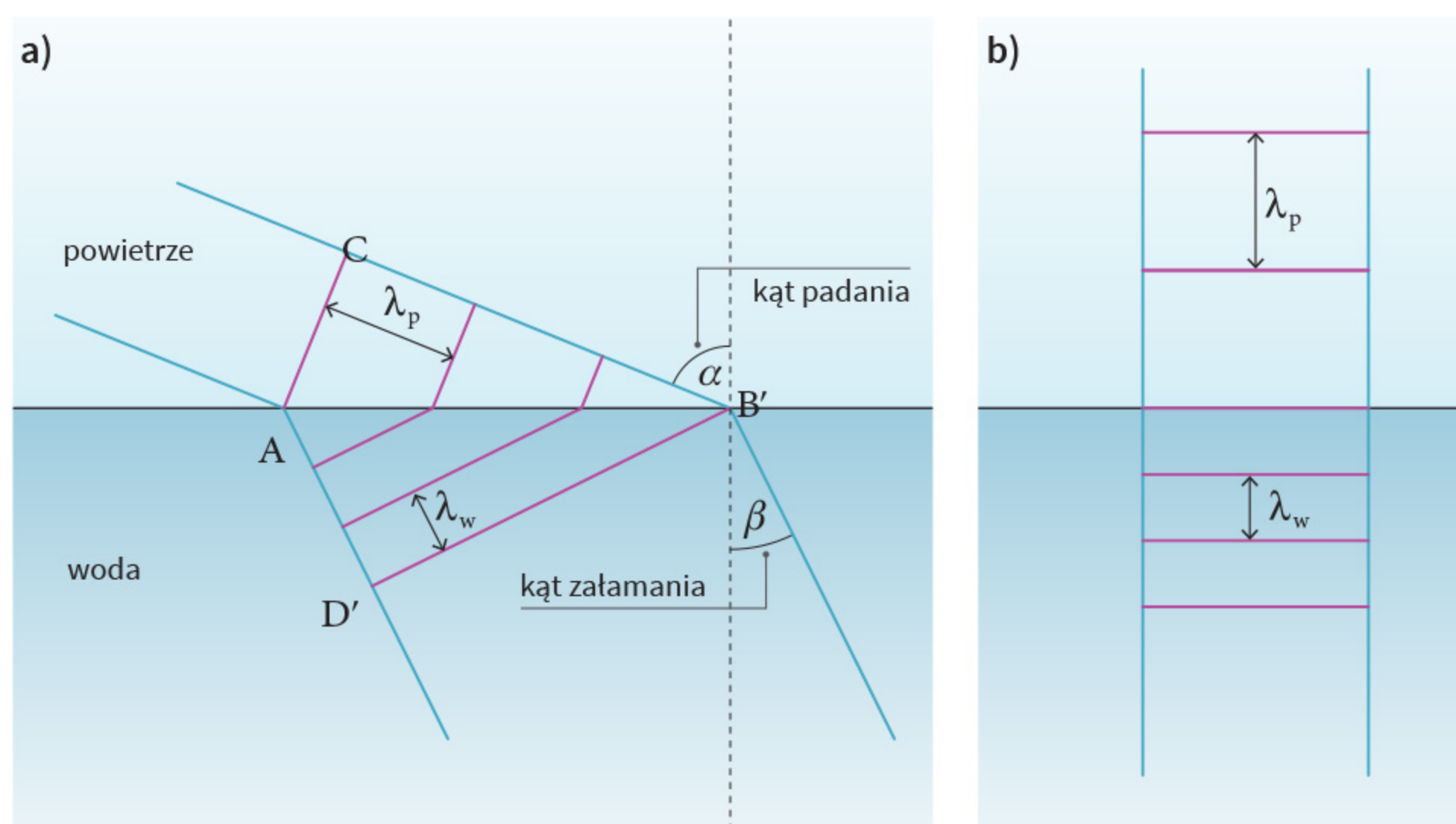
Z zależności tej wynika, że długość fali maleje tyle razy, ile razy maleje prędkość fali (częstotliwość fali nie ulega zmianie, gdyż jest to częstotliwość drgań źródła).

Spójrzmy na rycinę 14.2, na której odcinek AC to linia grzbietów, a odcinek CB – długość fali w powietrzu. Gdy fala przebywa w powietrzu drogę CB, w wodzie przemieszcza się

na odległość AD (długość fali w wodzie). Gdy narysujemy z punktu A okrąg o promieniu AD, to styczna do tego okręgu narysowana z punktu B wyznacza linię grzbietów w wodzie (odcinek BD).



Ryc. 14.2. Konstrukcja kierunku biegu fali na granicy dwóch ośrodków. Opis w tekście głównym

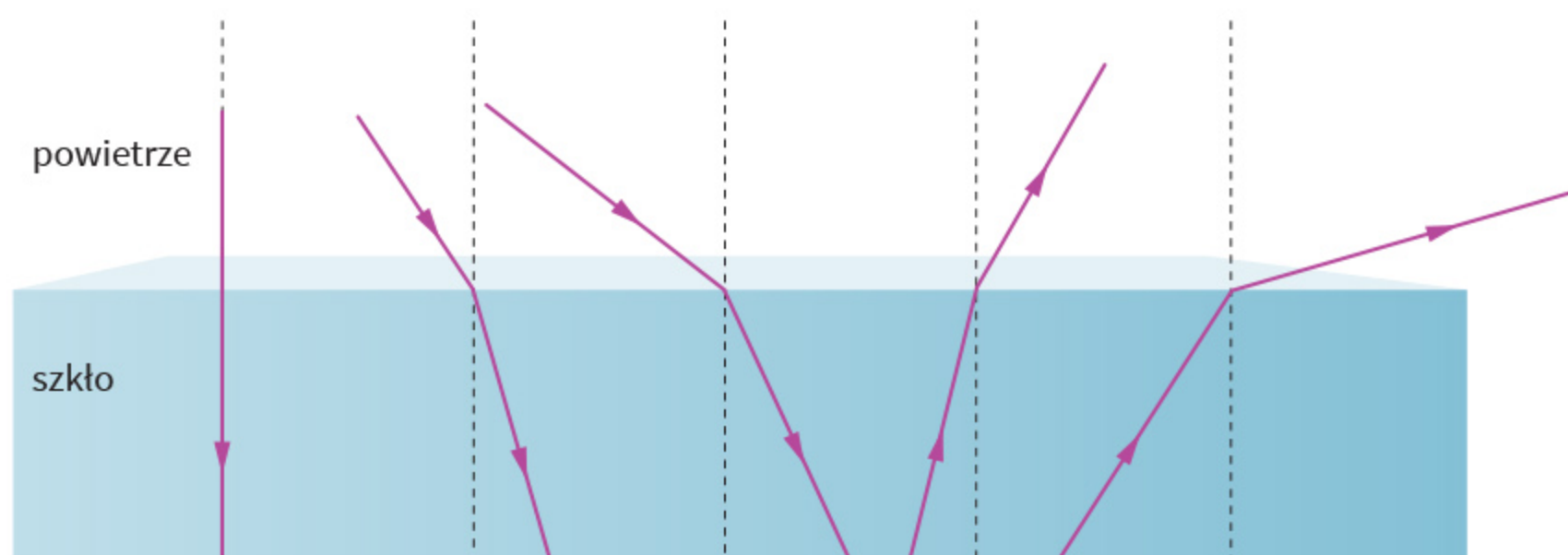


Ryc. 14.3. Promień światła przechodzący z powietrza do wody. Różowe równoległe odcinki to kolejne grzbiety fali, niebieskie linie wskazują kierunek rozchodzenia się fali

Przejęcie promienia światła przez granicę powietrza i wody przedstawiono schematycznie na rycinie 14.3. Ze względu na mniejszą prędkość światła w wodzie odległość między kolejnymi powierzchniami falowymi w wodzie jest mniejsza niż w powietrzu. Gdy kąt padania światła jest różny od 0° , powierzchnie falowe mają w wodzie inny kierunek niż w powietrzu (ryc. 14.3a). Oznacza to zmianę kierunku rozchodzenia się światła. Gdy kąt padania jest równy 0° (promień prostopadły do powierzchni), powierzchnie falowe w powietrzu są równoległe do powierzchni falowych w wodzie, więc promień się nie załamuje (ryc. 14.3b).

Załamanie światła polega na zmianie kierunku rozchodzenia się światła przy przejściu z jednego ośrodka do drugiego.

Okazuje się, że im **większy jest kąt padania**, tym bardziej promień światła zmienia kierunek, **czyli tym silniej się załamuje**. Gdy na granicy ośrodków prędkość światła maleje, kąt załamania (kąt między promieniem światła w drugim ośrodku i prostopadłą do powierzchni) jest mniejszy od kąta padania. Natomiast gdy prędkość światła rośnie, kąt załamania jest większy od kąta padania (ryc. 14.4).



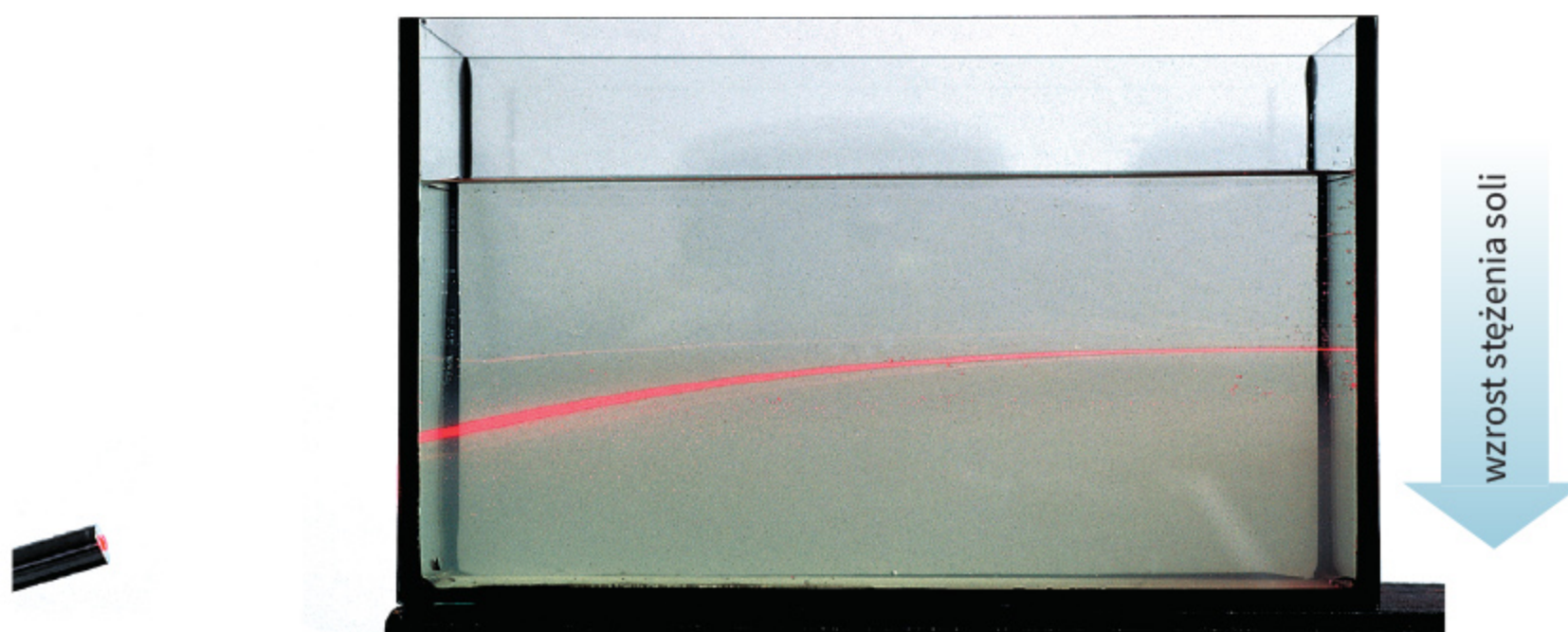
Ryc. 14.4. Przejście światła z powietrza do szkła i ze szkła do powietrza. Bez względu na kierunek biegu promieni kąt w powietrzu jest zawsze większy niż w szkło (mierzony do prostopadłej) z uwagi na większą prędkość światła w powietrzu niż w szkło



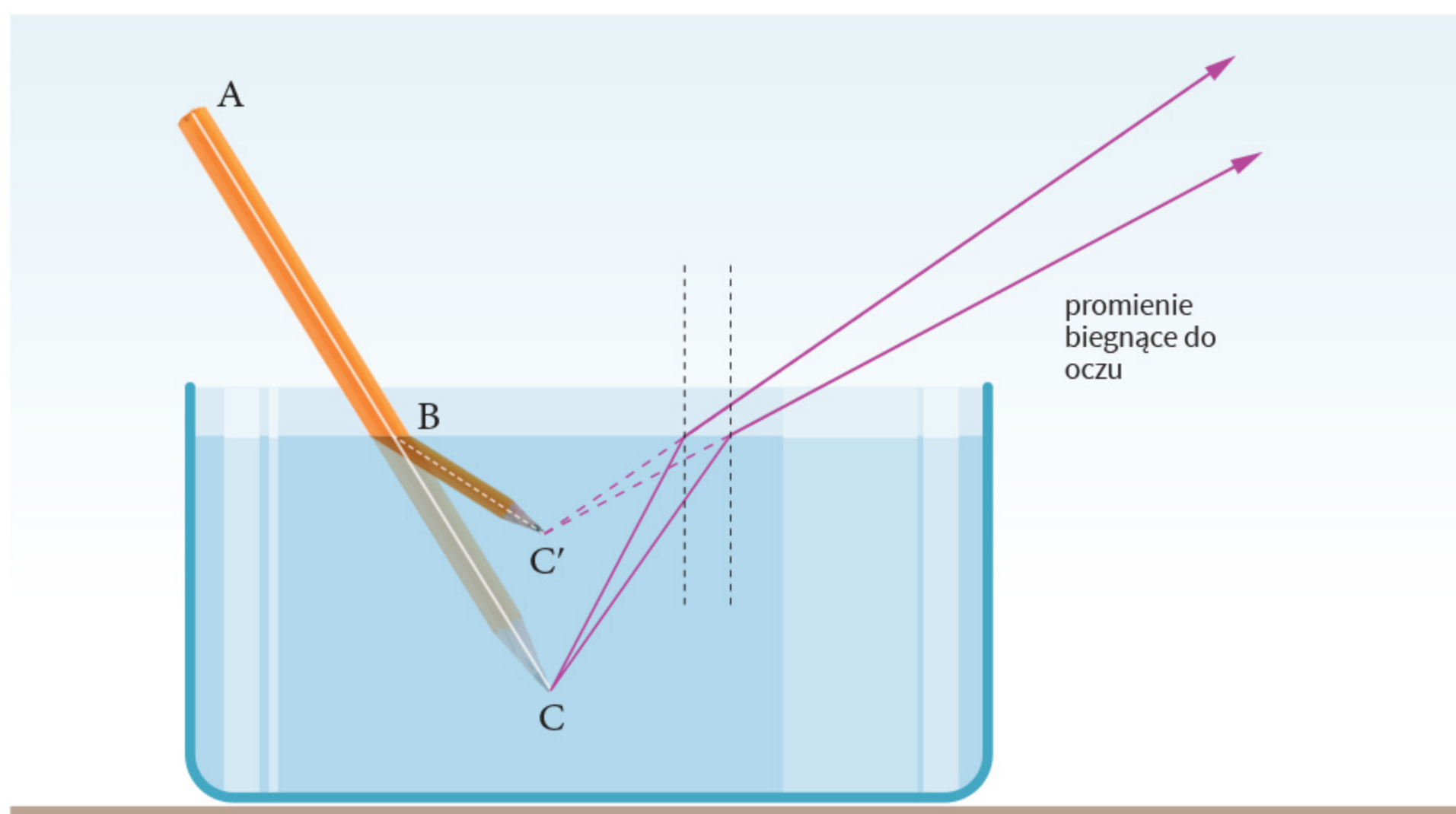
WARTO WIEDZIEĆ

Światło w ośrodku niejednorodnym

Gdy własności fizyczne ośrodka zmieniają się w sposób ciągły (np. rośnie gęstość), może się zdarzyć, że prędkość światła też będzie się zmieniać, na przykład światło będzie zwalniać. W takiej sytuacji promień światła będzie skręcać w stronę, gdzie jego prędkość jest mniejsza. Tak czasem dzieje się na przykład w atmosferze. Gdy w powietrzu są warstwy o różnej temperaturze i gęstości, światło biegnie po torach zakrzywionych. W słonej wodzie, w której stężenie soli zmienia się wraz z głębokością, światło również biegnie po zakrzywionym torze (ryc.).



Jak powstaje obraz przedstawiony na rycinie 14.1? Na rycinie 14.5 przedstawiono schematycznie ołówek. Światło z punktów A i B biegnie do naszych oczu w powietrzu, więc tę część ołówka widzimy bez zmian. Natomiast światło wychodzące z punktu C mija granicę woda–powietrze i zmienia swój kierunek. Gdy promień światła wychodzący z tego punktu wpadną do naszych oczu, nasz mózg uzna, że punkt C jest położony w miejscu, w którym przecinają się przedłużenia promieni wpadających do oczu, czyli w punkcie C' . Z tego powodu widzimy ołówek zgięty w miejscu przecięcia z powierzchnią wody.

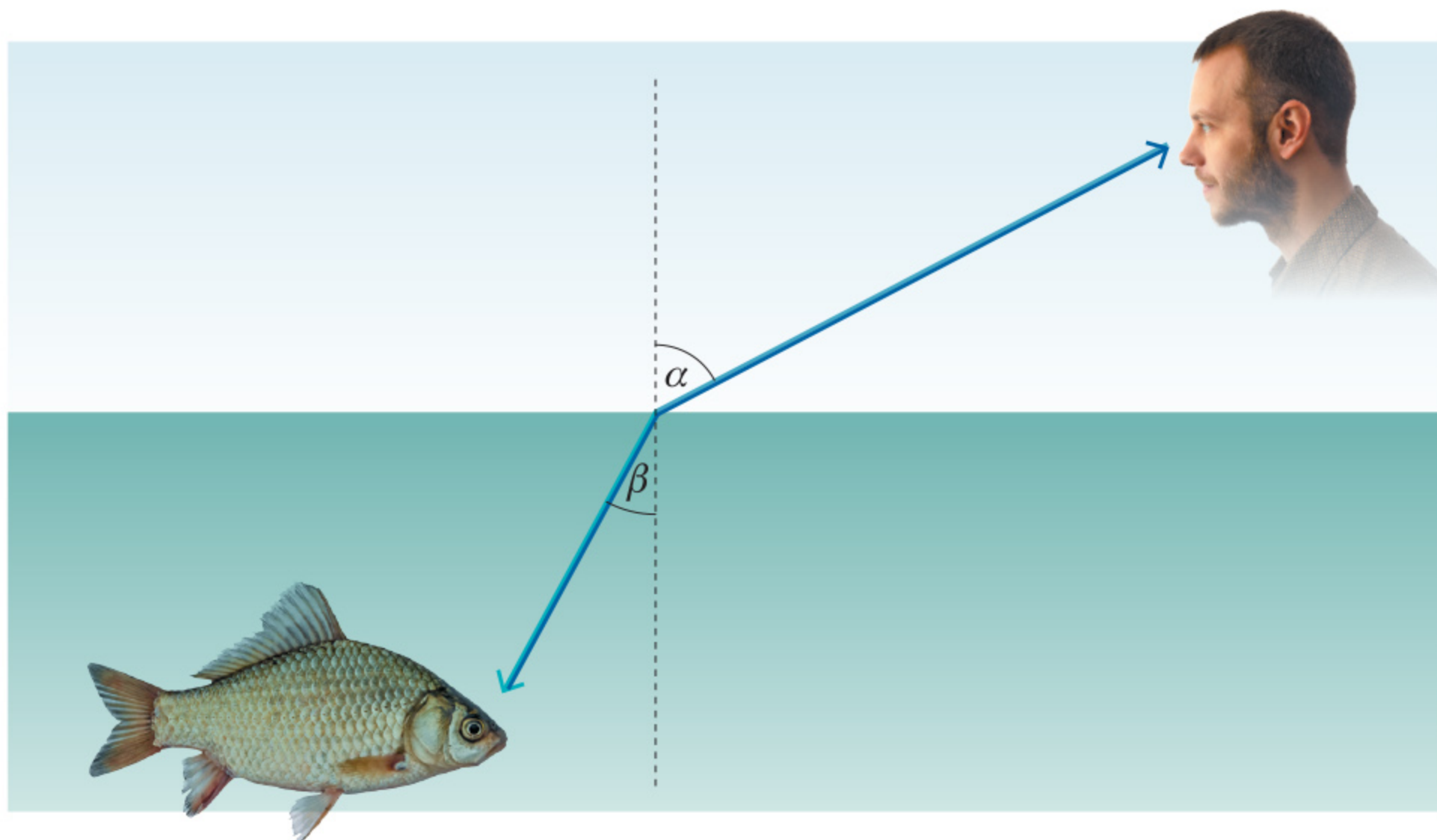


Ryc. 14.5. Konstrukcja powstawania obrazu ołówka częściowo zanurzonego w wodzie

Jak wynika z konstrukcji na rycinie 14.5, obiekty znajdujące się pod wodą (tu punkt C) widziane z nad jej powierzchnią wydają się położone płycej, niż są w rzeczywistości. Jeśli chcemy oszacować głębokość jeziora lub basenu, powinniśmy brać to pod uwagę (ryc. 14.6).



Ryc. 14.6. W wyniku załamania światła basen wydaje się płytszy, niż jest w rzeczywistości. Gdy stoimy w wodzie, nasze nogi wyglądają na krótsze



Ryc. 14.7. Bieg światła jest odwracalny. Nieważne, czy światło biegnie od oczu ryby do naszych czy odwrotnie – biegnie po tym samym torze

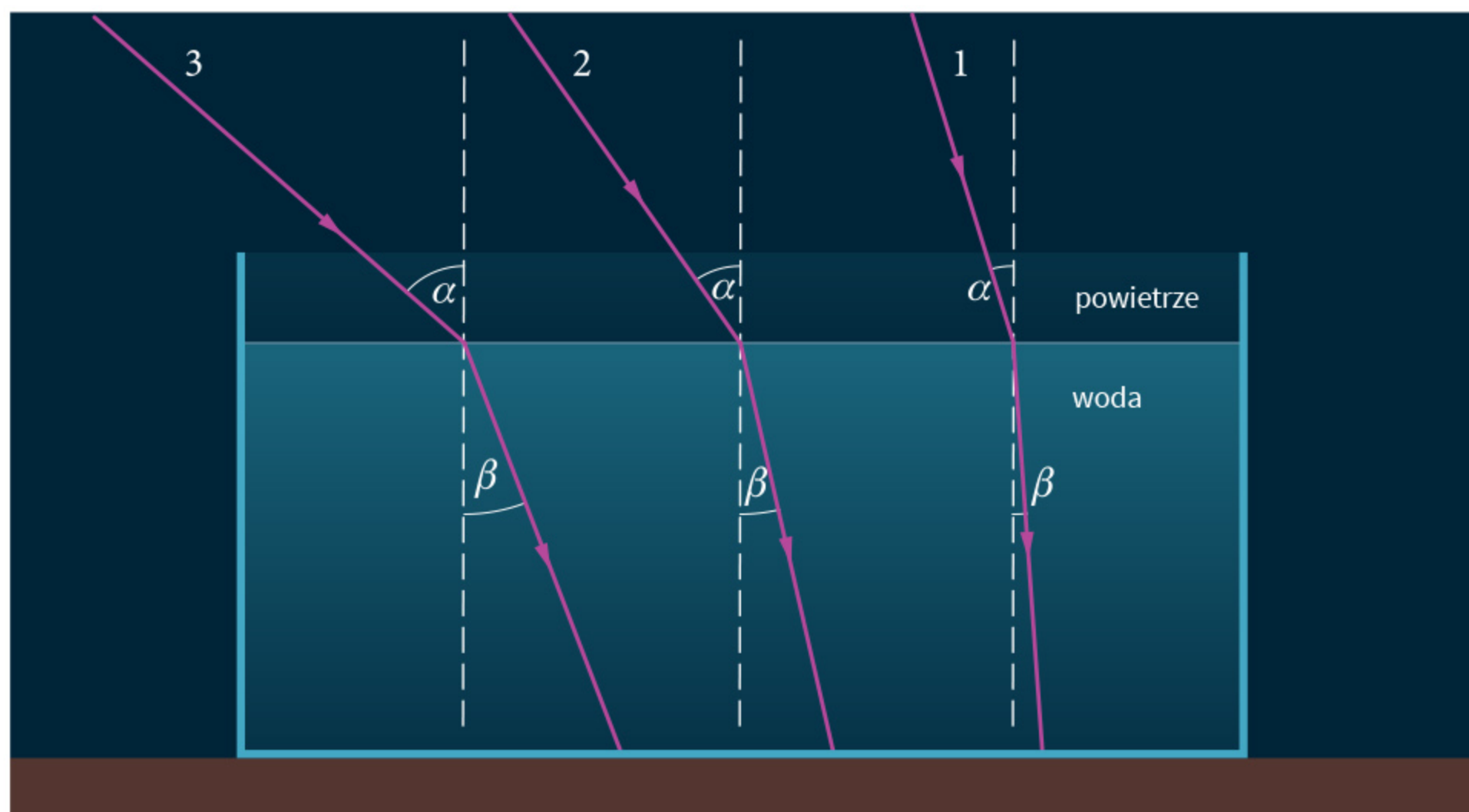
Bieg światła jest odwracalny. Na każdym rysunku można odwrócić bieg promieni i będzie to też sytuacja odpowiadająca rzeczywistości. Gdy widzimy rybę w wodzie, zapewne ryba widzi nas. Światło zarówno do naszych oczu, jak i do oczu ryby biegnie po tym samym torze (ryc. 14.7).



Ryc. 14.8. Niedźwiedzie wiedzą, że aby złapać rybę, muszą celować głębiej niż podpowiada wzrok

Prawo załamania światła

Na rycinie 14.9 przedstawiono załamanie kilku promieni światła na granicy wody i powietrza. Im większy jest kąt padania światła, tym większy jest kąt załamania.



Ryc. 14.9. Kilka promieni światła przechodzi przez powierzchnię wody. Wraz ze wzrostem kąta padania α rośnie kąt załamania β

Kąt padania i kąt załamania są do siebie w przybliżeniu wprost proporcjonalne, o ile oba kąty są nieduże. Gdy światło przechodzi z próżni (lub powietrza) do przezroczystej substancji, zapisujemy to wzorem^{*}:

$$\frac{\alpha}{\beta} \approx n \quad (1)$$

gdzie:

α – kąt padania w próżni (lub w powietrzu), β – kąt załamania w substancji,
 n – współczynnik załamania światła dla danej substancji.

Współczynnik załamania światła n dla danej substancji (np. dla wody, szkła) związany jest z prędkością światła w próżni c i z prędkością v w danym ośrodku zależnością:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Współczynnik załamania określa, ile razy prędkość światła w próżni jest większa od prędkości światła w danym ośrodku.

^{*} Dla kątów padania mniejszych od 30° obliczony z podanego wzoru kąt załamania różni się od rzeczywistego o mniej niż 1° .

PRZYKŁAD 1.

Kąt padania promienia światła na powierzchnię szklanego prostopadłościanu wynosi 27° . O jaki kąt (w przybliżeniu) zmieni się kierunek rozchodzenia się światła w wyniku załamania w szkłe? Współczynnik załamania światła dla szkła wynosi 1,5.

Obliczamy kąt załamania ze wzoru:

$$\frac{\alpha}{\beta} \approx n$$

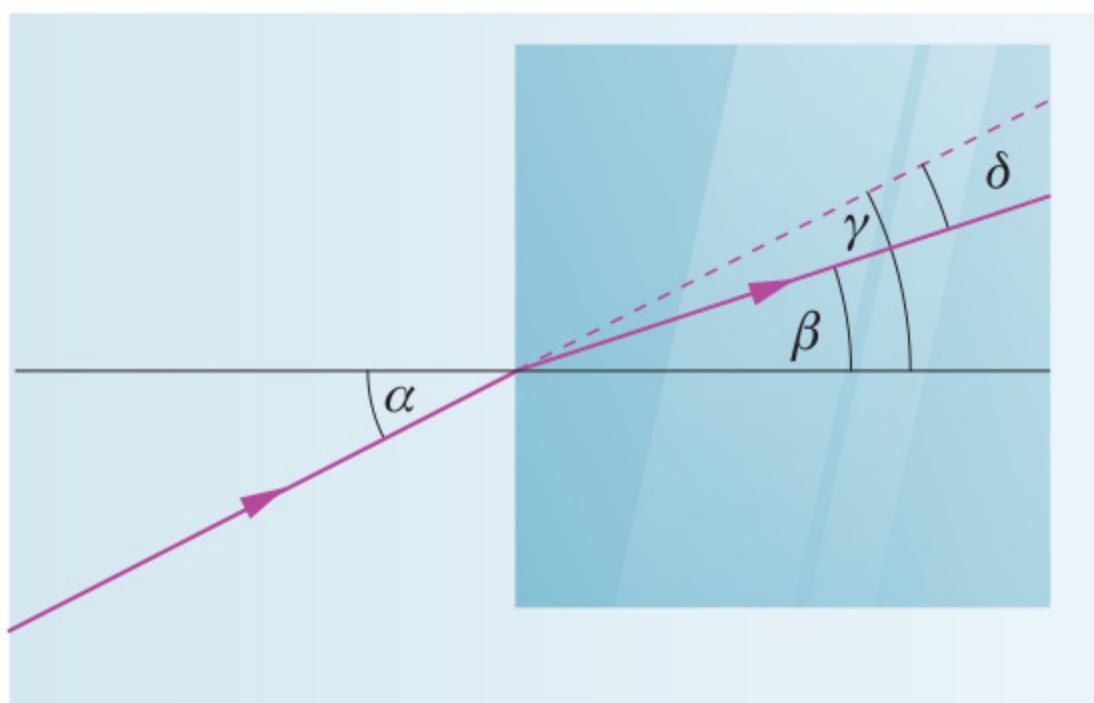
Stąd:

$$\beta \approx \frac{\alpha}{n} = \frac{27^\circ}{1,5} = 18^\circ$$

Kąty α i γ przedstawione na rysunku są kątami wierzchołkowymi, więc $\alpha = \gamma$. Promień odchylił się zatem od pierwotnego kierunku o kąt:

$$\delta = \gamma - \beta$$

$$\delta = 27^\circ - 18^\circ = 9^\circ$$



s. 212

**WARTO WIEDZIEĆ****Ogólna postać prawa załamania światła**

Znajomość funkcji trygonometrycznych w trójkącie prostokątnym pozwala nam przedstawić związek między kątem padania i kątem załamania bez ograniczania się tylko do małych kątów. Dla każdego kąta padania α i kąta załamania β , gdy światło przechodzi z próżni do innego ośrodka, prawo załamania światła ma postać:

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

Dla małych kątów stosunek sinusów jest w przybliżeniu równy stosunkowi kątów i stąd użyjemy wzór (1).

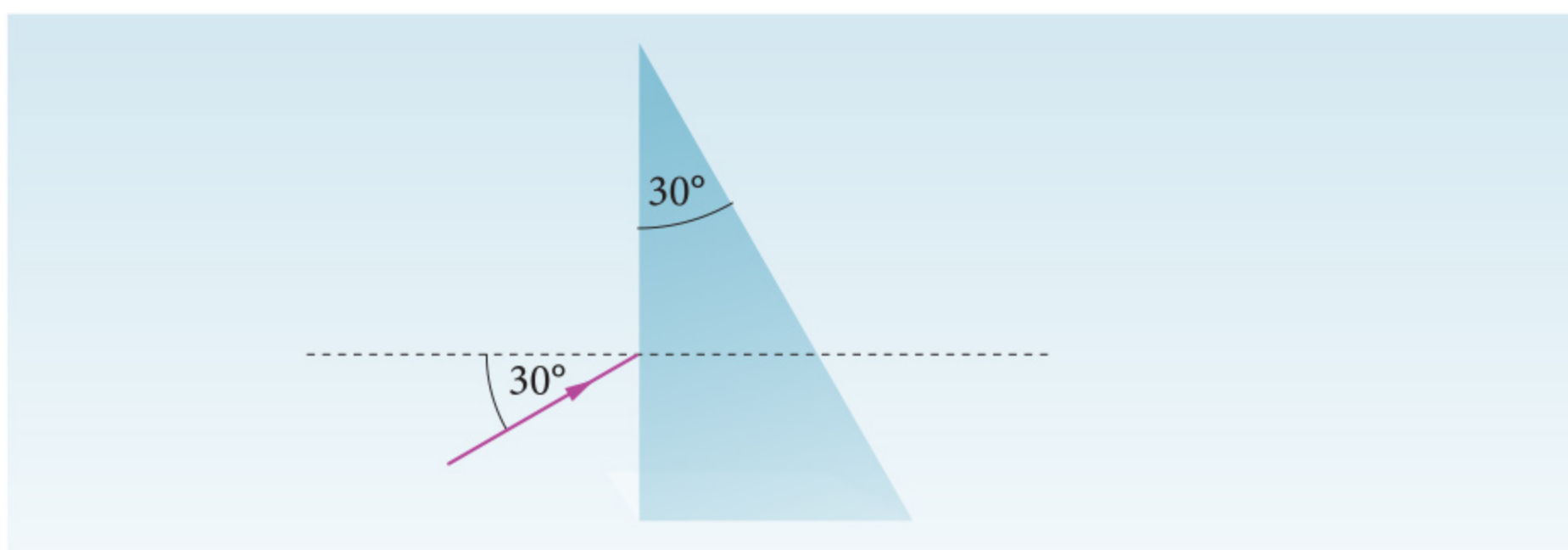
PODSUMOWANIE

- ▶ Światło załamuje się, gdy przechodzi z jednego ośrodka do drugiego i kąt padania jest różny od zera.
- ▶ Gdy światło przechodzi z próżni lub powietrza do danej substancji, to dla niewielkich kątów stosunek kąta padania do kąta załamania jest równy współczynnikowi załamania światła dla tej substancji.

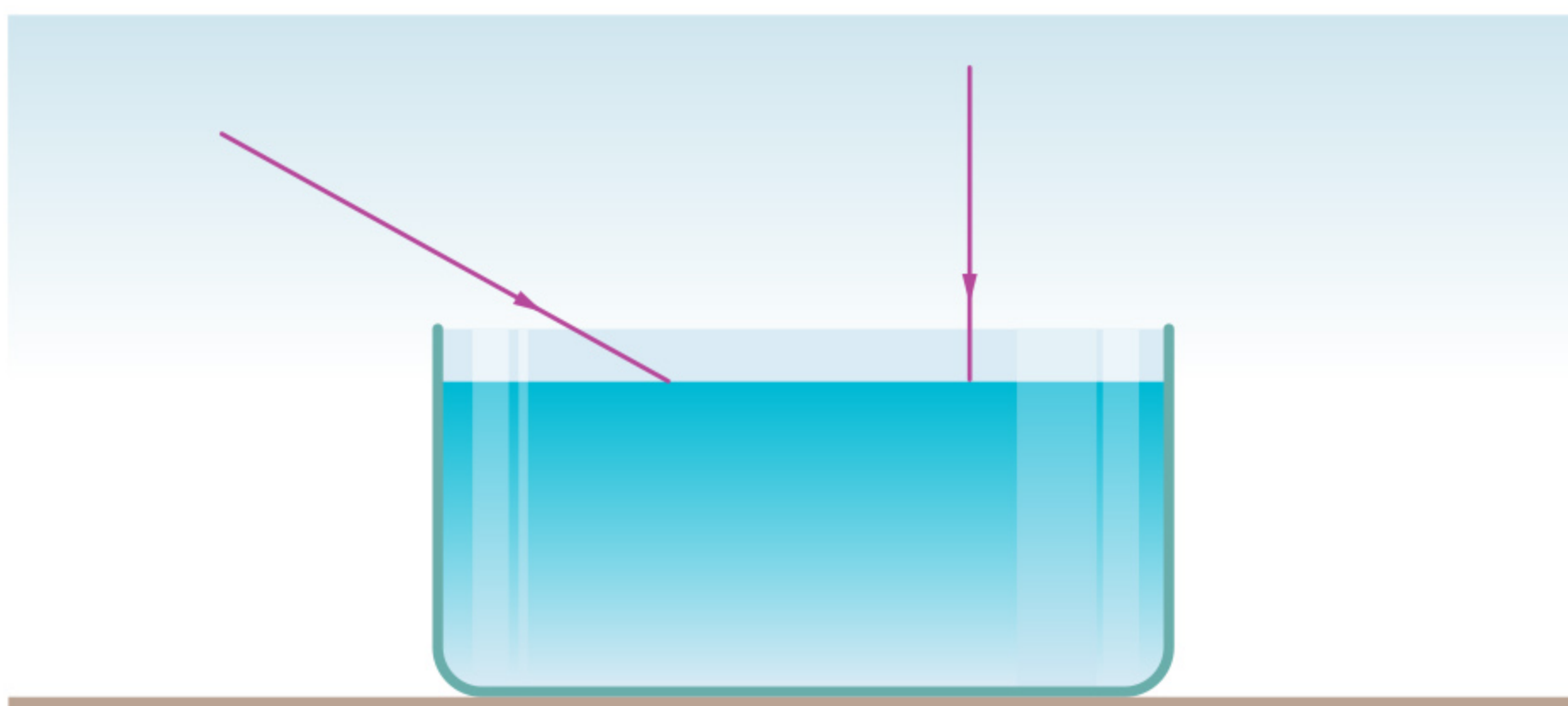
$$\frac{\alpha}{\beta} \approx n$$

PYTANIA I ZADANIA

1. Promień światła pada na powierzchnię wody pod kątem 60° do tej powierzchni. Narysuj w zeszycie bieg promienia w wodzie.
2. Na szklany graniastosłup trójkątny (tzw. pryzmat) pada promień światła w sposób przedstawiony na rysunku.
Narysuj dalszy bieg światła w pryzmacie i po jego opuszczeniu.



3. Dla dużych kątów padania nie można stosować wzoru (1). Skorzystaj z metody przedstawionej na rycinie 14.2 i narysuj promień załamany, gdy kąt padania światła na powierzchnię szkła wynosi 70° . Oszacuj kąt załamania. Prędkość światła w szkłe jest 1,5 razy mniejsza niż w powietrzu.
4. Narysuj bieg światła czerwonego przez kroplę wody (kropla jest kulista), gdy światło **nie** pada wzdłuż średnicy. Wskazówka: promień kuli jest prostopadły do jej powierzchni.
5. Może się zdarzyć, że ośrodek, w którym biegnie światło, nie jest jednorodny. Przykładem niech będzie roztwór soli w naczyniu, w którym zasolenie rośnie wraz z głębokością, a tym samym prędkość rozchodzącego się w nim światła maleje w sposób ciągły wraz ze wzrostem głębokości.
Narysuj dalszy bieg promieni światła przedstawionych na rysunku, gdy w naczyniu jest roztwór soli opisany w zadaniu.





15. Całkowite wewnętrzne odbicie

- Kąt graniczny i całkowite wewnętrzne odbicie
- Światłowody

→ **Przypomnij sobie** prawo odbicia i prawo załamania światła.

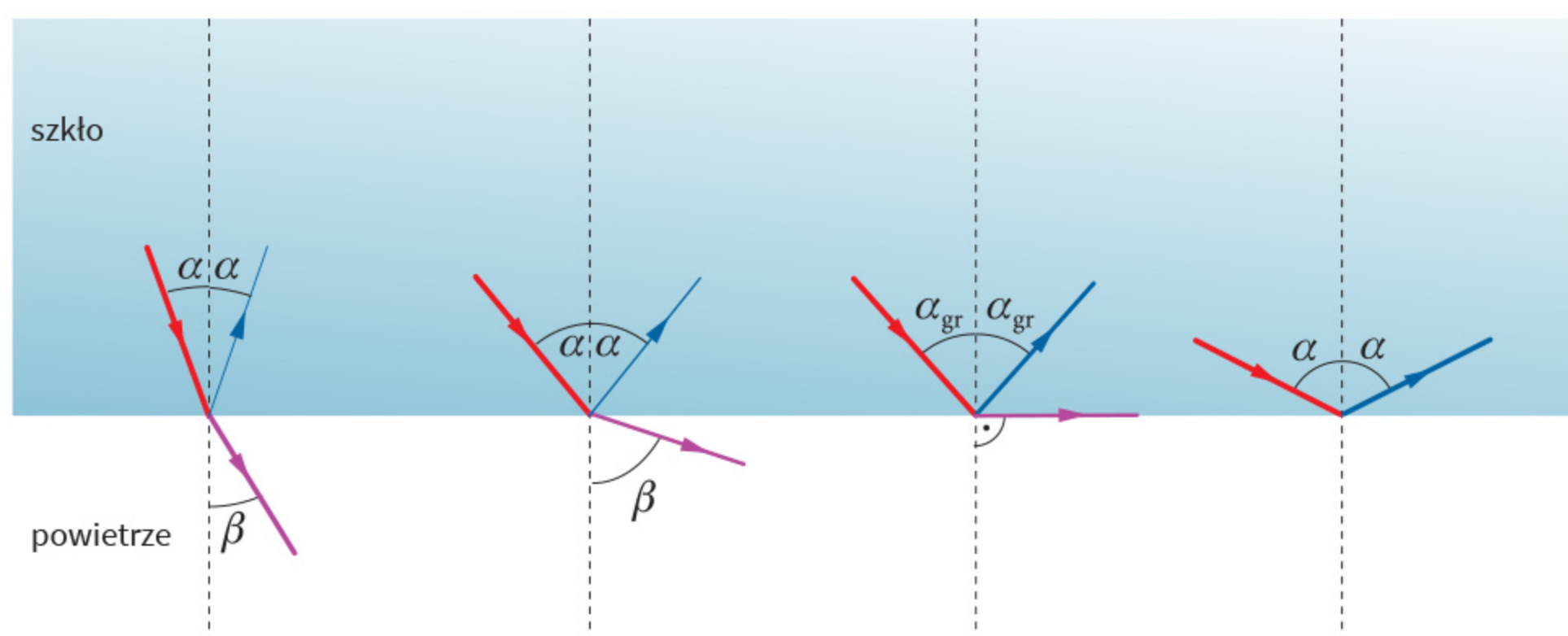
W 2009 roku jedną z osób uhonorowanych Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki był chiński fizyk Charles Kuen Kao, który otrzymał tę nagrodę za badania nad transmisją danych za pomocą światłowodów. Co to są światłowody? Czy przeciętny człowiek korzysta z tego wynalazku? Okazuje się, że tak – i to na ogół codziennie.

Kąt graniczny

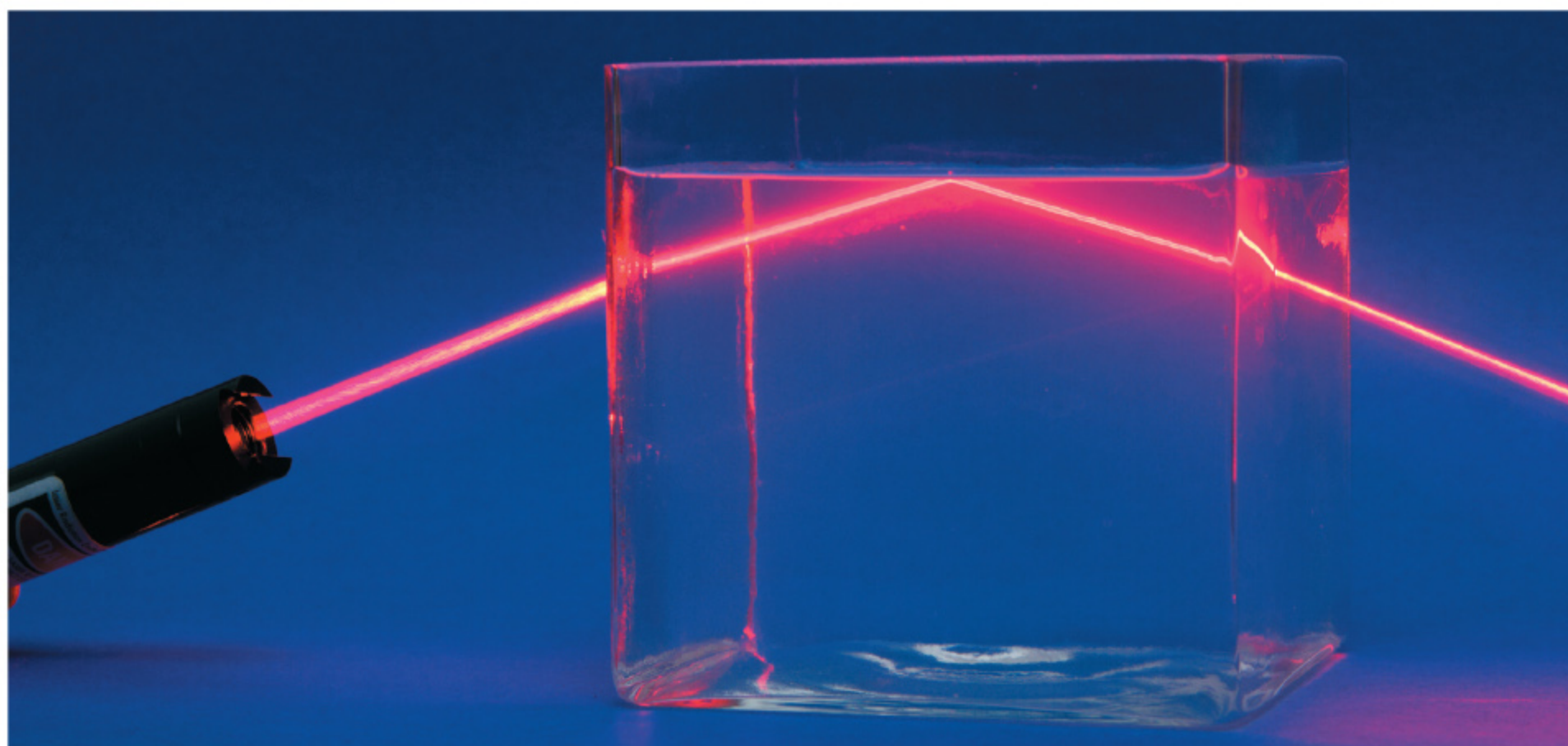
Gdy światło przechodzi z przezroczystego ośrodka (np. szkła) do powietrza (lub próżni), kąt załamania jest większy od kąta padania (ryc.15.1). Dla pewnego kąta padania kąt załamania jest równy 90° . Taki kąt padania nazywamy **kątem granicznym**. Dla kątów padania większych od kąta granicznego światło w całości odbija się od granicy ośrodków

s. 201 – zgodnie z prawem odbicia (scenariusz doświadczenia 2, s. 201).

Światło padające z pewnego ośrodka na granicę z powietrzem odbija się od tej granicy całkowicie, gdy kąt padania jest większy od kąta granicznego. Zjawisko to nazywamy **całkowitym wewnętrznym odbiciem**.



Ryc. 15.1. Przejście światła ze szkła do powietrza. W miarę wzrostu kąta padania coraz większa część światła się odbija. Dla kąta większego od kąta granicznego światło odbija się w całości



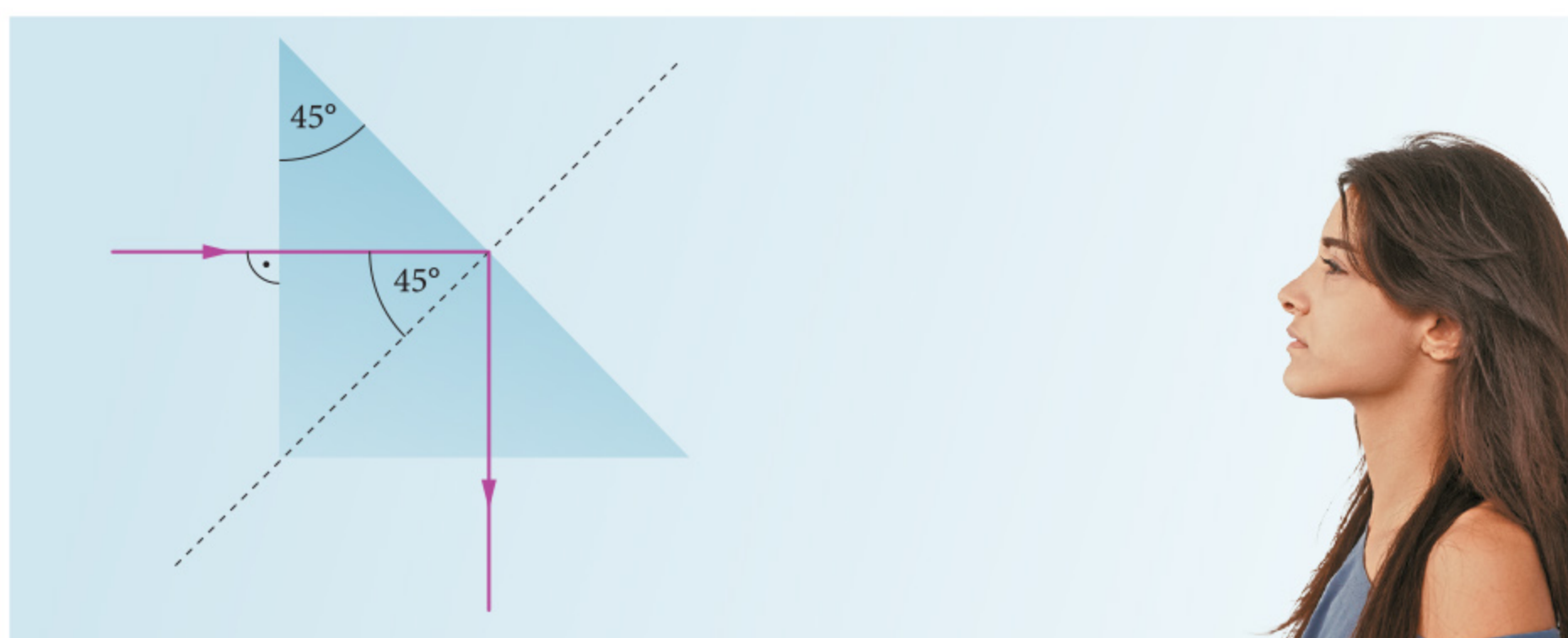
Ryc. 15.2. Wiązka światła laserowego odbija się od wewnętrznej powierzchni wody

Gdy zachodzi całkowite wewnętrzne odbicie, wiązka światła na granicy ośrodków nie dzieli się na odbitą i załamaną, lecz w całości odbija się jak od zwierciadła (ryc. 15.2). Całkowite wewnętrzne odbicie może zajść tylko wtedy, gdy światło biegnie w ośrodku graniczącym z takim, w którym prędkość światła jest większa. Można je więc zaobserwować, gdy światło skierujemy na szkło od strony wody, ale nie odwrotnie.

PRZYKŁAD 1.

Zbadajmy rozchodzenie się światła w szklanym pryzmacie o podstawie trójkąta prostokątnego równoramionnego. Światło pada na ściankę przy kącie prostym prostopadle do powierzchni. Czy obserwator patrzący od strony ścianki, której krawędź jest przeciwprostokątną, zobaczy światło? Kąt graniczny dla szkła wynosi 42° .

Przedstawmy sytuację na rysunku.



Obserwator znajdujący się od strony ścianki „przeciwprostokątnej” zaobserwuje światło wtedy, kiedy opuści ono pryzmat właśnie przez tę ściankę. Aby tak się stało, kąt padania na tę ściankę powinien być mniejszy od granicznego. Z analizy kątów na rysunku widzimy, że kąt padania wynosi 45° , więc jest większy od granicznego. Światło zostanie w całości odbite i skierowane na dolną ściankę, czyli nie dotrze do obserwatora.



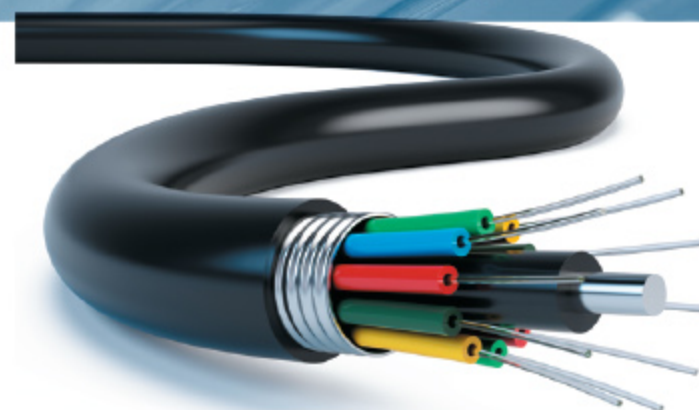
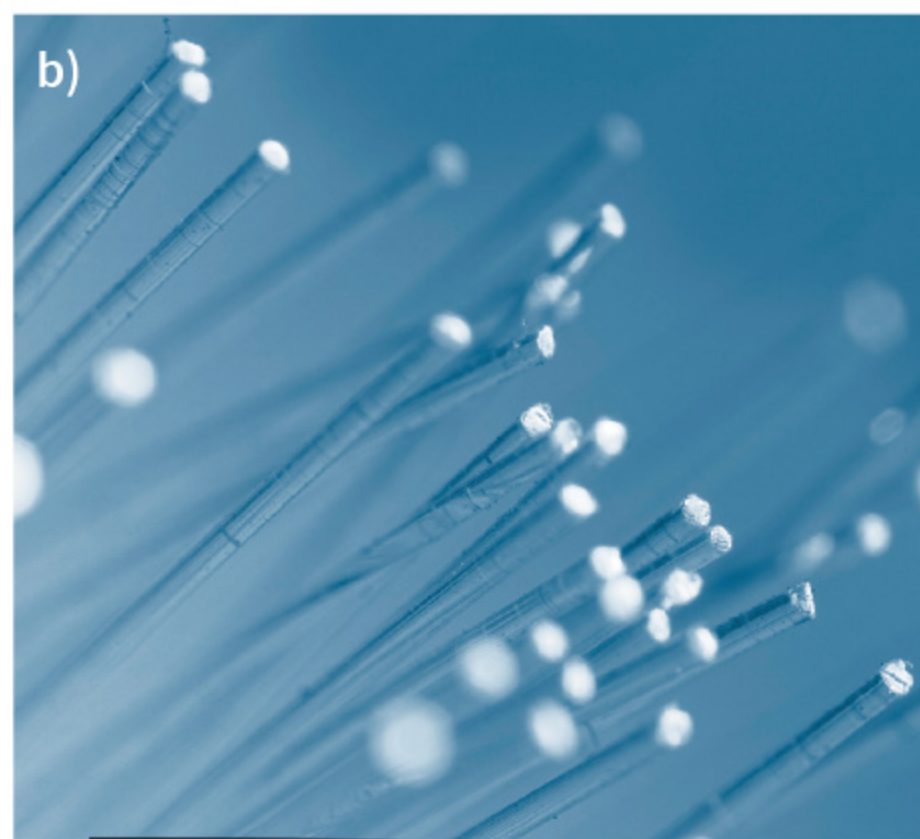
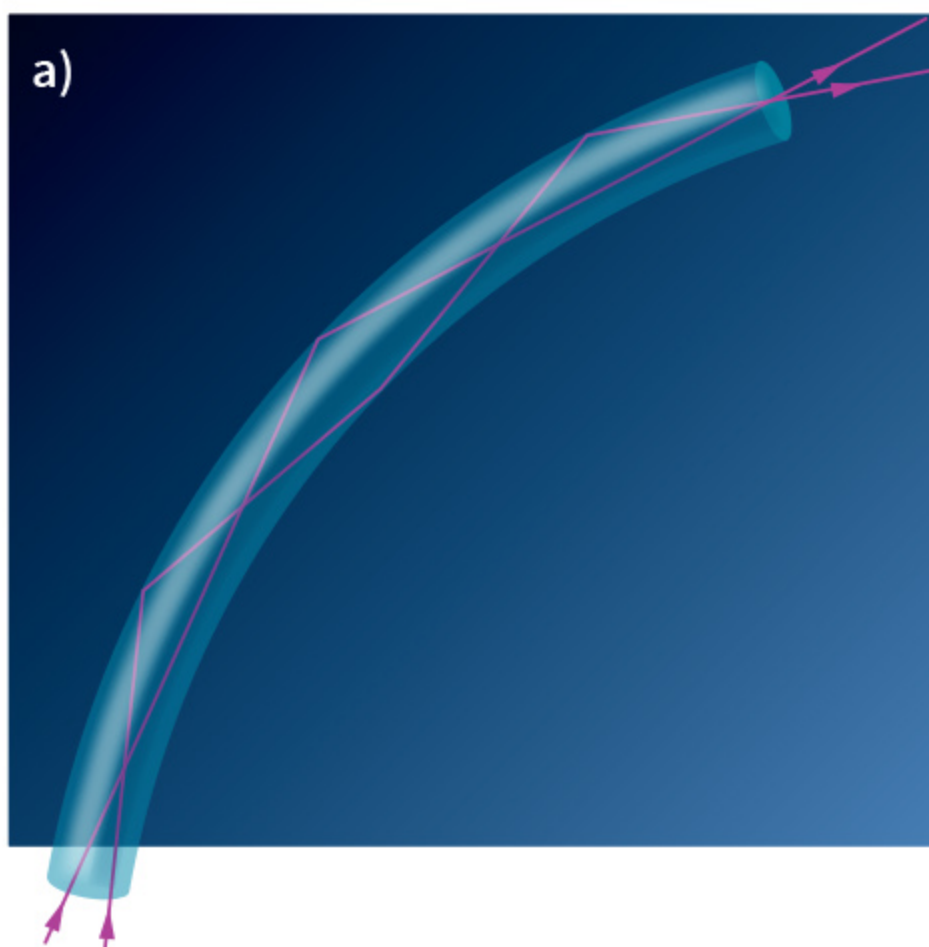
WARTO WIEDZIEĆ

Pryzmaty w instrumentach optycznych

Już od dawna w wielu instrumentach optycznych, takich jak lornetki, mikroskopy czy aparaty fotograficzne, zamiast zwierciadeł stosuje się szklane pryzmaty, które dzięki zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia pełnią funkcję luster. Powodem takiego rozwiązania jest precyzja wykonania i duża trwałość szklanych pryzmatów. Tradycyjne zwierciadła z czasem tracą bardzo dobrą zdolność odbicia światła, w związku z czym znacznie pogarsza się jakość tworzonych przez nie obrazów.

**Światłowody**

Światłowody to cienkie włókna szklane lub z tworzywa sztucznego. Światło wpadające do wnętrza światłowodu od strony jednego z jego końców będzie w nim biegło po linii prostej do momentu, gdy padnie na ściankę. Światłowody zwykle są cienkie i nie są mocno zginane (dzięki temu się nie łamią), więc światło pada na ściankę światłowodu pod kątem padania znacznie większym niż graniczny. Ulega ono zatem całkowitemu wewnętrznemu odbiciu od ścianki i przemieszcza się dalej wewnątrz światłowodu (ryc.15.3). **Dzięki światłowodom możemy skierować światło w wybrane miejsce po zakrzywionym torze.**



Ryc. 15.3. Schemat działania światłowodu. Biegnące w nim światło wielokrotnie całkowicie odbija się od jego wewnętrznych powierzchni (a) i dopiero na końcu światłowodu może go opuścić (b)

DOŚWIADCZENIE 1.

Doświadczenie wykonaj nad wanną lub na dworze.

W plastikowej butelce po wodzie mineralnej wykonaj nieduży otwór w bocznej ścianie, blisko dna. Nalej do butelki wody (zatkaj palcem otwór, aby nie wypłynęła). Przyłóż świecącą latarkę do ścianki dokładnie po przeciwnej stronie otworu i pozwól wodzie wypływać. Czy miejsce, w którym woda pada na podłoże, jest oświetlone? Wyjaśnij uzyskany efekt.

**WARTO WIEDZIEĆ****Światłowody w medycynie**

Miniaturyzacja przyrządów optycznych i fotografia cyfrowa pozwoliły na budowę przyrządów, za pomocą których można obserwować wnętrze organizmu. Przez otwory w ciele (np. przez przetyk) po wcześniejszym znieczuleniu wprowadza się światłowód, na którego końcu zainstalowany jest obiektyw. Dzięki temu lekarz widzi na ekranie monitora wnętrze badanego organu, a ponadto może zmieniać położenie obiektywu i precyzyjniej stawiać diagnozę.

Tego typu urządzenia pozwalają też na wykonywanie tzw. operacji laparoskopowych, czyli bez otwierania powłok ciała. Przez niewielkie nacięcia w skórze wprowadza się oświetlenie, kamerę i oczywiście przyrządy chirurgiczne sterowane manipulatorami (ryc.).

**Światłowody w telekomunikacji**

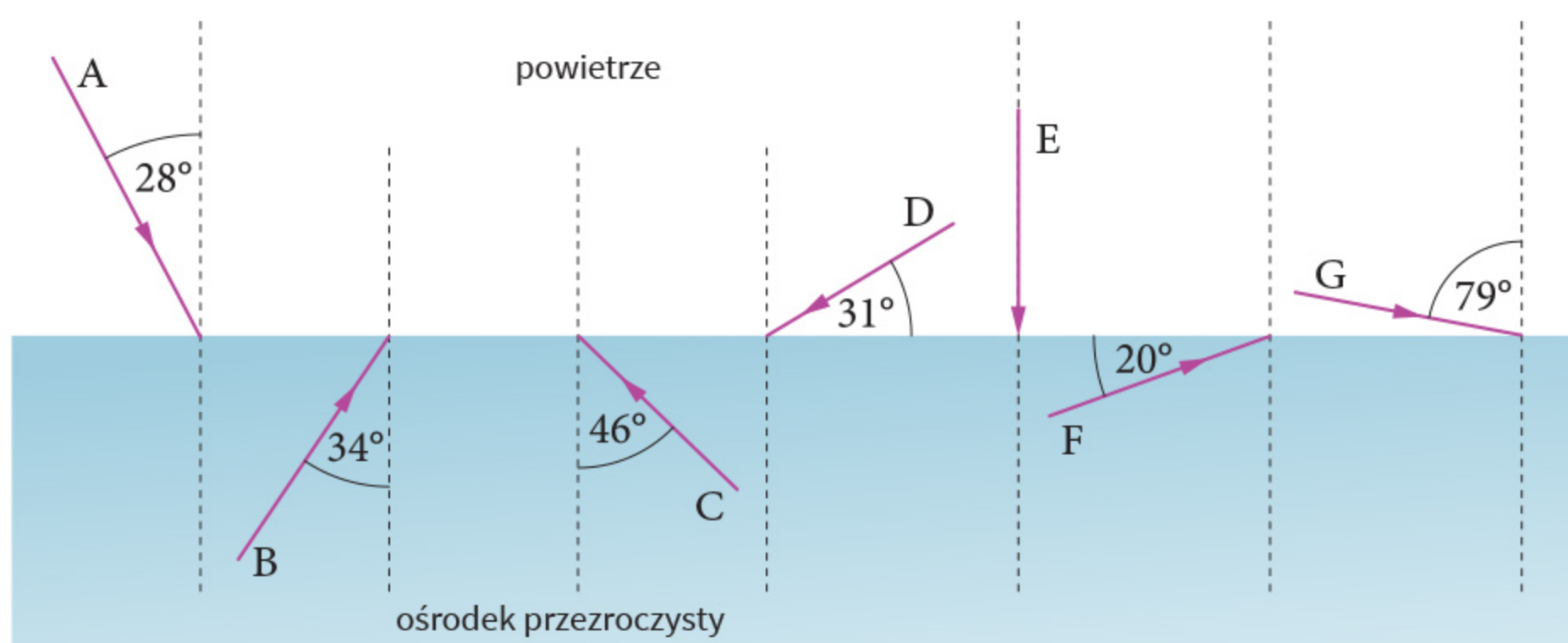
Zastosowanie światłowodów do przekazywania informacji spowodowało szybki rozwój internetu. Teraz bez problemu możemy połączyć się z serwerem w najbardziej odległym miejscu na Ziemi. Przesyłana informacja jest kodowana w postaci impulsów światła, które po pokonaniu często tysięcy kilometrów są odczytywane przez serwery. Dzięki światłowodom ilość przesyłanych informacji znacznie się zwiększyła.

PODSUMOWANIE

- ▶ **Kąt graniczny** to taki kąt padania, dla którego kąt załamania wynosi 90° . Gdy światło biegnące w ośrodku pada na jego granicę z próżnią (lub powietrzem) pod kątem większym od kąta granicznego, odbija się całkowicie.
- ▶ **Światłowody** pozwalają przesyłać sygnał świetlny na duże odległości i nie tylko po linii prostej. Znalazły one zastosowanie m.in. w medycynie i telekomunikacji.

PYTANIA I ZADANIA

1. Który z promieni przedstawionych na rysunku odbije się od powierzchni ośrodka przezroczystego w całości, a który częściowo? Kąt graniczny dla tego ośrodka wynosi 45° .



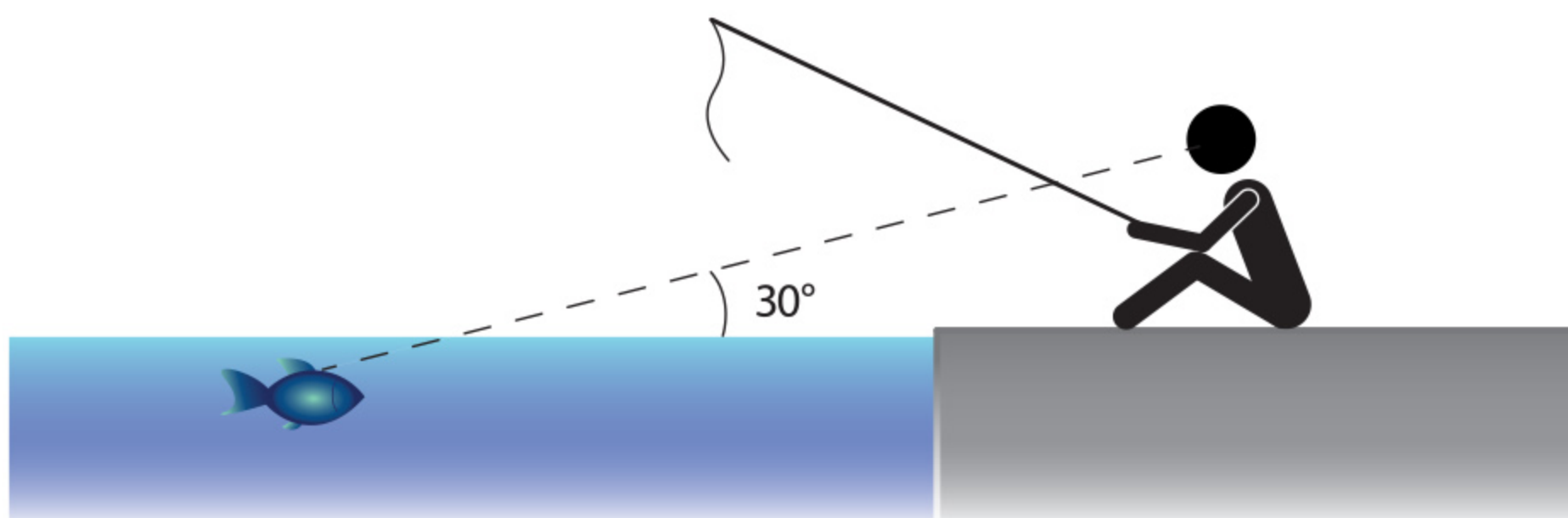
2. Przerysuj rysunek do zeszytu i narysuj bieg światła laserowego przez światłowód.



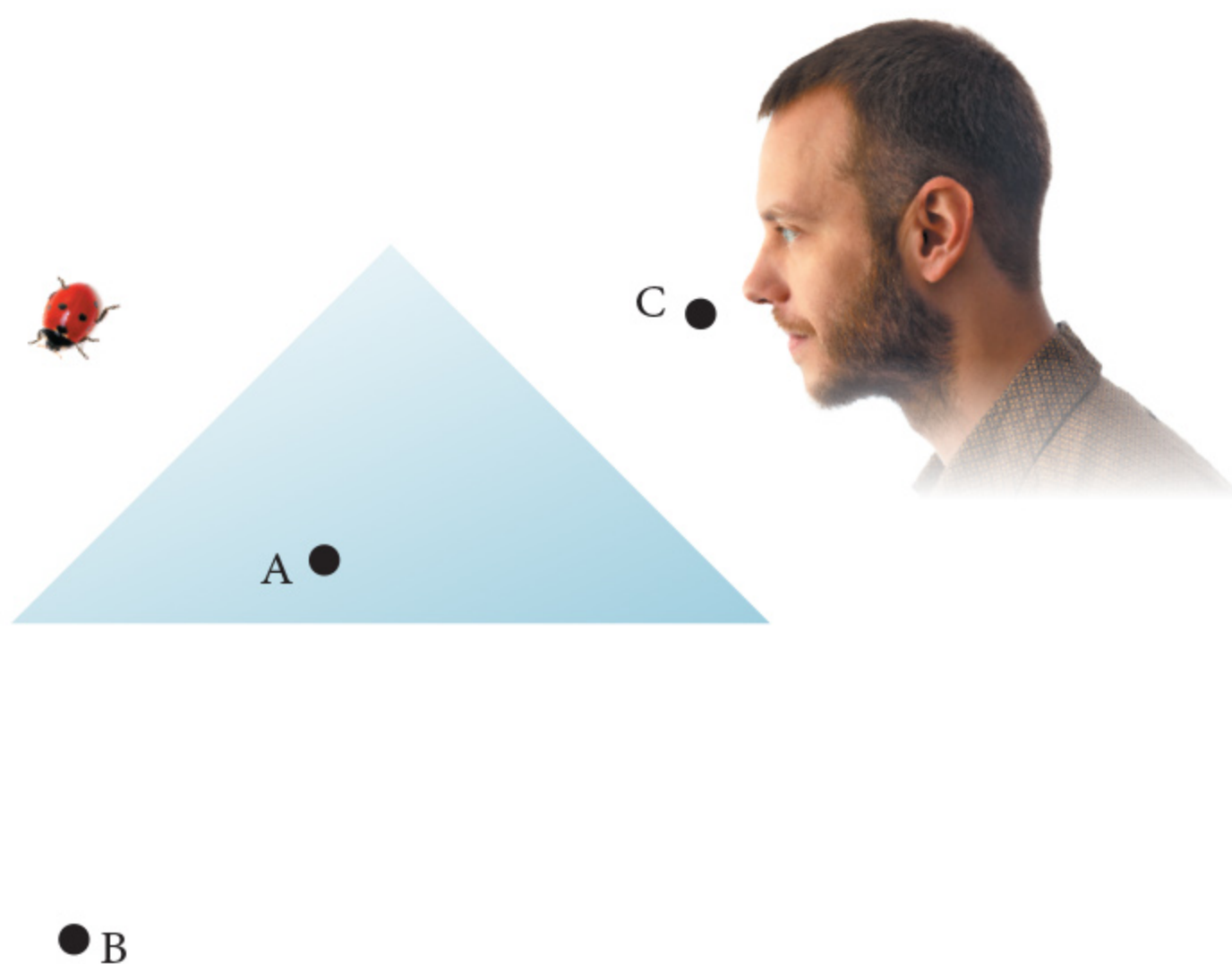
3. Na szklany prostopadłościan pada światło w sposób przedstawiony na rysunku. Kąt graniczny dla szkła wynosi 42° . Narysuj dalszy bieg światła.



4. Wędkarz chce złowić rybkę. Odcinek łączący rybkę z wędkarzem tworzy z powierzchnią wody kąt 30° . Co będzie widziała rybka, gdy będzie patrzyła wzdłuż tego odcinka w stronę wędkarza? Czy w tym położeniu rybka może zobaczyć wędkarza? Przedstaw sytuację na rysunku. Kąt graniczny dla wody wynosi 48° .



5. W którym punkcie – A, B czy C – Stefan zobaczy biedronkę, gdy będzie patrzył przez szklany pryzmat?





16. Zjawiska optyczne w atmosferze

- Kolor nieba, słońca i chmur
- Tęcza i halo
- Miraż

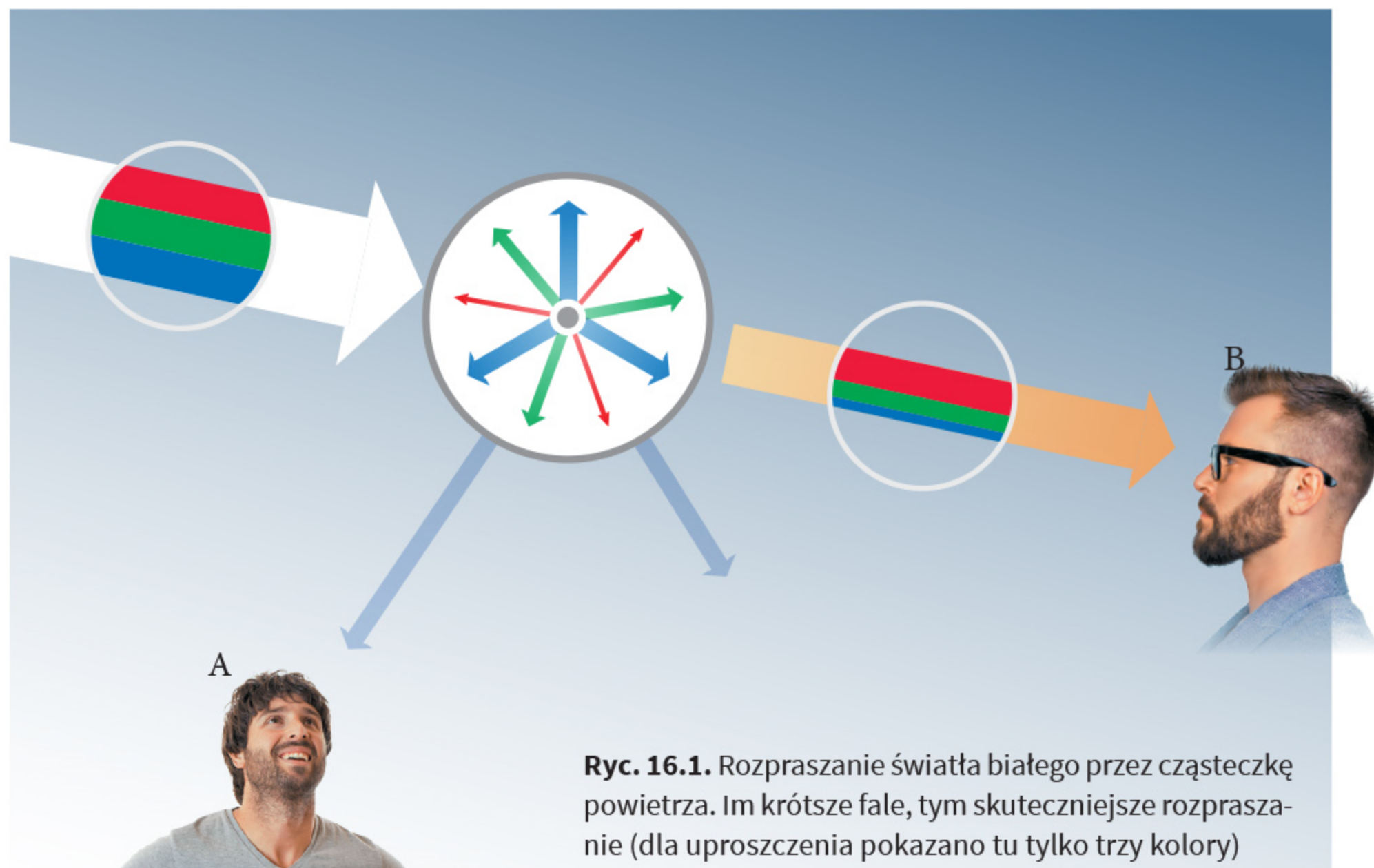
F

F → **Przypomnij sobie**, czym jest światło oraz na czym polegają zjawiska rozproszenia, odbicia i załamania światła.

Obserwacje zjawisk optycznych w przyrodzie nie wymagają specjalistycznego sprzętu. Wystarczy rozejrzeć się wokół: błękit nieba, biel chmur, kolor zachodzącego słońca lub tęcza po deszczu. Znajomość praw fizyki pozwala zrozumieć i wyjaśnić wszystkie te zjawiska optyczne. Przyjrzyjmy się im bliżej.

Kolor nieba, słońca i chmur

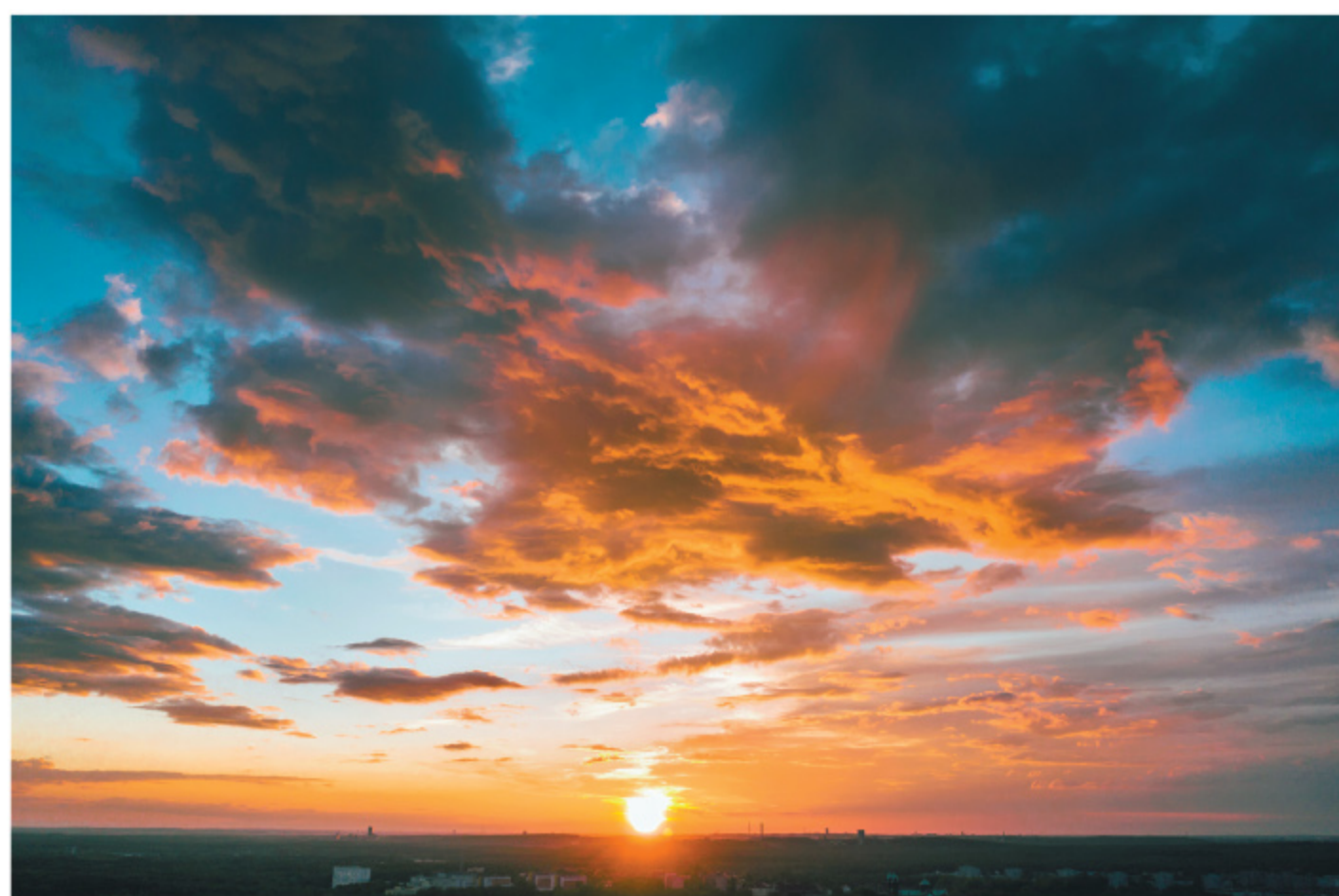
Jeśli w ciągu dnia patrzymy w niebo, do naszych oczu dociera światło słoneczne rozproszone na cząstkach pyłu, aerozoli oraz na przypadkowych zgęszczeniach i rozrzedzeniach powietrza. Ponieważ **najsilniej rozpraszane są fale najkrótsze**, odpowiadające barwom fioletowej i niebieskiej, a nasze oczy są niezbyt czułe na fiolet, dlatego właśnie widzimy niebieskie niebo (obserwator A na ryc. 16.1).



Ryc. 16.1. Rozpraszanie światła białego przez cząsteczkę powietrza. Im krótsze fale, tym skuteczniejsze rozpraszanie (dla uproszczenia pokazano tu tylko trzy kolory)

Rozpraszanie światła w atmosferze wpływa również na widziany kolor tarczy słonecznej. Im dłuższą drogę w powietrzu przemierzają promienie słoneczne, tym mniej w nich koloru niebieskiego i zielonego, bo coraz więcej cząstek rozprasza fale krótsze (obserwator B na ryc. 16.1). W miarę obniżania się słońca nad horyzontem wydłuża się droga promieni w powietrzu, zanim dotrą do naszych oczu. Dlatego właśnie tarcza zachodzącego słońca jest pomarańczowo-czerwona, mimo że w ciągu dnia jest żółta, a w letnie południe – biała (uwaga, nie wolno patrzeć prosto na nią!).

Chmury składają się z kropelek wody lub kryształków lodu większych od długości fal światła, dlatego wszystkie fale świetlne (czyli wszystkie barwy) są na nich rozpraszane jednakowo. Z tego właśnie powodu **chmury mają taki kolor jak docierające do nich światło** (ryc. 16.2).



Ryc. 16.2. W świetle słonecznym rozproszonym przez czyste powietrze dominuje kolor niebieski, natomiast chmury rozpraszają wszystkie kolory równomiernie

F

DOŚWIADCZENIE 1.

Do szklanki wody wprowadź kilka kropel mleka i wymieszaj. Zaobserwuj, czy roztwór jest biały czy lekko niebieskawy. Popatrz teraz przez roztwór na świecącą żarówkę (najlepiej tradycyjną, z żarnikiem). Jaki jest kolor żarnika? Wyjaśnij obserwowane efekty.

Tęcza i halo

Tęcza jest zjawiskiem powszechnie znanym. Stosunkowo mniej znane jest halo, zjawisko powstające dość często, podobne do tęczy, lecz zauważane przez znacznie mniejszą liczbę osób. Halo to kolorowy krąg widniejący wokół tarczy Słońca lub Księżyca, gdy niebo zasnuwane jest cienkimi wysokimi chmurami.

Oba wspomniane zjawiska powstają w wyniku załamania i rozszczepienia światła słonecznego (ryc. 16.3).

W przypadku tęczy załamanie światła następuje na kropkach wody, natomiast halo powstaje na kryształkach lodu, z których zbudowane są chmury wysokie.

Przyjrzyjmy się bliżej powstawaniu tęczy. Aby ją zobaczyć, obserwator powinien znajdować się między słońcem a kroplami wody, pochodzącymi np. z deszczu (ryc.

16.4). Światło słoneczne pada na krople wody, częściowo odbija się od ich powierzchni, a częściowo załamuje. W powstawaniu tęczy biorą udział te promienie światła, które wpadły do kropli deszczu, częściowo odbiły się od wewnętrznej powierzchni kropli i wróciły w stronę obserwatora.

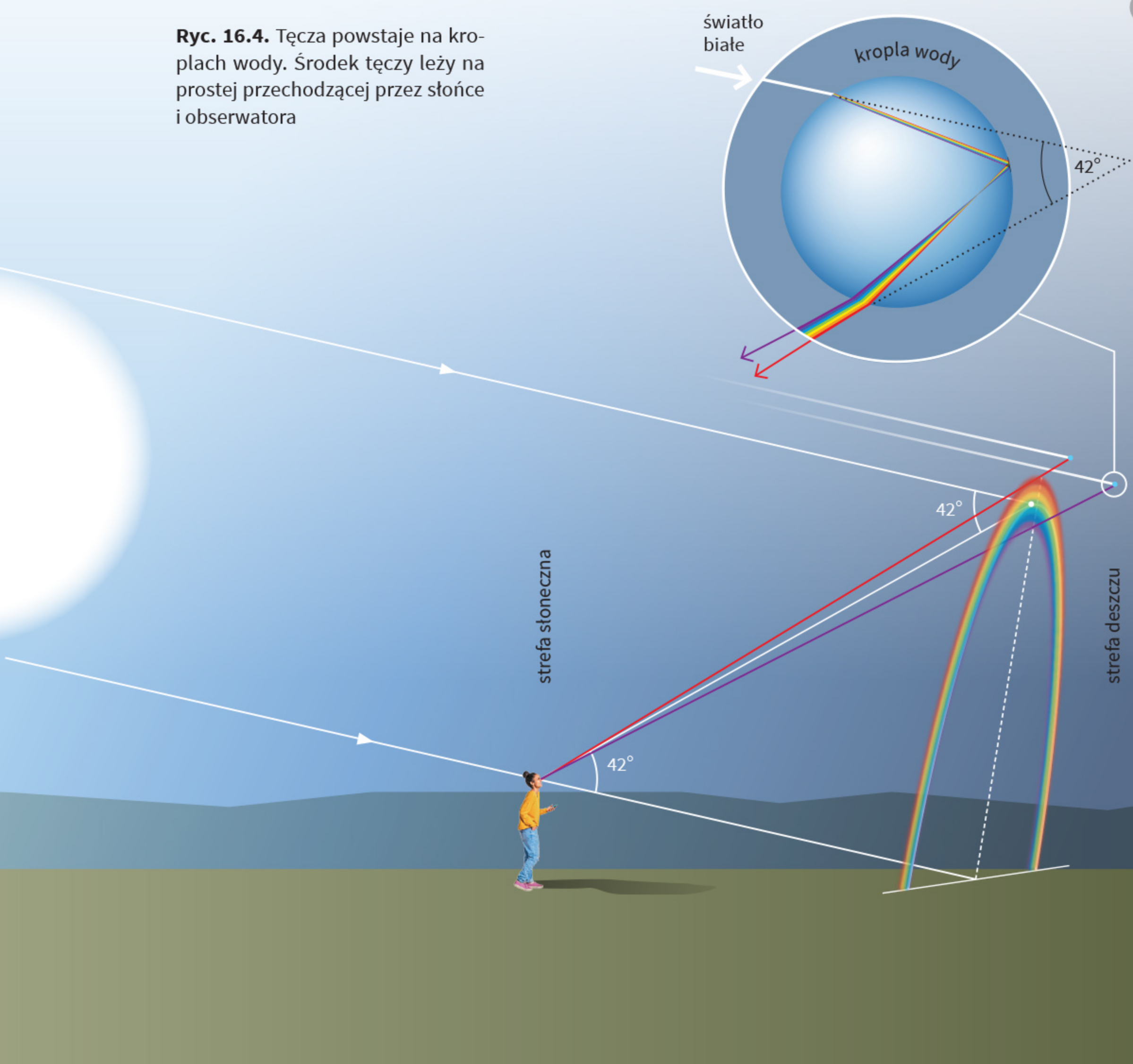
Okazuje się, że światło nie opuszcza kropli równomiernie we wszystkich kierunkach. Najwięcej światła wybiega z niej pod kątem 42° do pierwotnego kierunku promienia. Z tego powodu pod takim właśnie kątem do padających promieni słonecznych widzimy pojaśnienie w kształcie kolorowego półokręgu. Ten kąt wynika z wartości współczynnika załamania światła dla wody. Ponieważ współczynnik załamania światła dla różnych barw jest nieco inny, światło rozszczepia się na różne kolory.

Światło czerwone opuszcza kroplę pod większym kątem w stosunku do poziomu niż fioletowe (ryc. 16.4). Z tego powodu górna część tęczy ma kolor czerwony, a dolna – fioletowy. Nie zobaczymy tęczy na jednej kropce wody. Tysiące kropel to tysiące kolorowych punkcików tworzących tęczę. I w dodatku każdy z nas widzi swoją tęczę, której środek wyznacza linia słońca i obserwatora.



Ryc. 16.3. Tęcza i halo widoczne na niebie

Ryc. 16.4. Tęcza powstaje na kroplach wody. Środek tęczy leży na prostej przechodzącej przez słońce i obserwatora



Miraż

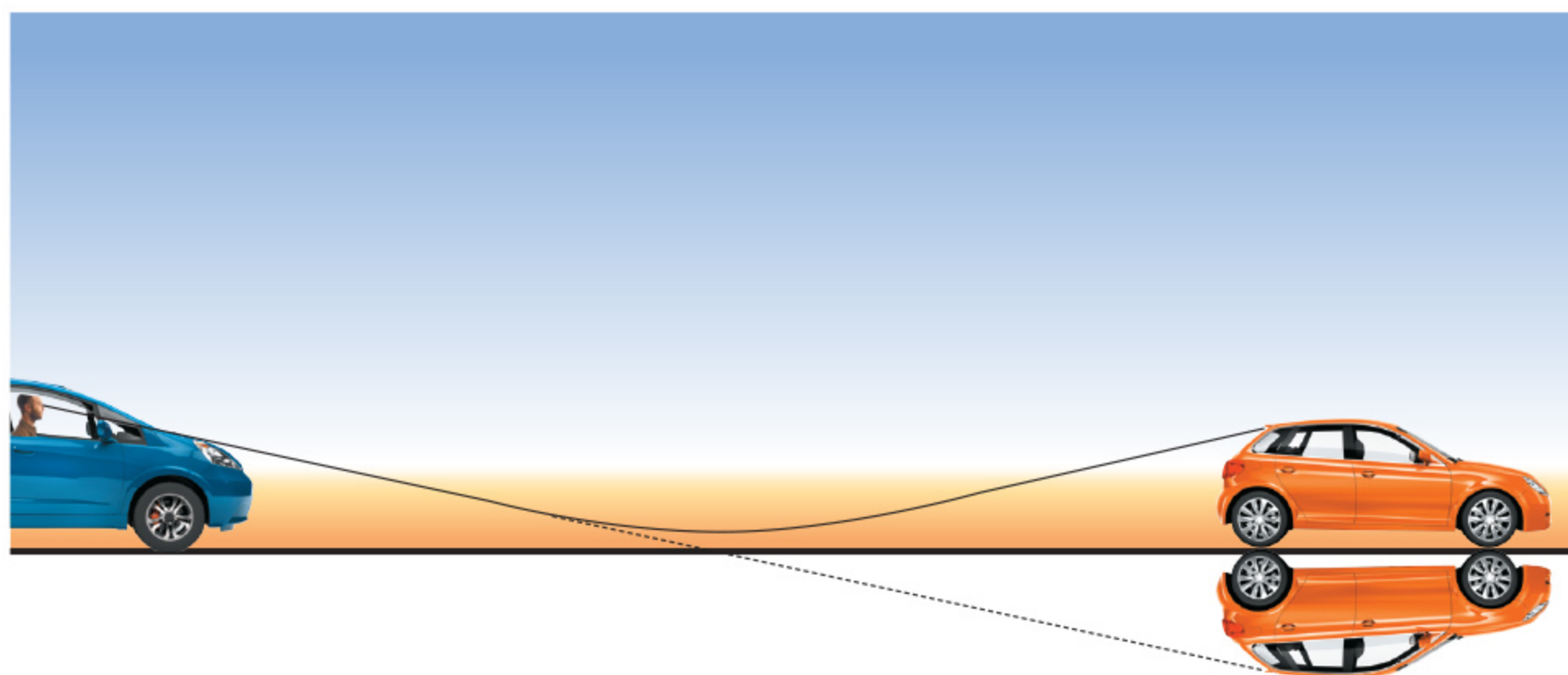
W powietrzu światło nie zawsze biegnie po liniach prostych. Jego prędkość może być nieznacznie inna w warstwach powietrza o różnej gęstości. Wobec tego gdy światło przechodzi do warstwy o innej gęstości, nieznacznie się załamuje. Po przebyciu dużych odległości odstępstwo od prostoliniowego biegu staje się na tyle znaczące, że obiekty będące daleko widzimy jako zniekształcone lub odwrócone.

Spójrzmy na odwrócony obraz pojazdów (ryc. 16.5). Takie obrazy powstają wówczas, gdy podłoże jest rozgrzane i tuż nad nim zalega warstwa rozgrzanego powietrza. W dolnej warstwie (cieplejszej) prędkość światła jest większa niż w górnej (chłodniejszej), a zatem

F większa jest również długość fali światła. Wobec tego podczas przejścia światła z jednej warstwy do drugiej zmienia się kształt powierzchni falowych, a zatem kierunek biegu światła (ryc. 16.6). Światło jakby odbija się od granicy gorącego i chłodniejszego powietrza. Powstaje wówczas obraz – podobnie jak w zwierciadle płaskim. **Takie pozorne obrazy powstające wskutek załamania światła w różnych warstwach powietrza nazywamy mirażami.** Najczęściej widywany miraż to po prostu obraz nieba jak po odbiciu od powierzchni wody.



Ryc. 16.5. Miraż widziany nad rozgrzaną jezdnią



Ryc. 16.6. Powstawanie mirażu. W gorącym powietrzu nad podłożem światło zmienia kierunek rozchodzenie się, podobnie jak w roztworze soli o zmiennym stężeniu

Temperatura powietrza w atmosferze zwykle maleje wraz z wysokością. Czasami jednak zdarza się, że warstwa chłodnego powietrza zalega między warstwami cieplejszymi. Może ona wówczas pełnić funkcję światłowodu przenoszącego obraz obiektów na Ziemi na dziesiątki, a nawet setki kilometrów (ryc. 16.7). Dzięki temu można czasem zobaczyć obiekty bardzo odległe, leżące głęboko pod horyzontem.



Ryc. 16.7. Warstwy powietrza o różnej temperaturze mogą pełnić w atmosferze funkcję światłowodu



WARTO WIEDZIEĆ

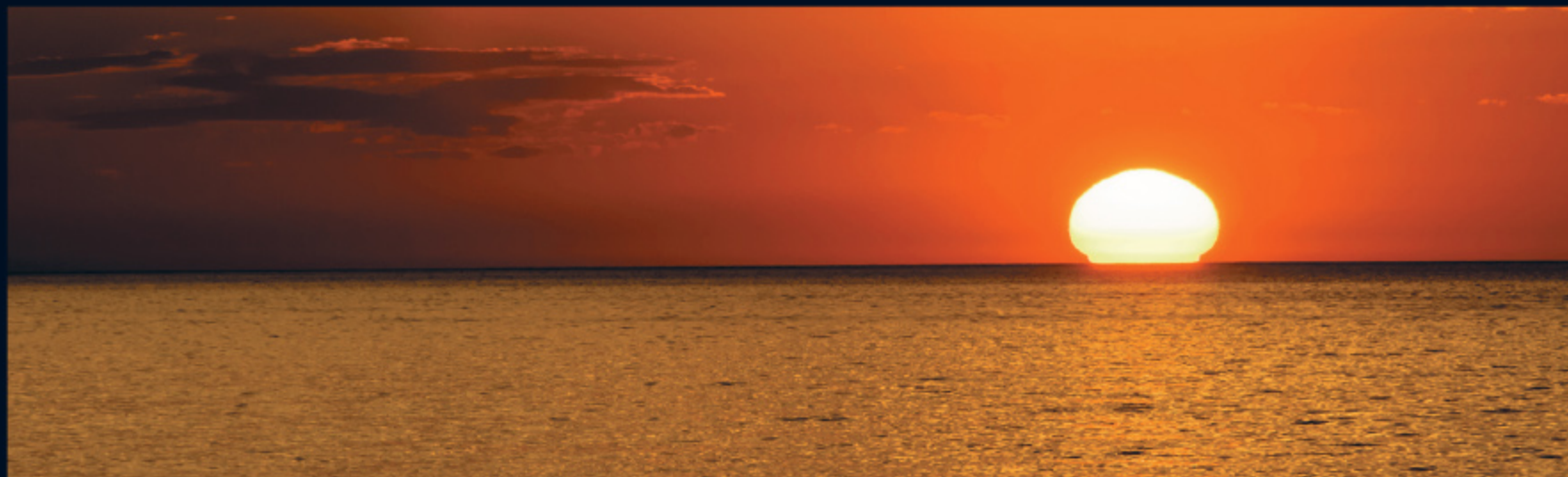
Refrakcja astronomiczna

Prędkość światła w powietrzu jest nieznacznie mniejsza niż w próżni i maleje w miarę wzrostu gęstości powietrza. Wobec tego światło biegnące ze Słońca i innych ciał niebieskich załamuje się podczas wchodzenia w coraz gęstsze warstwy atmosfery Ziemi. To zjawisko nazywamy **refrakcją astronomiczną**. Refrakcja powoduje m.in., że w pobliżu horyzontu ciała niebieskie widoczne są wyżej niż w rzeczywistości (ryc.).



Największa refrakcja astronomiczna zachodzi dla ciał niebieskich widzianych nisko nad horyzontem, ale i tak jest ona nieduża. Na przykład w Polsce promień załamany docierający do naszych oczu tworzy z promieniem padającym na granicę atmosfery kąt mniejszy niż 1° . Powoduje to jednak, że słońce wschodzi 7 minut wcześniej i zachodzi 7 minut później w stosunku do sytuacji, w której atmosfery by nie było.

Skutki refrakcji astronomicznej można zaobserwować samodzielnie. O wschodzie lub zachodzie tarcza Słońca lub Księżyca często staje się owalna. Wskutek refrakcji pozorne przesunięcie dolnej części tarczy jest większe niż górnej i dlatego wydaje się ona spłaszczona. Promienie świetlne są również odchylane przez drobne niejednorodności powietrza. Skutkiem tego jest falowanie obrazu oglądanego na przykład poprzez rozgrzane powietrze nad ogniskiem, a także migotanie gwiazd.

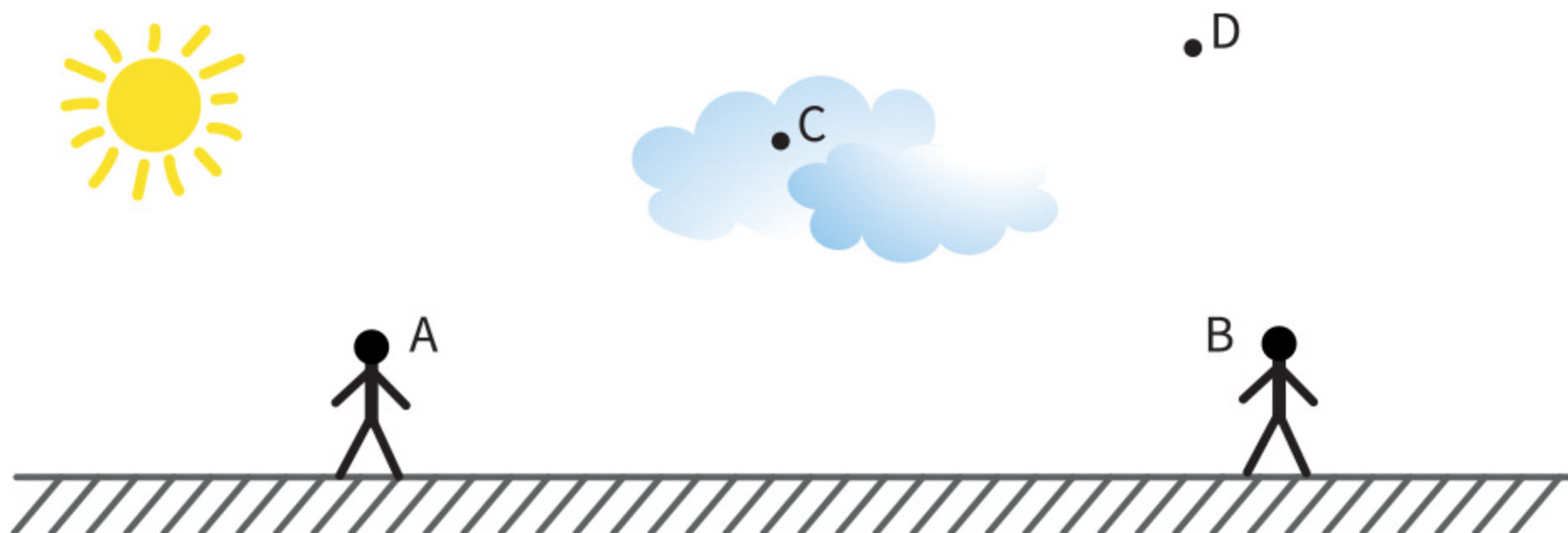


PODSUMOWANIE

- ▶ W atmosferze najbardziej rozpraszane są najkrótsze fale świetlne, dlatego niebo jest niebieskie.
- ▶ **Tęcza** powstaje w wyniku załamania i rozszczepienia światła słonecznego w kropelkach wody, a **halo** – w kryształkach lodu.
- ▶ **Miraże** powstają w wyniku zmiany kierunku biegu światła w powietrzu o niejednakowej gęstości.

PYTANIA I ZADANIA

1. Lód jest przezroczysty. Dlaczego zatem śnieg jest biały, skoro zbudowany jest z malutkich kryształków lodu?
2. Po której stronie nieba (kierunki geograficzne) zobaczymy tęczę w czerwcu późnym popołudniem?
3. Na zdjęciu widać halo wokół Księżyca. W jakich warunkach ono powstaje?
4. Niebo na Marsie jest czerwone ze względu na inny niż na Ziemi skład atmosfery marsjańskiej i unoszący się pył. Jaki kolor dominuje w świetle zachodzącego na Marsie słońca? Uzasadnij odpowiedź.
5. Zimą można zaobserwować halo wokół Słońca, nawet gdy jest ono nisko nad horyzontem. W którym punkcie, A czy B, powinien stać obserwator? W którym punkcie, C czy D, będzie widział halo?



FALE I OPTYKA

Fala to drgania rozchodzące się w pewnym ośrodku.

Te drgania odbywają się z częstotliwością źródła fali.

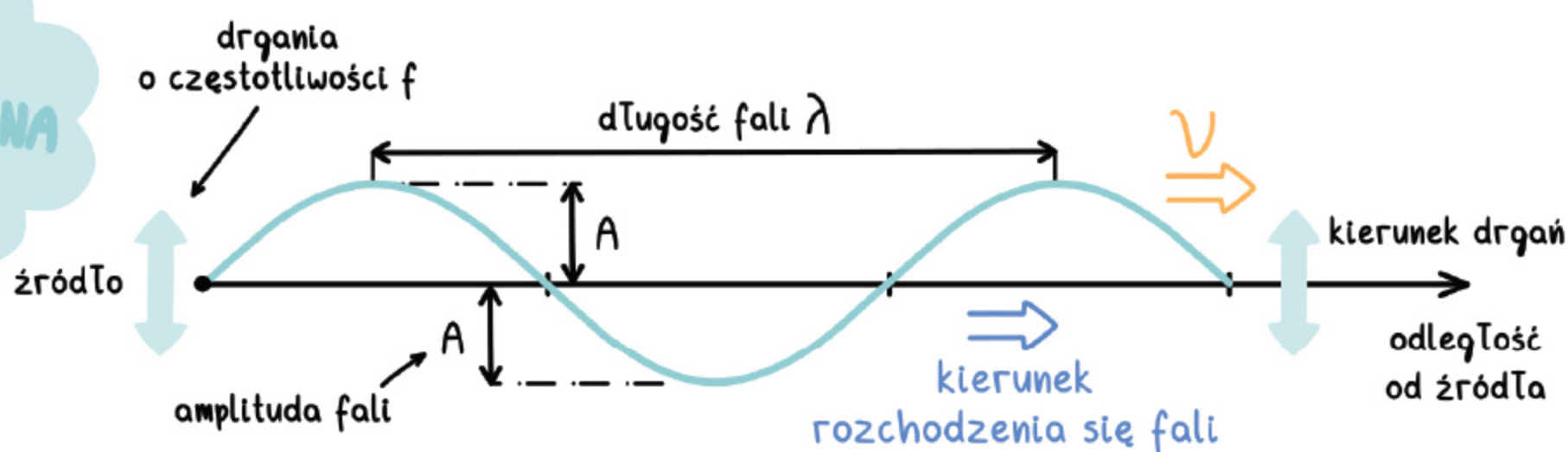
$$v = \lambda \cdot f$$

prędkość fali
(zależy od ośrodka)

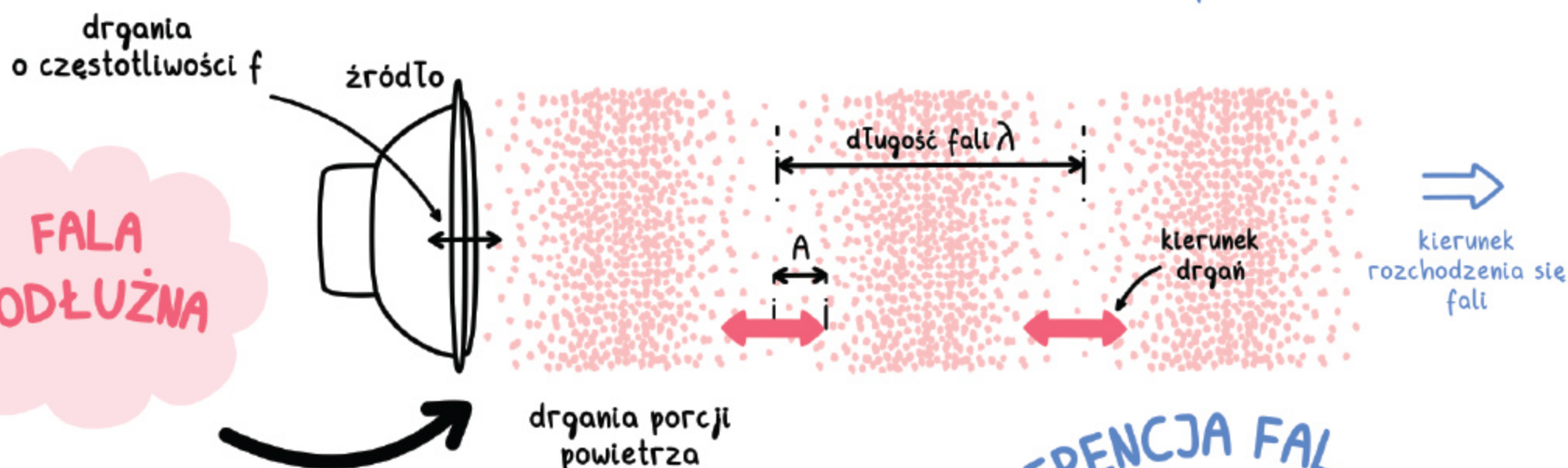
długość fali

częstotliwość fali
(zależy od źródła)

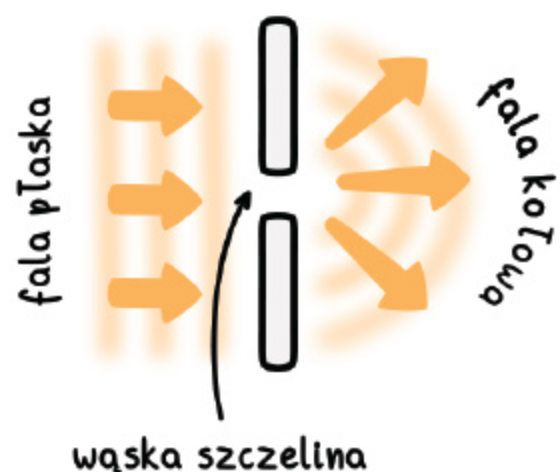
FAŁA POPRZECZNA



FAŁA PODŁUŻNA



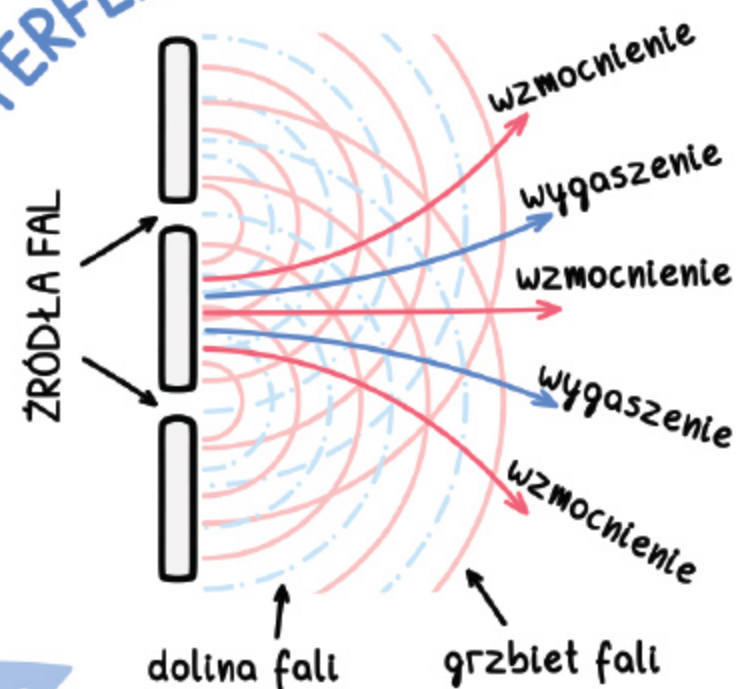
DYFRAKCYJA FAŁI



ZASADA SUPERPOZYCJI

wychylenie punktu, do którego dochodzą dwie fale, jest sumą wychyleń pochodzących od obu fal.

INTERFERENCJA FAŁ



ZJAWISKO DOPPLERA

$$f = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{v}{u}\right)$$

częstotliwość źródła f_0

prędkość źródła v

prędkość fali u

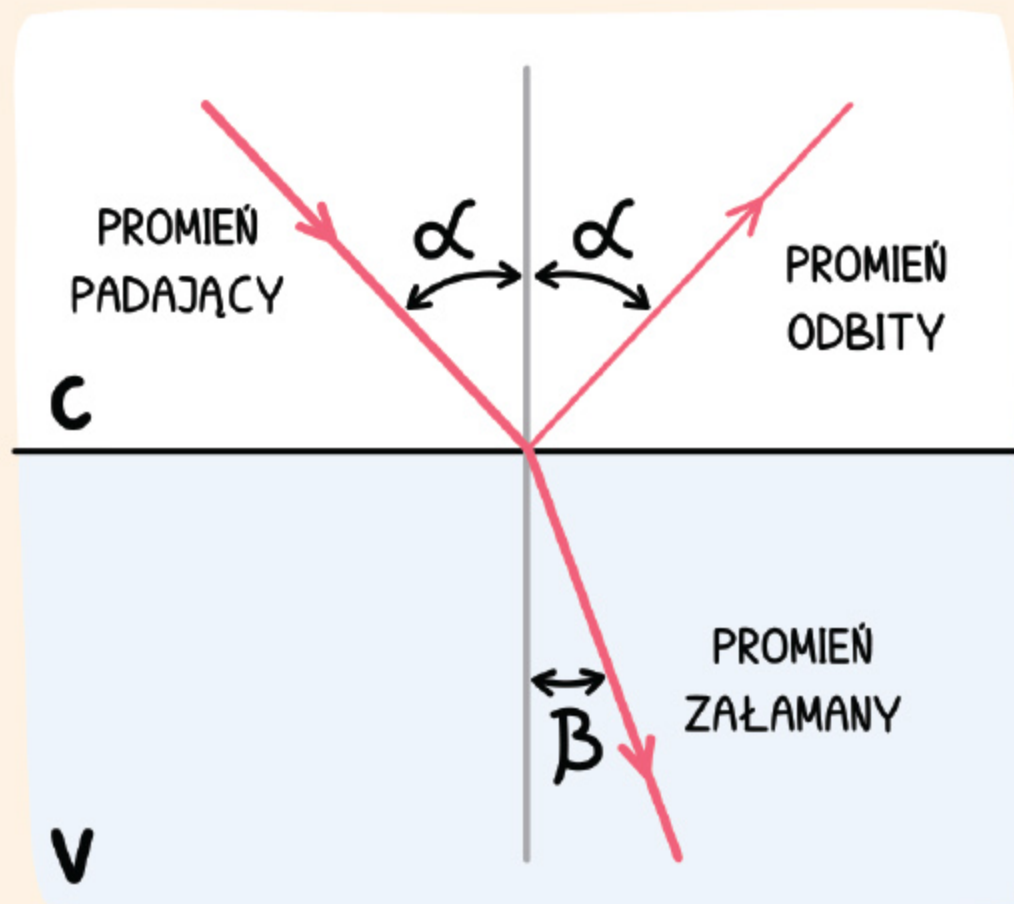
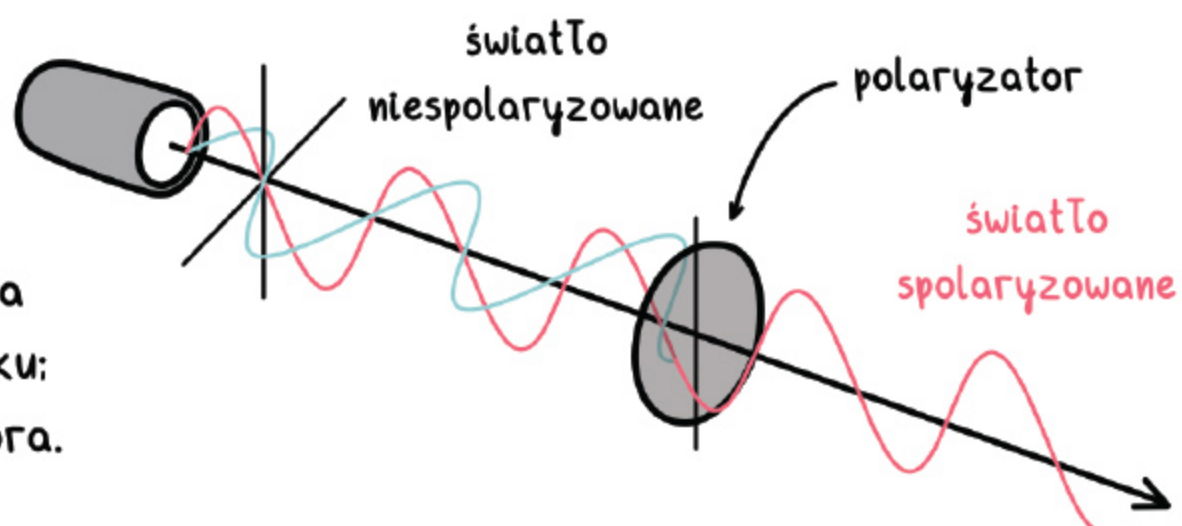
częstotliwość rejestrowana przez obserwatora f



ŚWIATŁO jest falą elektromagnetyczną o długościach od 400 nm do 700 nm.



Fala spolaryzowana to fala poprzeczna o drganiach w ściśle określonym kierunku; można ją uzyskać za pomocą polaryzatora.



PRAWO ODBICIA
kąt odbicia jest równy
kątowni padania

PRAWO ZAŁAMANIA
(dla niewielkich kątów)

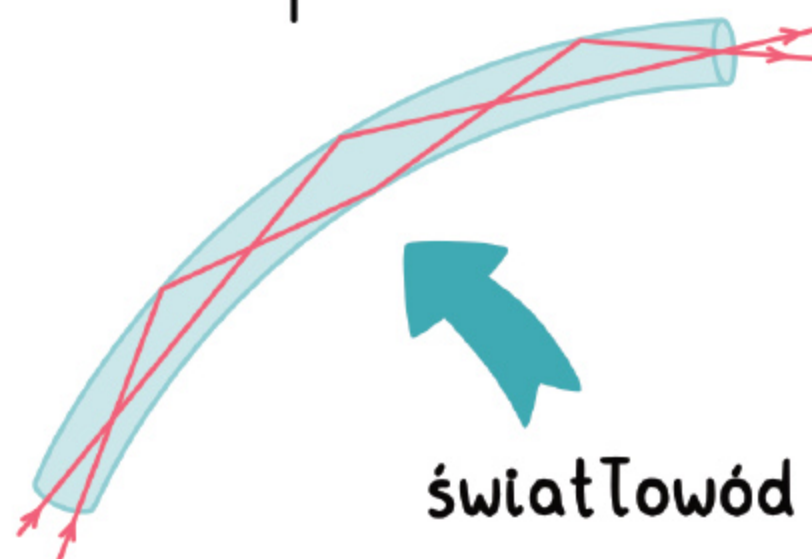
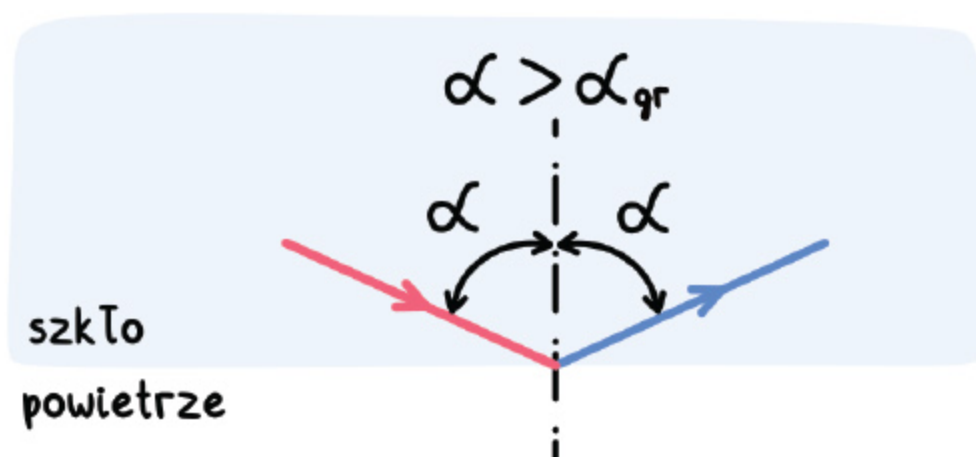
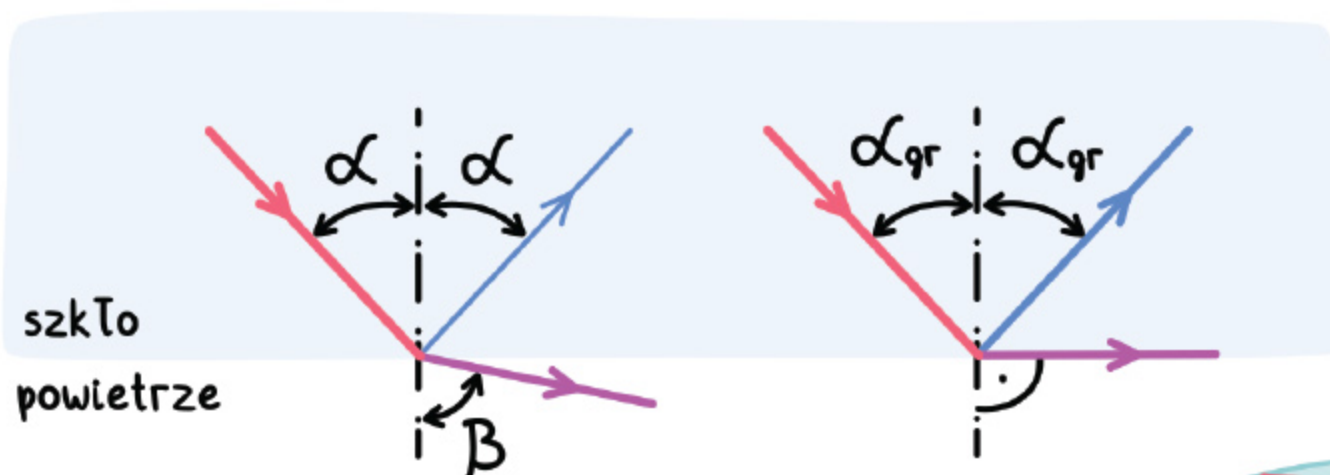
$$\frac{\alpha}{\beta} \approx n$$

WSPÓŁCZYNNIK ZAŁAMANIA

$$n = \frac{c}{v}$$

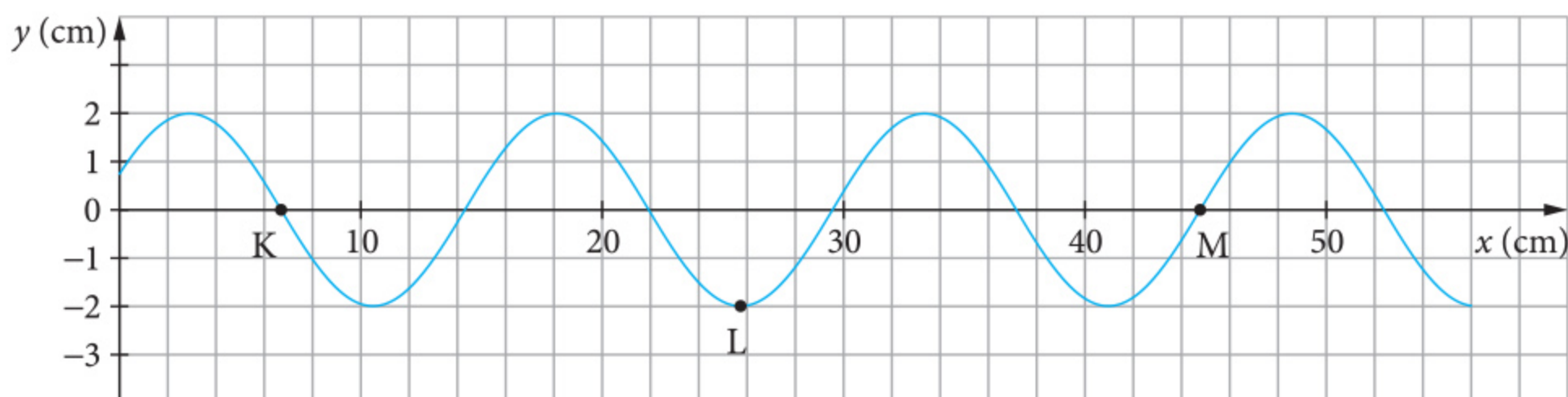
prędkość światła (pointing to c)
prędkość fali (pointing to v)

**CAŁKOWITE
WEWNĘTRZNE
ODBICIE**



PYTANIA I ZADANIA

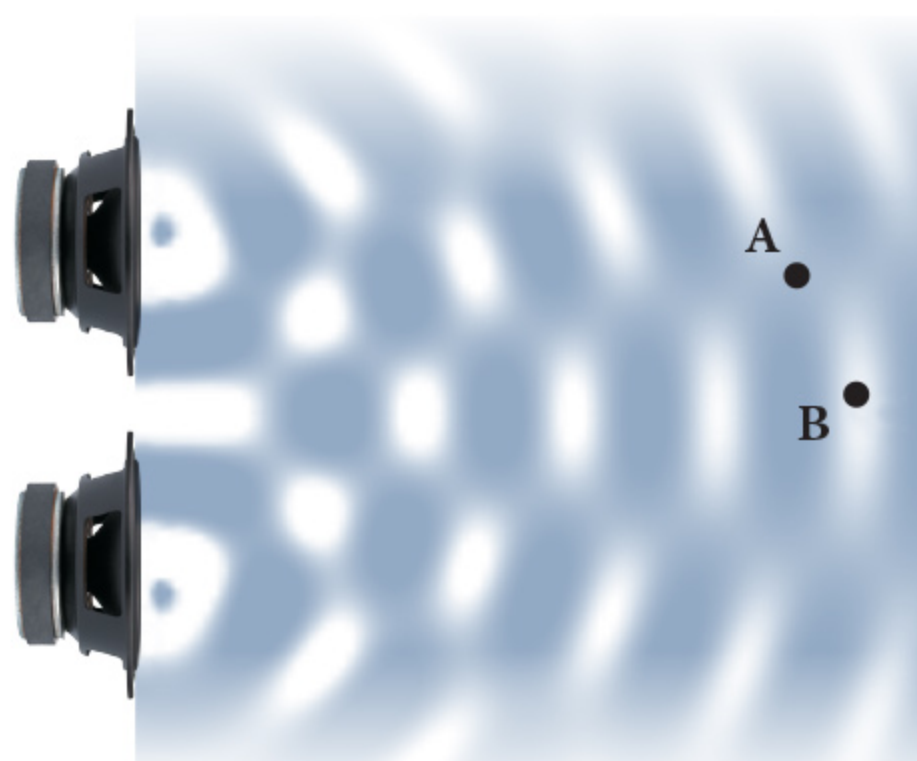
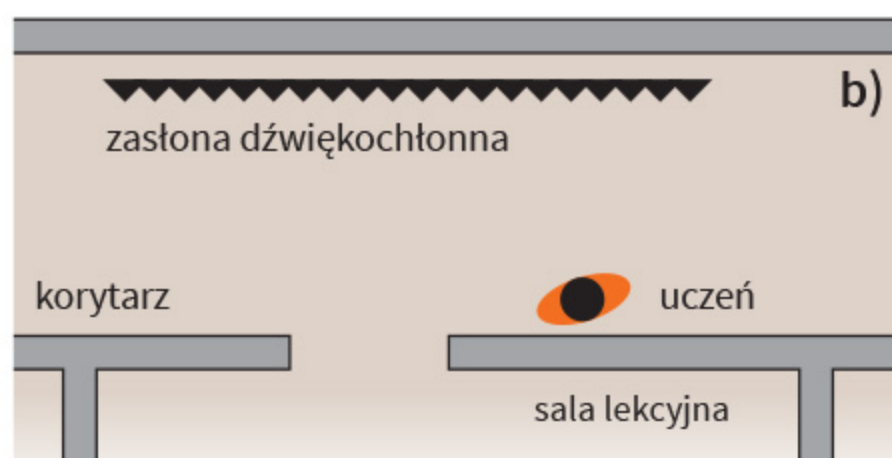
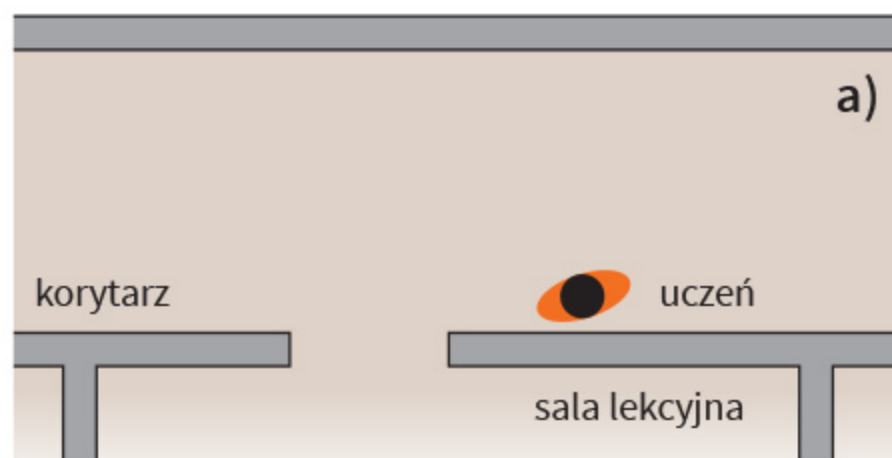
1. Na rysunku przedstawiono falę rozchodzącą się wzdłuż sprężystego sznura w prawo.



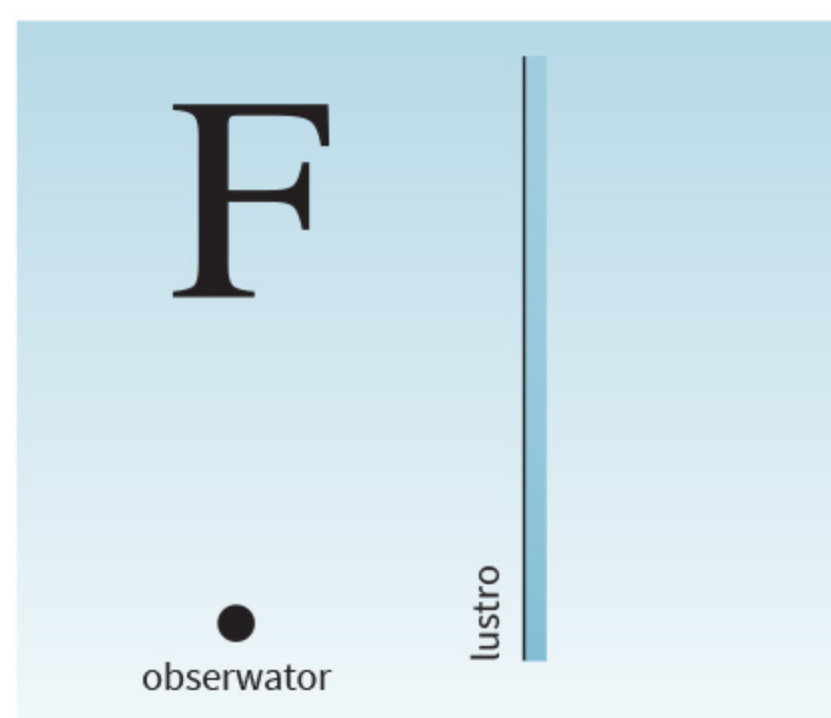
Zaznacz poprawne dokończenie zdania.

Amplituda oraz długość tej fali są równe odpowiednio około

- A. 2 cm oraz 16 cm.
 - B. 16 cm oraz 2 cm.
 - C. 4 cm oraz 32 cm.
 - D. 32 cm oraz 4 cm.
2. Zapisz, w którą stronę będą poruszać się punkty sznura oznaczone w zadaniu 1. literami K, L oraz M w najbliższym czasie.
3. Do zamkniętego przejazdu kolejowego z prędkością 40 m/s zbliża się pociąg. Częstotliwość syreny pociągu jest równa 80 Hz. Oblicz, jaką częstotliwość będzie odbierał obserwator stojący przy przejeździe. Prędkość dźwięku w powietrzu ma wartość 340 m/s.
4. Za otwartymi drzwiami stanął uczeń, który słyszał hałasy dochodzące z sali lekcyjnej (rysunek a). Czy głośność słyszanych dźwięków byłaby taka sama, gdyby na korytarzu znajdowała się dźwiękochłonna zasłona (rysunek b)? Uzasadnij odpowiedź.
5. Na schematycznym rysunku przedstawiono obraz fal dźwiękowych rozchodzących się z dwóch głośników. Zapisz, dlaczego w obszarze A następuje wygaszenie fal, a w obszarze B – wzmocnienie fal.



6. Gdy do szklanki z wodą włożymy prostą słomkę, to wydaje się ona złamana. Wyjaśnij ten efekt. Jakie zjawisko fizyczne jest jego przyczyną?
7. Przed płaskim lustrem ustawiono literę F (patrz rysunek). Przerysuj do zeszytu tę literę i przedstaw jej obraz widziany w lustrze przez obserwatora.



8. **Wybierz właściwe dokończenie zdania spośród A–C oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–2.**

Gdy w jasny dzień patrzymy na budynek, to najciemniejszymi fragmentami ściany tego budynku są z reguły

A.	otwarte okna,	ponieważ	1.	nie odbijają światła.
	pomalowane jasnoszarą farbą ściany,		2.	światło odbite od nich rozchodzi się w wielu kierunkach.
	opuszczone na okna zielone rolety,			

9. Laser emituje światło o częstotliwości $5,6 \cdot 10^{14}$ Hz.

Zaznacz poprawne dokończenie zdania

Opisany laser świeci światłem

- A. czerwonym.
B. białym.
C. zielonym.
D. niebieskim.

10. Światłowód to zazwyczaj cienki plastikowy pręcik służący do przenoszenia światła po zagiętym torze.

Oceń prawdziwość zdań. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe.

1.	Wąski, jednorodny strumień wody również może stanowić światłowód.	P	F
2.	Przez światłowód może biec wyłącznie światło, którego źródłem jest laser.	P	F
3.	Podstawą działania światłowodu jest zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia.	P	F

NAJWAŻNIEJSZE POJĘCIA W DZIALE

- amplituda fali [*wave's amplitude*] 54
- barwa dźwięku [*timbre*] 61
- całkowite wewnętrzne odbicie [*total internal reflection*] 110–111
- częstotliwość fali [*wave's frequency*] 55, 56, 66
- długość fali [*wavelength*] 54, 56
- dyfrakcja [*diffraction*] 74–76
- fala dźwiękowa [*sound wave*] 50, 60
- fala elektromagnetyczna [*electromagnetic wave*] 90–91
- fala kołowa [*circular wave*] 48
- fala kulista [*spherical wave*] 48
- fala na wodzie [*wave on water*] 51
- fala płaska [*flat wave*] 49
- fala podłużna [*longitudinal wave*] 50, 61
- fala poprzeczna [*transverse wave*] 50
- fala stojąca [*standing wave*] 84–87
- fala uderzeniowa [*shockwave*] 70–71
- głośność dźwięku [*sound volume*] 61
- infradźwięki [*infrasonics*] 61
- interferencja [*interference*] 82–83, 100
- miraż [*mirage*] 119–121
- odbicie światła [*light reflection*] 96–98
- poziom natężenia dźwięku [*sound intensity level*] 63
- prawo załamania światła [*the law of refraction*] 102–106
- prędkość fali [*wave's velocity*] 54, 56
- rozpraszanie fal [*wave scattering*] 79–80, 94, 116
- światłowód [*optical fiber*] 112
- ultradźwięki [*ultrasonics*] 61
- wysokość dźwięku [*pitch*] 61, 66
- zasada superpozycji [*superposition principal*] 77
- zjawisko Dopplera [*Doppler effect*] 66, 68, 69





TERMODYNAMIKA

Czemu na nizinach jest cieplej niż w górach, choć te są bliżej Słońca? A czemu wewnątrz auta jest w słoneczny dzień dużo cieplej niż na zewnątrz? Na takie pytania – i na wiele innych - odpowiada TERMODYNAMIKA.





17. Cząsteczkowa budowa materii

- Cząsteczkowa budowa materii
- Dyfuzja
- Energia wewnętrzna



→ **Przypomnij sobie**, co to jest energia kinetyczna i energia potencjalna.

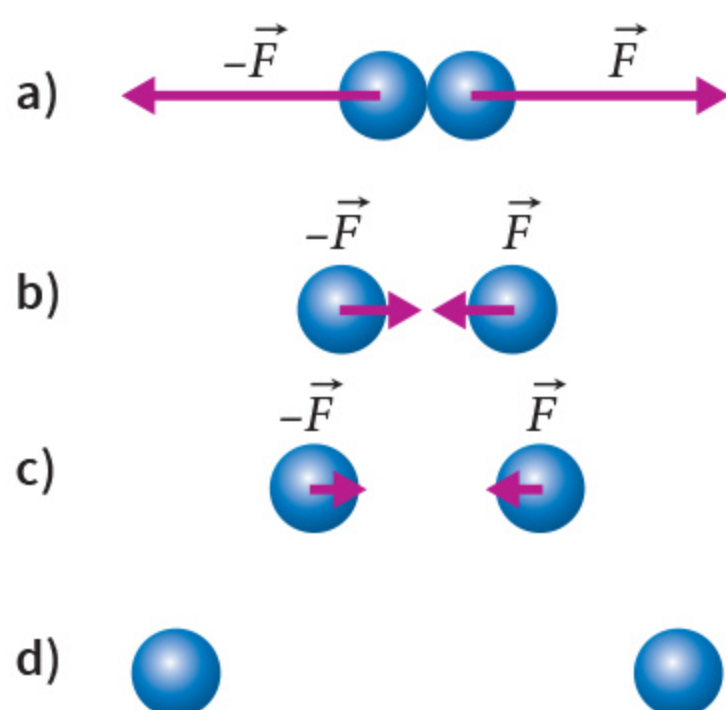
Termodynamika to dział fizyki zajmujący się zjawiskami cieplnymi. Dzięki badaniom prowadzonym w ramach tej dziedziny wiemy dziś, że zjawiska cieplne są bezpośrednio związane z budową cząsteczkową materii, a dokładniej – z ruchem i energią cząsteczek. Dzięki nim wiemy też, w jaki sposób oddziaływania między cząsteczkami wpływają na stan skupienia oraz inne własności ciał.

Cząsteczkowa budowa materii

s. 130

Wszystkie otaczające nas ciała składają się z cząsteczek, które z kolei są zbudowane z atomów. **Cząsteczki są bardzo małe, lecz w każdym ciele jest ich niewyobrażalnie dużo. Od ich ruchu oraz oddziaływania między nimi zależą niemal wszystkie własności ciał.**

Przyjrzyjmy się choćby powietrzu, czyli mieszaninie składającej się głównie z cząsteczek azotu (N_2) i tlenu (O_2). Tych cząsteczek jest bardzo dużo, nawet w niewielkiej objętości. Z prostych obserwacji wiemy, że powietrze można łatwo ścisnąć, np. w strzykawce lub pompce z zamkniętym wylotem. Wynika stąd, że między cząsteczkami w gazach jest dużo pustej przestrzeni. Ciecze i ciała stałe bez porównania trudniej jest ścisnąć. Można stąd wywnioskować, że cząsteczki w tych ciałach są znacznie gęściej upakowane (ryc. 17.2).



Ryc. 17.1. Zależność sił między cząsteczkami od wzajemnej odległości cząsteczek

W każdym atomie są ładunki dodatnie i ujemne. Wobec tego atomy i cząsteczki działają na siebie siłami elektrycznymi i to o szczególnych własnościach. Gdy znajdują się bardzo blisko siebie – silnie się odpychają (ryc. 17.1a) i właśnie dlatego ciecze i ciała stałe trudno ścisnąć. Jednak gdy odległość między cząsteczkami wzrośnie, zaczynają się przyciągać (ryc. 17.1b i c). Z tej przyczyny ciała stałe trudno rozciągnąć, a ciecze tworzą krople. Siły między cząsteczkami bardzo szybko maleją z odległością – przy odległości kilkakrotnie większej od rozmiarów cząsteczek są już pomijalnie małe (ryc. 17.1d). Dlatego cząsteczki w gazach poza momentami zderzeń nie oddziałują ze sobą nawzajem.

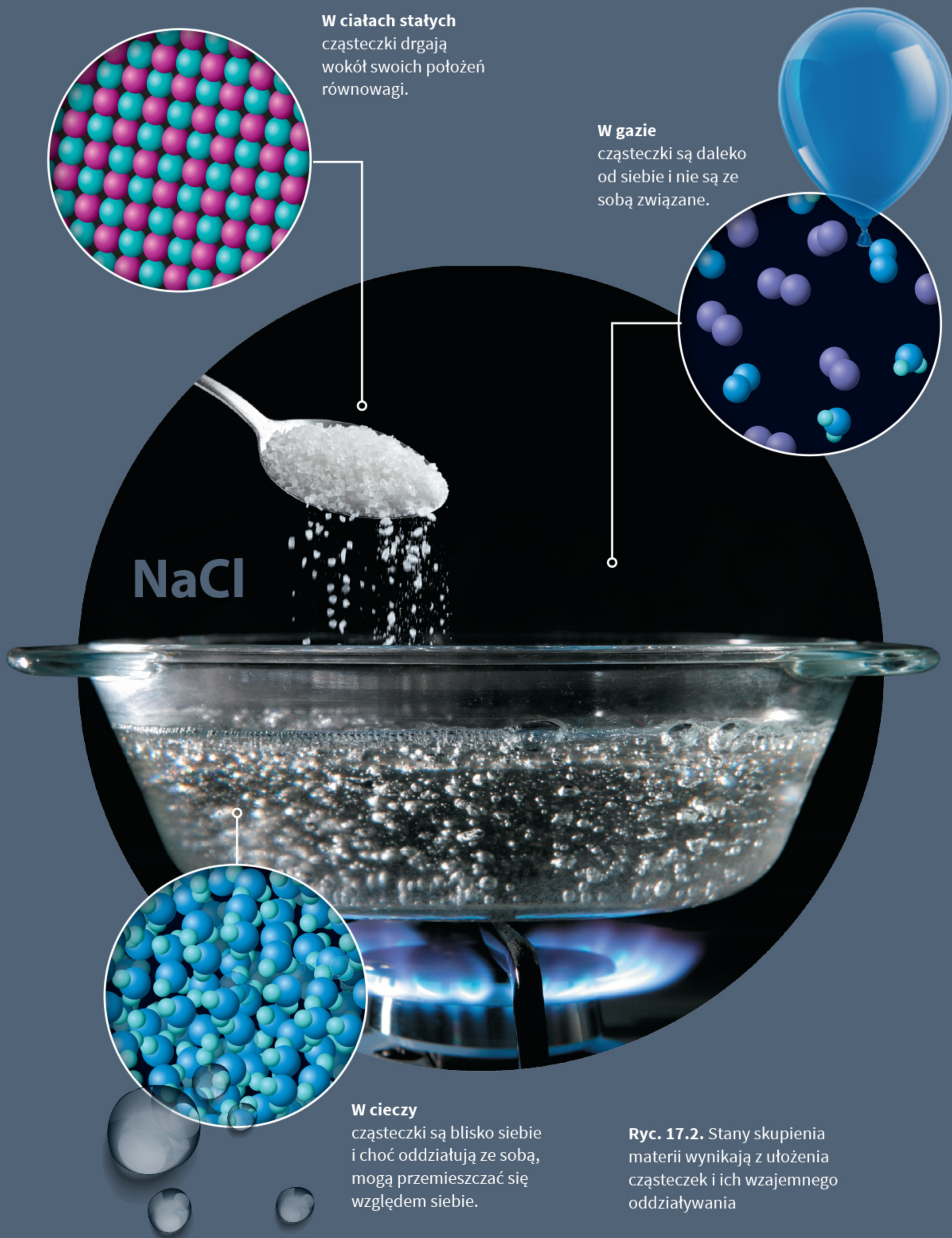
W ciałach stałych
cząsteczki drgają
wokół swoich położeń
równowagi.

W gazie
cząsteczki są daleko
od siebie i nie są ze
sobą związane.

NaCl

W cieczy
cząsteczki są blisko siebie
i choć oddziałują ze sobą,
mogą przemieszczać się
względem siebie.

Ryc. 17.2. Stany skupienia
materii wynikają z ułożenia
cząsteczek i ich wzajemnego
oddziaływania



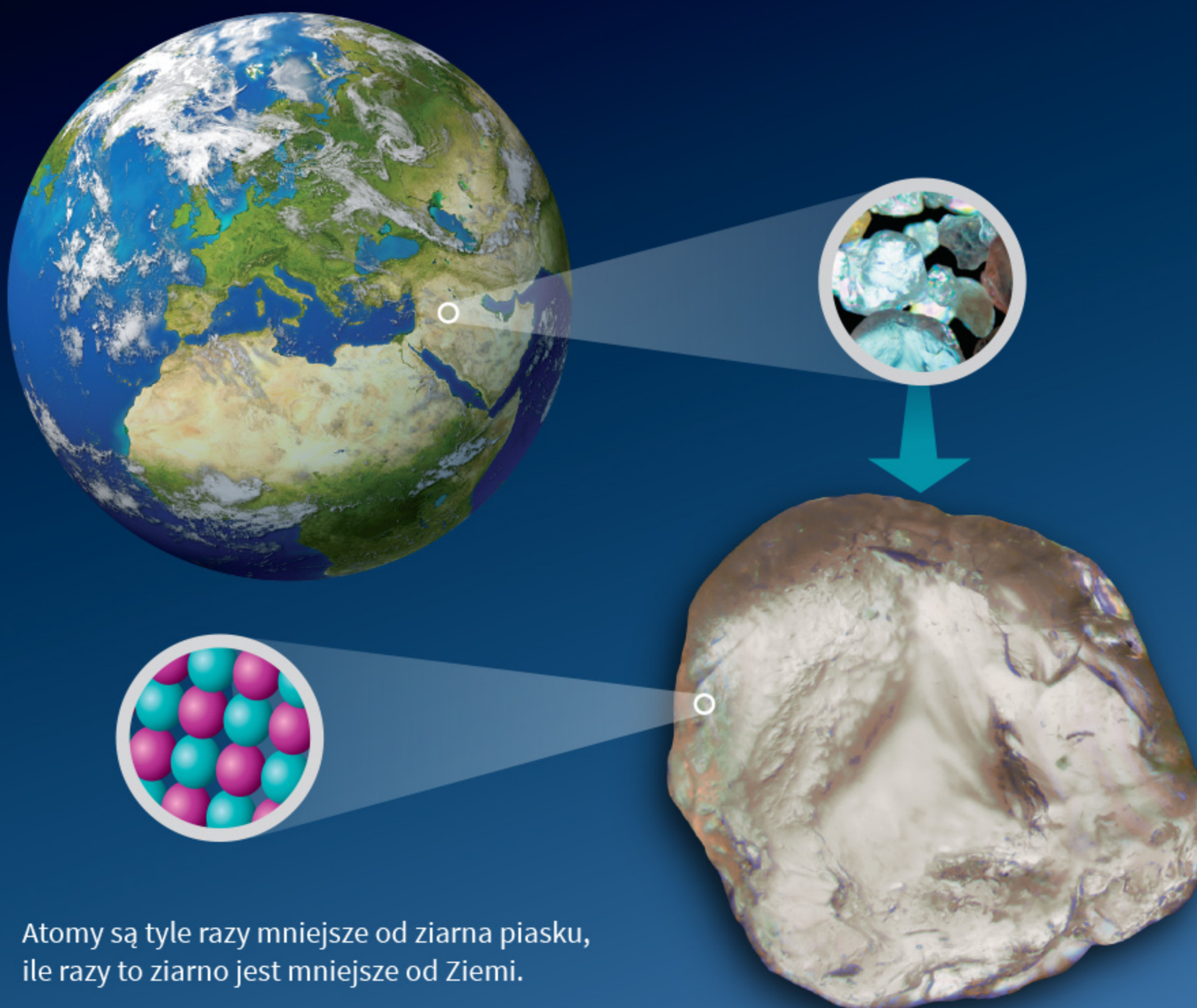
Siły o własnościach takich jak przedstawione na rycinie 17.1 są przyczyną drgań cząsteczek w ciałach stałych i cieczech. W cieczech cząsteczki mogą także „wędrować” po całej dostępnej im objętości. W gazach odległości między cząsteczkami są duże, więc pomiędzy zderzeniami cząsteczki poruszają się w przybliżeniu ruchem jednostajnym.



WARTO WIEDZIEĆ

Świat cząsteczek w liczbach

W pokoju o powierzchni 15 m^2 powietrze składa się z prawie 10^{27} (miliarda miliardów miliardów) cząsteczek. Gdyby usuwać co sekundę miliard z nich, do całkowitego opróżnienia pokoju potrzebny byłby czas dłuższy od czasu istnienia Wszechświata! Cząsteczki mają rozmiary rzędu 10^{-10} m . Pojedyncza cząsteczka porusza się ze średnią prędkością około $0,5 \text{ km/s}$, jednak między kolejnymi zderzeniami pokonuje średnio drogę zaledwie $6 \cdot 10^{-8} \text{ m}$.



Atomy są tyle razy mniejsze od ziarna piasku, ile razy to ziarno jest mniejsze od Ziemi.



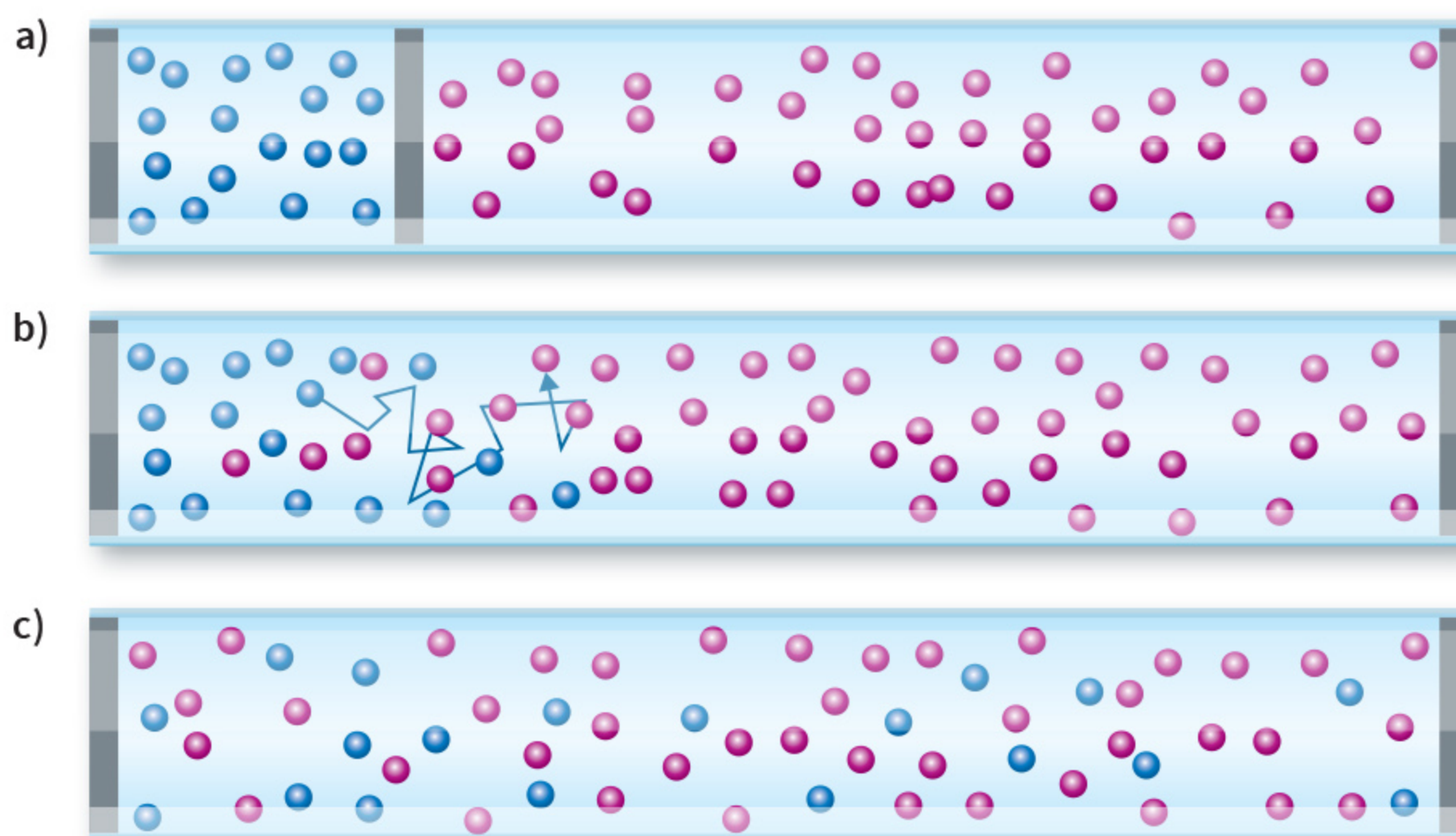
Dyfuzja

Z powodu chaotycznego ruchu ogromnej liczby cząsteczek gazy wypełniają niemal natychmiast całą dostępną przestrzeń. Z tego samego powodu różne gazy i ciecze mieszają się ze sobą.



Ryc. 17.3. Dyfuzja herbaty w zimnej wodzie. Fotografie zostały wykonane w odstępie 2,5 godziny

Dyfuzja to proces rozprzestrzeniania się cząsteczek wskutek nieustannych wzajemnych zderzeń.



Ryc. 17.4. a) Dwa gazy oddzielone przegrodą. b) Po usunięciu przegrody cząsteczki się mieszają. c) Stan końcowy to mieszanina, w której cząsteczki obu gazów rozmieszczone są równomiernie

Proces mieszania się gazów został zilustrowany na rycinie 17.4. Po usunięciu przegrody oddzielającej dwa różne gazy cząsteczki wskutek zderzeń przemieszczają się i wypełniają równomiernie całą dostępną przestrzeń. W końcowym stanie równowagi stężenie każdego gazu jest w całym naczyniu takie samo, choć stężenie jednego z nich może się różnić od stężenia drugiego.

Dyfuzja najszybciej zachodzi w gazach. W cieczach cząsteczki są blisko siebie, więc trudniej im się przemieszczać. Z tego powodu dyfuzja w cieczach zachodzi wolniej niż



w gazach. W ciałach stałych cząsteczki drgają wokół swoich położeń równowagi, ale czasem mogą przeskoczyć w inne miejsce. Dlatego dyfuzja również zachodzi w ciałach stałych, jednak przebiega w nich zdecydowanie najwolniej i dlatego jej skutki można zaobserwować dopiero po bardzo długim czasie. Jednak nawet w gazach dyfuzja zachodzi powoli. Na tyle powoli, że na stacji kosmicznej cały czas działają wentylatory wyrównujące stężenie składników powietrza. Z kolei **za jednakowe stężenie tlenu w naszych mieszkaniach odpowiadają ruchy makroskopowych porcji powietrza (konwekcja).**

DOŚWIADCZENIE 1.

Do szklanki z zimną wodą włóż torebkę herbaty. Obserwuj (możesz robić zdjęcia) sytuacji co godzinę. Oszacuj prędkość rozchodzenia się zabarwionej wody w wyniku dyfuzji.

Zależność temperatury od energii cząsteczek

Pierwszy precyzyjny termometr skonstruował w Holandii na początku XVIII wieku pochodzący z Gdańska uczony Daniel Fahrenheit. Dopiero dwieście lat później fizycy odkryli, co właściwie mierzy termometr, czyli jaki sens fizyczny ma temperatura. Temperatura ciała jest związana ze **średnią energią kinetyczną cząsteczek ciała. Im większa energia kinetyczna chaotycznego ruchu cząsteczek ciała, tym wyższa jest jego temperatura.**

Średnia energia kinetyczna pojedynczej cząsteczki jest wprost proporcjonalna do temperatury ciała wyrażonej w skali Kelvina.

Wobec tego zarówno cząsteczki tlenu lub azotu w powietrzu, jak i cząsteczki, z których zbudowane jest biurko lub ściany pokoju, mają tę samą średnią energię kinetyczną, o ile temperatura powietrza, biurka i ścian jest taka sama.

Przypomnijmy zależność między wartościami temperatury w skali Kelvina i Celsjusza:

$$T = t + 273 \quad (1)$$

gdzie:

T – temperatura w skali Kelvina, wyrażana w kelwinach (K),

t – temperatura w skali Celsjusza, wyrażana w stopniach Celsjusza ($^{\circ}\text{C}$).

Przyrosty temperatur wyrażone w obu skalach są identyczne:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = t_2 + 273 - (t_1 + 273) = t_2 - t_1 = \Delta t$$

Oznacza to, że na przykład zmiana temperatury o 2 K to zmiana o 2 $^{\circ}\text{C}$.

Jaką energię kinetyczną miałyby cząsteczki ciała o temperaturze -273°C , czyli 0 K? Byłaby ona równa zeru, co oznaczałoby bezruch wszystkich cząsteczek. Czy jest możliwa jeszcze niższa temperatura? Nie, gdyż energia kinetyczna nie może być ujemna. Stąd wniosek, że zero w skali Kelvina to tzw. **zero bezwzględne**, czyli najniższa możliwa temperatura.

PRZYKŁAD 1.

Sprawdźmy, o ile procent szybsze są cząsteczki wrzącej wody od cząsteczek wody zamarzającej.

Temperatura wrzącej wody wyrażona w skali Kelvina:

$$T_w = (100 + 273) \text{ K} = 373 \text{ K}$$

Temperatura zamarzającej wody w tej samej skali:

$$T_z = (0 + 273) \text{ K} = 273 \text{ K}$$

Stosunek średnich energii kinetycznych cząsteczek jest równy stosunkowi temperatur w skali Kelvina. Wobec tego:

$$\frac{E_w}{E_z} = \frac{T_w}{T_z} = \frac{373 \text{ K}}{273 \text{ K}} \approx 1,37$$

Cząsteczki wrzącej wody mają średnią energię kinetyczną większą mniej więcej o 37 % od cząsteczek wody zamarzającej. Jednak stosunek prędkości jest inny, bo:

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

Zatem stosunek energii kinetycznych jest równy stosunkowi kwadratów prędkości:

$$\frac{E_w}{E_z} = \frac{\frac{1}{2}mv_w^2}{\frac{1}{2}mv_z^2} = \frac{v_w^2}{v_z^2} \approx 1,37$$

Po wyciągnięciu pierwiastka z obu stron równania otrzymamy szukany stosunek prędkości:

$$\frac{v_w}{v_z} \approx 1,17$$

Średnia wartość prędkości cząsteczek wrzącej wody jest mniej więcej o 17 % większa od średniej wartości prędkości cząsteczek zamarzającej wody.

Energia wewnętrzna

Do tej pory podczas rozważań dotyczących energii ciała nie wnikaliśmy w jego strukturę wewnętrzną. Energia mechaniczna – suma energii kinetycznej i potencjalnej – to energia ciała jako całości. Jednak każde ciało jest złożone z poruszających się i oddziałujących ze sobą cząsteczek, które również mają energię.

Energia wewnętrzna ciała to suma energii wszystkich cząsteczek tego ciała.

Chodzi tu o energię cząsteczek ciała, która nie zależy od stanu ruchu tego ciała i jego oddziaływania z innymi ciałami. Można powiedzieć obrazowo, że energia wewnętrzna ciała to energia ukryta w jego wnętrzu.

W tym dziale omówimy zwłaszcza tę część energii wewnętrznej, która ulega przemianom w tzw. zjawiskach cieplnych. Jest to energia kinetyczna cząsteczek, bezpośrednio związana z temperaturą ciała, oraz energia potencjalna oddziaływań między cząsteczkami w cieczech i ciałach stałych.

PRZYKŁAD 2.

Porównajmy energię kinetyczną wszystkich cząsteczek wody o temperaturze 80 °C w szklance (250 ml) oraz wody o temperaturze 20 °C w misce (5 l).

Obie porcje wody różnią się temperaturą i liczbą cząsteczek. Określmy stosunek energii kinetycznych wszystkich cząsteczek obu porcji wody. Ta energia jest wprost proporcjonalna do liczby cząsteczek, a więc i objętości wody, oraz do średniej energii kinetycznej pojedynczej cząsteczki, czyli także do temperatury w skali Kelvina. Wobec tego:

$$\frac{E_{km}}{E_{ks}} = \frac{5 \text{ l}}{0,25 \text{ l}} \cdot \frac{(273 + 20) \text{ K}}{(273 + 80) \text{ K}} \approx 20 \cdot 0,83 \approx 17$$

Energia kinetyczna wszystkich cząsteczek wody w misce jest siedemnaście razy większa od energii kinetycznej cząsteczek gorącej wody w szklance.

Analogiczne porównanie energii potencjalnej cząsteczek byłoby dużo trudniejsze i wykraczałoby poza zagadnienia omawiane w tym podręczniku.

**PODSUMOWANIE**

- ▶ Wszystkie ciała składają się z cząsteczek. Cząsteczki są w nieustannym ruchu i oddziałują ze sobą tylko w odległościach porównywalnych z ich rozmiarami.
- ▶ Średnia energia kinetyczna pojedynczej cząsteczki jest wprost proporcjonalna do temperatury ciała wyrażonej w skali Kelvina.
- ▶ **Energia wewnętrzna** ciała to suma energii wszystkich cząsteczek tego ciała.
- ▶ **Dyfuzja** to chaotyczne rozprzestrzenianie się cząsteczek danej substancji wskutek nieustannych wzajemnych zderzeń.



PYTANIA I ZADANIA

1. Cząsteczki wody i pary wodnej są takie same. Wyjaśnij, dlaczego te same cząsteczki mogą tworzyć gaz lub skupiać się w krople cieczy. Wskazówka: rozważ własności sił i różnice odległości między cząsteczkami w cieczy i gazie.
2. Wyjaśnij, dlaczego tempo dyfuzji rośnie wraz z temperaturą.
3. Temperatura wrzenia ciekłego helu wynosi około 4 K. Wyraż tę temperaturę w skali Celsjusza.
4. W naczyniu mamy mieszaninę wody i lodu o temperaturze 0 °C. Czy średnia energia kinetyczna cząsteczek wody jest większa od średniej energii kinetycznej cząsteczek lodu? Uzasadnij odpowiedź.



5. Cząsteczka tlenu ma masę 32 u, a azotu 28 u (u – jednostka masy atomowej). O ile procent różnią się średnie wartości prędkości cząsteczek azotu i cząsteczek tlenu w powietrzu? Czy ta różnica zależy od temperatury powietrza?



18. Rozszerzalność cieplna

- Rozszerzalność cieplna ciał stałych, cieczy i gazów
- Zastosowanie zjawiska rozszerzalności cieplnej

→ **Przypomnij sobie** wiadomości o cząsteczkowej budowie materii oraz o tym, czym jest temperatura.

Temperatura ciała jest ściśle związana ze średnią energią kinetyczną ruchu cząsteczek. Do pomiaru temperatury wykorzystujemy termometr. Pierwsze termometry, podobnie jak wiele tych stosowanych współcześnie, wykorzystywały zjawisko rozszerzalności cieplnej cieczy. Polega ono na tym, że wraz ze wzrostem temperatury w niewielkim stopniu zwiększa się objętość cieczy. Podobnie dzieje się w przypadku ciał stałych i gazów.

Rozszerzalność cieplna cieczy i gazów

Cząsteczki cieczy stykają się ze sobą i są w bezustannym ruchu. Ruch ten jest złożony: cząsteczki drgają i jednocześnie powoli wędrują po całej objętości cieczy. Wraz ze wzrostem temperatury zwiększa się energia ruchu drgającego cząsteczek, a zatem wzrasta amplituda ich drgań. Wskutek tego średnie odległości między cząsteczkami nieco się zwiększają, co powoduje niewielki wzrost objętości cieczy. Jeśli chcemy go zaobserwować, możemy pojemniczek wypełniony cieczą połączyć z bardzo wąską rurką. Poziom cieczy w rurce podniesie się w widoczny sposób wraz ze wzrostem temperatury, choć wzrost objętości cieczy w naczyniu będzie nieznaczny. Tak właśnie zbudowane są termometry cieczowe (ryc. 18.1). Okazuje się, że zmiana objętości cieczy jest na ogół wprost proporcjonalna do zmiany temperatury. Właśnie dlatego skala na termometrze cieczowym jest liniowa.



Ryc. 18.1. Termometr cieczowy. Poziom cieczy w wąskiej rurce podnosi się w wyniku wzrostu objętości cieczy w pojemniku

DOŚWIADCZENIE 1.

Do dużej plastikowej butelki (np. po wodzie mineralnej) wlej ciepłą wodę po sam korek, tak aby nie zostawić powietrza pod zakrętką. Zakręć dobrze butelkę i pozostaw do ostygnięcia. Jak zmienił się wygląd butelki, gdy woda w niej ostygła? Wyjaśnij to zjawisko. Czy gdyby w butelce zostawić nieco powietrza, efekt byłby podobny?

Odkręć delikatnie butelkę, tak żeby nie wylać wody, i ponaciskaj ją trochę, aby wróciła do pierwotnego kształtu. Oszacuj, o ile procent zmieniła się objętość wody w butelce (możesz w tym celu wykorzystać strzykawkę).

Gazy wypełniają całkowicie objętość naczynia, w którym się znajdują. Łatwo jest więc zmienić objętość gazu poprzez zmianę objętości naczynia. Gdy rośnie temperatura gazu, cząsteczki poruszają się coraz szybciej, a więc podczas zderzeń oddziałują większą siłą na ścianki naczynia lub przedmiotów zanurzonych w gazie. To powoduje wzrost ciśnienia. Jeśli chcemy zachować to samo ciśnienie gazu przy wyższej temperaturze, należy zwiększyć objętość gazu. Dzięki temu zderzenia będą rzadsze, więc mniejsza siła będzie działać na ścianki naczynia. W warunkach zapewniających stałe ciśnienie wzrost temperatury gazu powoduje wzrost jego objętości (ryc. 18.2).



Ryc. 18.2. Zbiornik na gaz składa się z dwóch części, z których górna unosi się lub opada w zależności od ilości gazu w zbiorniku i jego temperatury. Takie rozwiązanie zapewnia stałe ciśnienie gazu w sieci

DOŚWIADCZENIE 2.

Pustą butelkę z cienkiego plastiku, stojącą dłuższy czas w temperaturze pokojowej, zakręć szczelnie i wstaw do lodówki. Wyjaśnij zmianę wyglądu butelki po ochłodzeniu.

Rozszerzalność cieplna ciał stałych

Ciała stałe mają swój kształt i rozmiary. Wzrost objętości ciała stałego wynikający ze wzrostu temperatury oznacza zwiększenie wymiarów ciała. Staje się ono dłuższe, wyższe i szersze. Mechanizm tego zjawiska jest taki sam jak w cieczech. W wyniku wzrostu amplitudy drgań średnie odległości między cząsteczkami się zwiększają. Mówimy wtedy o rozszerzalności liniowej ciał stałych.

Z doświadczeń wynika, że przyrost długości dowolnego wymiaru ciała jest w przybliżeniu wprost proporcjonalny do przyrostu temperatury. Te zmiany długości nie są znaczne: metrowy pręt stalowy wydłuży się mniej więcej o 1 mm przy wzroście temperatury o 80°C. Dla dłuższych prętów wydłużenie będzie proporcjonalnie większe. Z tego powodu jesteśmy w stanie zaobserwować zmiany długości ciał stałych tylko dla długich obiektów, jak np. przęsła mostów (ryc. 18.3).

Przyrost długości możemy obliczyć ze wzoru:

$$\Delta l = \alpha l \Delta t$$

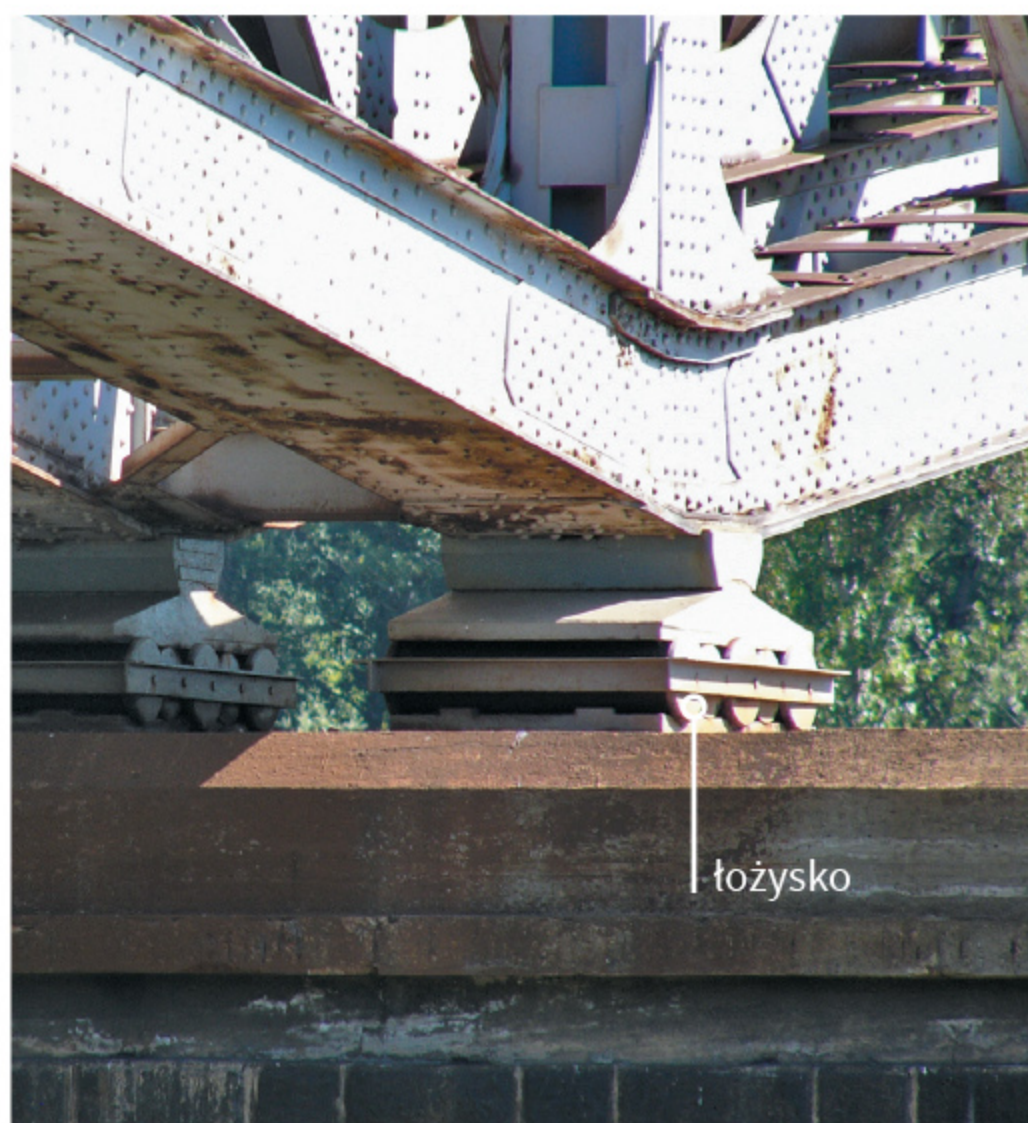
gdzie:

Δl – przyrost długości,

l – długość początkowa,

Δt – przyrost temperatury,

α – współczynnik rozszerzalności liniowej substancji.



Ryc. 18.3. Szczeliny dylatacyjne na końcu przęsła mostu i łożyska, na których przęsło jest osadzone, zapewniają swobodną zmianę długości związaną ze zmianami temperatury

PRZYKŁAD 1.

Współczynnik rozszerzalności liniowej betonu wynosi $0,029 \frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$. To oznacza, że płyta betonowa o długości 1 m wydłuży się o 0,029 mm przy wzroście temperatury o 1°C .

Dagmara mieszka w bloku na dziesiątym piętrze. Jej pokój znajduje się około 30 m nad ziemią. W jakim zakresie w ciągu roku zmienia się wysokość podłogi w jej pokoju?

Przyjmijmy, że temperatura zimą jest równa -20°C , a latem 30°C . Zmiana temperatury wynosi 50°C , a betonowa ściana ma 30 m wysokości, więc zmiana jej długości jest równa:

$$\Delta l = \alpha l \Delta t = 0,029 \frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 30 \text{ m} \cdot 50^\circ\text{C} = 43,5 \text{ mm}$$

Zmiana wysokości tej części budynku wynosi około 4 cm, zatem – choć mierzalna – raczej nie da się łatwo zaobserwować. W rzeczywistości zmiany wysokości są jeszcze mniejsze, gdyż budynek zimą jest ogrzewany, więc jego temperatura nigdy nie spadnie do -20°C , zaś latem nie nagrzeje się on w całości do 30°C .

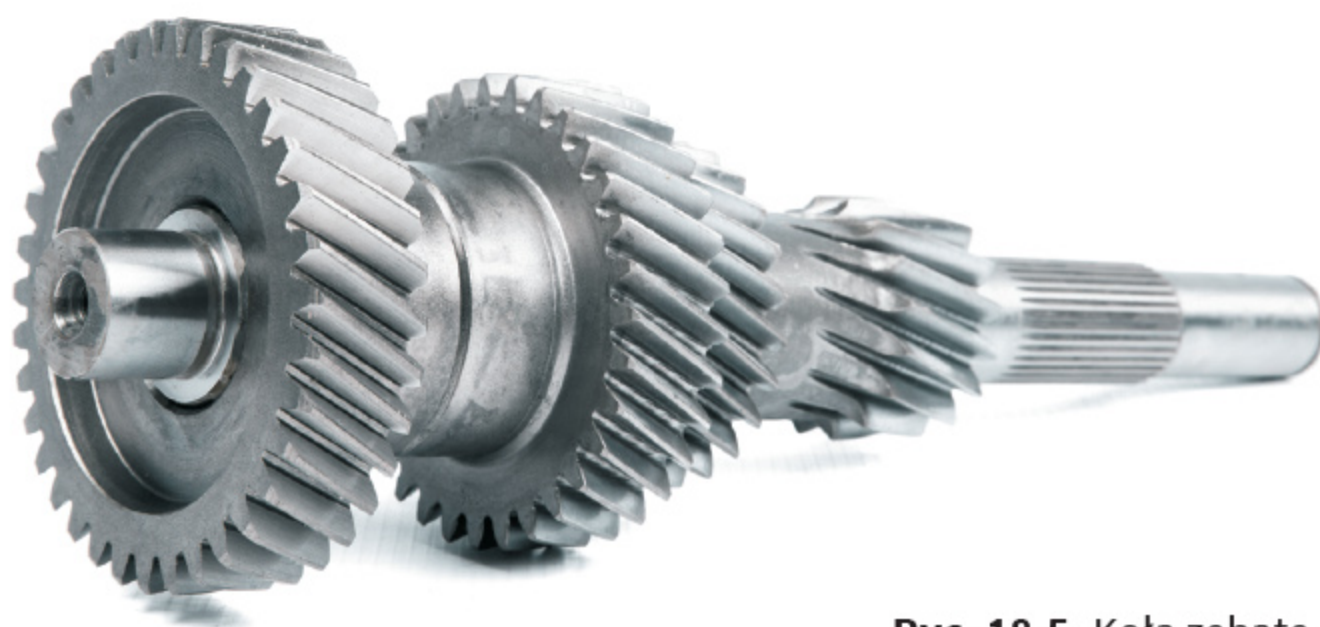
Rozszerzalność cieplna ciał stałych stanowi problem dla budowniczych i konstruktorów, szczególnie w przypadku, gdy elementy są mocno dopasowane lub bardzo długie. Dlatego w budownictwie stosuje się tzw. szczeliny dylatacyjne, najczęściej wypełnione specjalną masą plastyczną, zapewniające swobodne zmiany rozmiarów elementów. Brak takich szczelin powodowałby bardzo duże naprężenia w elementach budowli, co mogłoby prowadzić do jej uszkodzenia (ryc. 18.4).



Ryc. 18.4. Podczas upałów panujących w Bydgoszczy naprężenia powstałe w torach tramwajowych spowodowały wysadzenie ich z podłoża

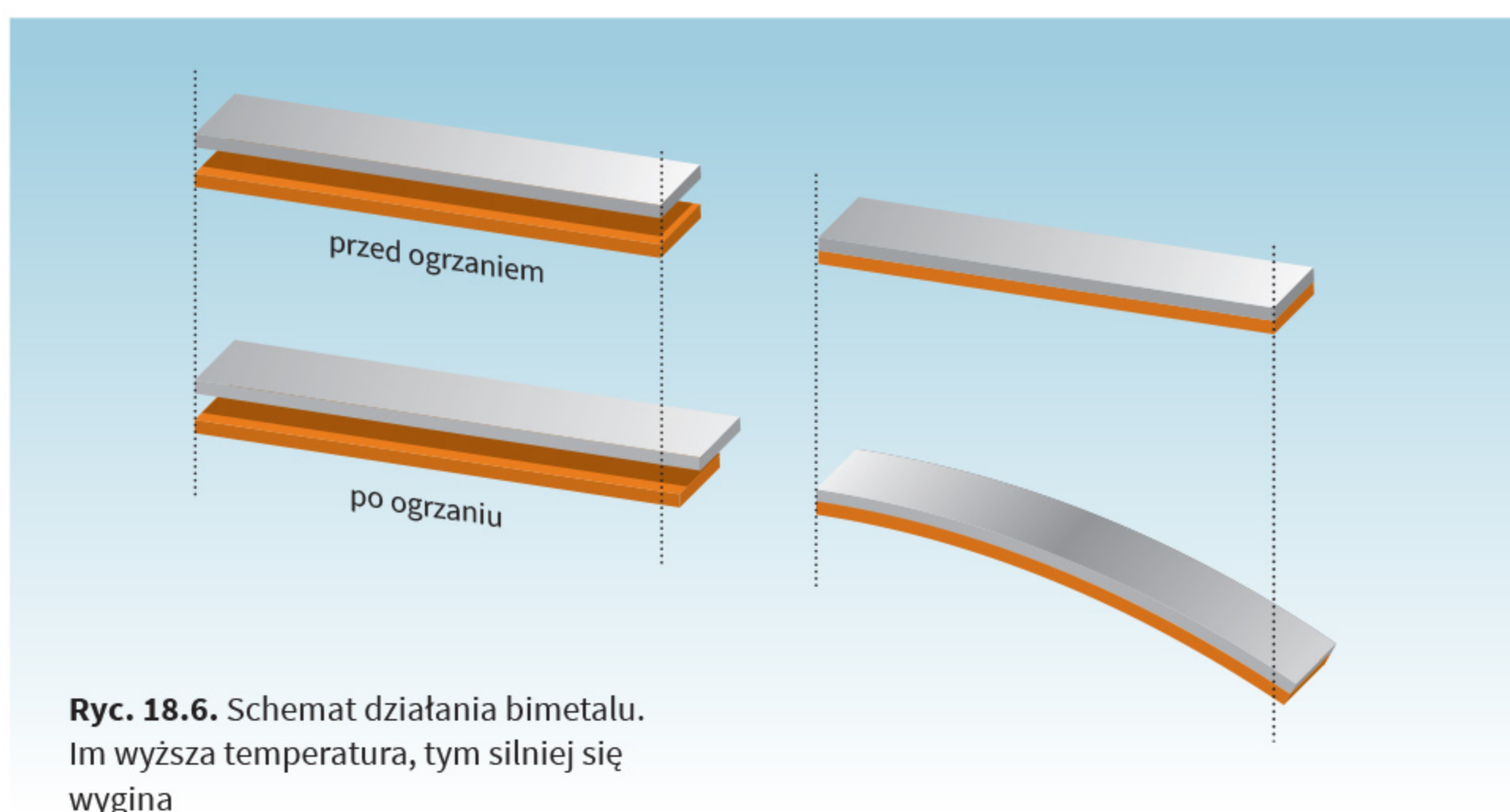
Zastosowania rozszerzalności ciał stałych

Konstruktorzy i technolodzy wykorzystują zjawisko rozszerzalności cieplnej do mocowania elementów. Na przykład koła zębate można osadzić na osi „na gorąco”, bez spawania czy przykręcania. Otwór w kole ma nieco mniejszą średnicę od średnicy osi, ale po rozgrzaniu, w wyniku rozszerzalności, koło się powiększa i swobodnie można nasunąć je na oś. Po schłodzeniu koło zębate mocno zaciska się na osi (ryc. 18.5).



Ryc. 18.5. Koła zębate osadzone na osi

Innym ciekawym przykładem jest tzw. bimetal. Tworzą go połączone ze sobą dwie blaszki metalowe o różnym współczynniku rozszerzalności cieplnej (ryc. 18.6).



Ryc. 18.6. Schemat działania bimetalu. Im wyższa temperatura, tym silniej się wygina



Po ogrzaniu jedna z nich bardziej się wydłuża, a ponieważ obie są ze sobą połączone, całość się wygina. Po ochłodzeniu bimetal wraca do poprzedniego kształtu. Bimetale są ważnym elementem regulacji temperatury w różnych urządzeniach (piece, żelazka, grzejniki). Mogą być też wykorzystywane w konstrukcji niektórych termometrów (ryc. 18.7).

Ryc. 18.7. Termometr bimetaliczny

DOŚWIADCZENIE 3.

Na pasek papieru naklej wzdłuż taśmę klejącą. Umieść pasek około 10 cm nad świeczką, w płaszczyźnie pionowej. Opisz i wyjaśnij zaobserwowany efekt. Doświadczenie wykonaj ostrożnie, aby pasek się nie zapalił.

PODSUMOWANIE

- ▶ Prawie wszystkie substancje zwiększają swoją objętość wraz ze wzrostem temperatury.
- ▶ Przyrost wymiarów ciała stałego jest wprost proporcjonalny do przyrostu temperatury.
- ▶ Przy projektowaniu budowli należy uwzględniać rozszerzalność cieplną materiałów.

PYTANIA I ZADANIA

1. Betonowe filary mostu kolejowego w leżącej w Sudetach Nowej Rudzie mają wysokość około 22 m. Czy w ciągu roku zmiany wysokości filarów są takie same jak w przypadku betonowego budynku mieszkalnego o tej samej wysokości? Uzasadnij odpowiedź.
2. Gdy krawędź szyjki pustej butelki zwilżymy wodą i położymy na niej monetę, a następnie przez chwilę będziemy ogrzewać butelkę dłońmi, zobaczymy, jak moneta lekko się unosi. Wyjaśnij wynik doświadczenia.
3. Zbiorniki paliwa w samochodach są tak konstruowane, że nie można ich wypełnić w całości paliwem. W jakim celu pozostawia się pustą przestrzeń?



4. Most Poniatowskiego w Warszawie składa się z ośmiu stalowych przęseł. Najdłuższe przęsło ma długość 80 m. Oszacuj, o ile zmienia się jego długość w ciągu letniego dnia, kiedy nad ranem temperatura powietrza wynosi 13°C , a po południu 28°C . Współczynnik rozszerzalności liniowej stali wynosi $0,013 \frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}}$.
5. Precyzyjne przyrządy pomiarowe (np. suwmiarka) mają tzw. świadectwo wzorcowania, na którym podana jest niepewność pomiaru, a także m.in. temperatura, w której sprawdzano przyrząd. Jakie znaczenie ma podawanie temperatury?



19. Przekaz energii w postaci ciepła

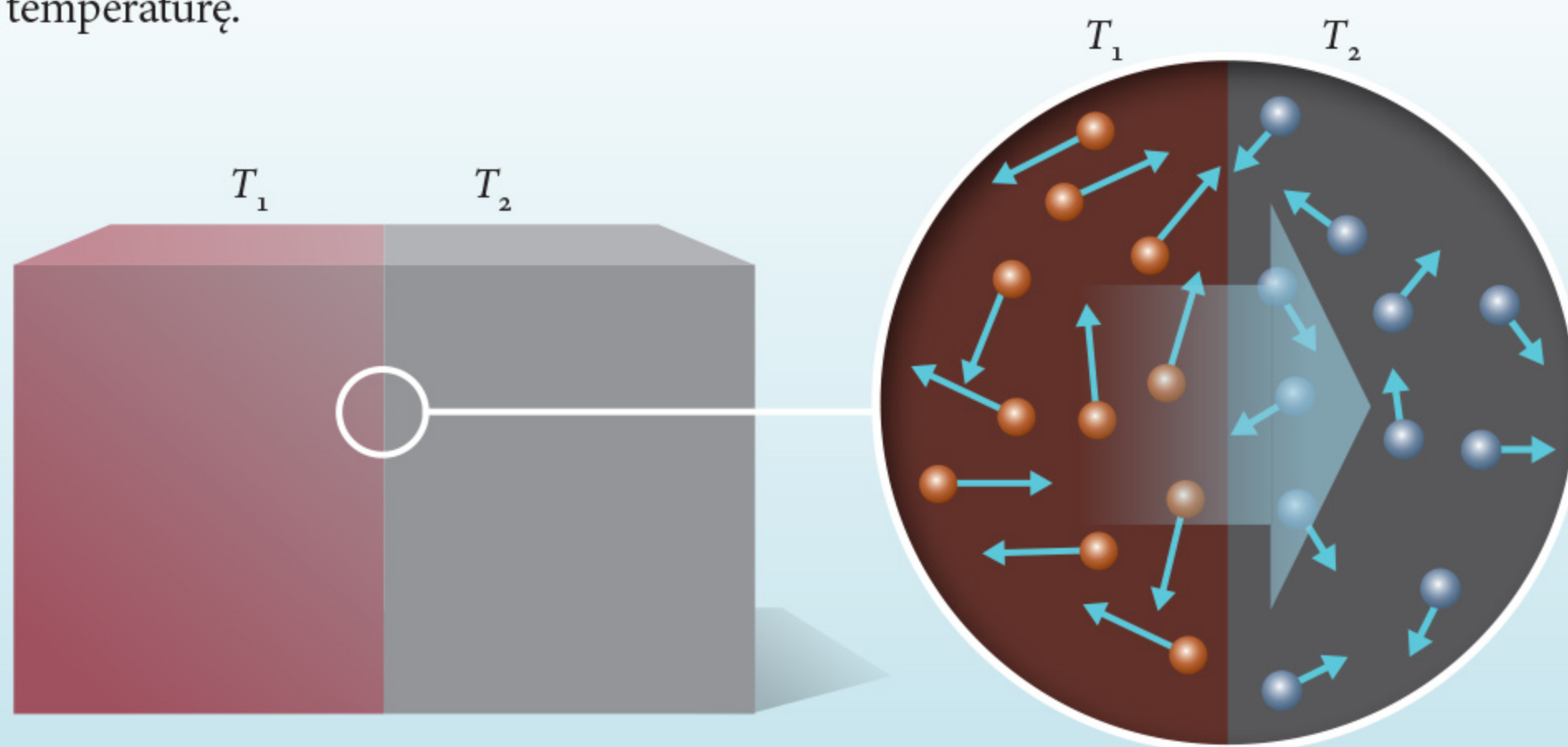
- Przewodnictwo cieplne
- Konwekcja
- Promieniowanie

→ **Przypomnij sobie**, czym są temperatura i energia wewnętrzna.

Cząsteczki, z których zbudowane są ciała, poruszają się i oddziałują ze sobą zgodnie z zasadami dynamiki. Jednak bezpośrednie stosowanie tych zasad do tak dużej liczby ciągle zderzających się obiektów jest praktycznie niewykonalne ze względu na dużą liczbę zderzeń w jednostce czasu, podobnie jak obliczenie energii przekazanej w trakcie poszczególnych zderzeń. Dlatego w termodynamice opisujemy nie poszczególne cząsteczki, lecz całe ciało, poprzez wprowadzenie odpowiednich pojęć, takich jak temperatura czy energia wewnętrzna.

Przewodnictwo cieplne

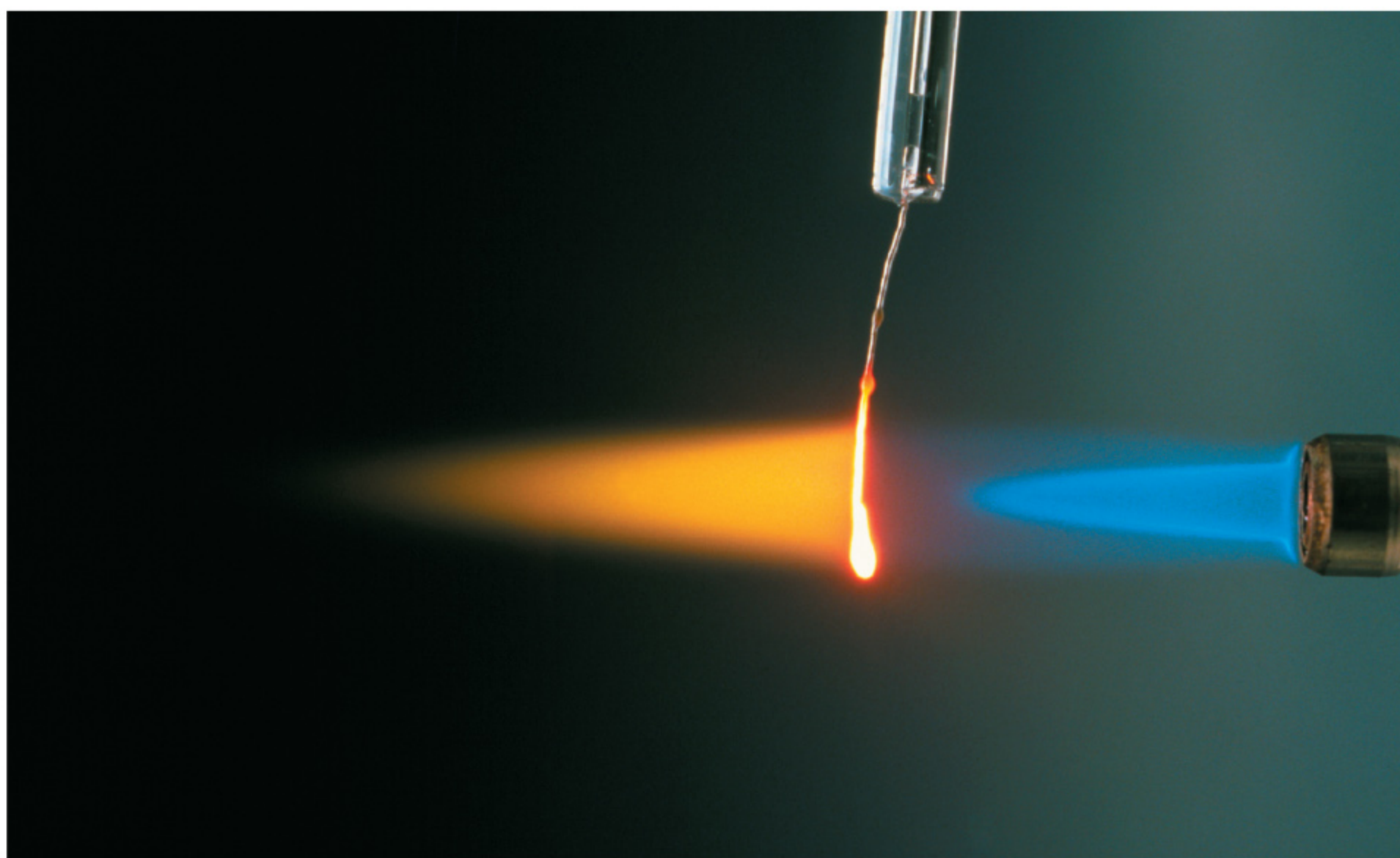
Zastanówmy się, co się dzieje po zetknięciu ze sobą dwóch ciał o różnej temperaturze. Rozważmy sytuację przedstawioną na rycinie 19.1. Niech ciało z lewej strony ma wyższą temperaturę.



Ryc. 19.1. Ciało o wyższej temperaturze T_1 przekazuje energię wewnętrzną ciału o niższej temperaturze T_2

Na styku powierzchni cząsteczki należące do obu ciał zderzają się ze sobą. Średnia energia kinetyczna cząsteczek ciała o wyższej temperaturze (z lewej strony) jest większa od średniej energii kinetycznej cząsteczek drugiego ciała (z prawej strony). Wobec tego w większości zderzeń to cząsteczki cieplejszego ciała przekazują część energii cząstecz-

kom ciała chłodniejszego, podobnie jak szybka kula bilardowa po zderzeniu z powolną przekazuje jej część swojej energii. W efekcie ciało o wyższej temperaturze przekazuje część swojej energii ciału o niższej temperaturze. Mówimy, że następuje **przekaz energii w postaci ciepła**. Kiedy ten przekaz się kończy? W chwili, gdy cząsteczki obu ciał mają średnio tę samą energię kinetyczną, czyli ciała mają tę samą temperaturę. Taki przepływ energii poprzez zderzenia cząsteczek następuje również wewnątrz ciała, gdy jego części mają różną temperaturę (ryc. 19.2).



Ryc. 19.2. Ciepło przepływa od gorącego do chłodniejszego końca drucika

Ciało o wyższej temperaturze przekazuje ciału o niższej temperaturze energię w postaci ciepła.

Z powyższych rozważań wynika, że ciała stykające się ze sobą dostatecznie długo mają tę samą temperaturę, o ile można pominąć wymianę ich energii ze światem zewnętrznym. W naszych domach najczęściej wszystkie meble w pokoju, książki i ściany, a także powietrze mają praktycznie tę samą temperaturę. Stan, w którym temperatura wszystkich ciał układu jest taka sama, nazywamy **stanem równowagi termodynamicznej**. W tym stanie nie ma przepływu ciepła.

DOŚWIADCZENIE 1.

Na patelni rozmieść kilka grudek masła lub margaryny w jednym rzędzie. Umieść płonącą świecę pod patelnią, pod jedną ze skrajnych grudek. Czekaj, aż grudki się stopią. W jakiej kolejności się topiły? Wyjaśnij obserwowany efekt.

Nie wszystkie substancje przekazują energię tak samo szybko. Zależy to od ich budowy wewnętrznej, a w szczególności od tego, jak gęsto ułożone są cząsteczki i jak silnie ze sobą oddziałują. Wśród materiałów możemy wyróżnić **przewodniki cieplne** i **izolatory cieplne**. Bardzo dobrymi przewodnikami ciepła są metale, które dobrze przewodzą również prąd elektryczny. Za przewodnictwo cieplne metali również odpowiadają przede wszystkim elektrony swobodne. Elektrony te nie są związane z konkretnymi atomami i dzięki temu mogą swobodnie poruszać się wewnątrz metalu.

Przekaz energii dzięki zderzeniom cząsteczek lub elektronów nazywamy **przewodnictwem cieplnym**.

Prawie wszystkie substancje poza metalami są izolatorami cieplnymi – energia przekazywana jest w nich bardzo powoli. Bardzo dobrym izolatorem jest powietrze. Energię w trakcie zderzeń przekazują cząsteczki, a w gazach jest ich dużo mniej niż w ciałach stałych o tej samej objętości. Oznacza to, że świetnymi izolatorami są również materiały składające się głównie z pęcherzyków powietrza: styropian i aerożel (ryc. 19.3). Warstwa styropianu zapewnia ponaddwudziestokrotnie mniejszy przepływ ciepła niż mur ceglany tej samej grubości. Dodatkowo styropian jest lekki i tani, dlatego właśnie płytami ze styropianu najczęściej ociepla się budynki.

Najlepszym izolatorem jest próżnia, ponieważ w ogóle nie ma tam cząsteczek, a zatem nie zachodzi przewodzenie ciepła.



Ryc. 19.3. Dzięki warstwie aerożelu płatki kwiatu nie są ogrzewane przez palnik

W terminologii fizycznej przez ciepło rozumie się **przepływ energii wskutek różnicy temperatur**. Mówimy zatem o cieplnym przepływie energii lub przepływie energii w postaci ciepła. W naszym podręczniku używamy głównie tego drugiego sformułowania. Przez ciepło rozumie się na ogół zarówno proces przepływu ciepła, jak i wartość przekazanej energii. Podobnie praca jest rozumiana jako proces wykonywania pracy, a także wartość tej pracy. Gdy mówimy, że z grzejnika do powietrza płynie ciepło, mamy na myśli przekazywaną do niego energię.

Konwekcja

DOŚWIADCZENIE 2.

Zapaloną świecę umieść w odległości kilkunastu centymetrów od ściany i oświetl ją strumieniem silnego światła, np. z rzutnika multimedialnego, tak aby na ścianie było widać cień świeczki. Poza cieniem świeczki można zaobserwować obraz zmian gęstości powietrza – w powietrzu o zmiennej gęstości światło nie biegnie po liniach prostych i dlatego jedne fragmenty ściany mogą być silniej oświetlone niż inne.

Czy widać cień płomienia? Zaobserwuj ruch powietrza nad świeczką. Dlaczego powietrze nad płomieniem unosi się do góry?

W pogodny dzień promieniowanie słoneczne ogrzewa powierzchnię Ziemi, a od powierzchni nagrzewa się przylegająca do niej warstwa powietrza. Ogrzany gaz ma mniejszą gęstość od gazu chłodnego, więc siła wyporu unosi ogrzane porcje powietrza do góry. Na ich miejsce przemieszcza się chłodne powietrze. W ten sposób energia przenoszona jest do góry. Taki sam mechanizm działa w cieczach. Łatwo można to zaobserwować w garnku z intensywnie podgrzewaną zupą, gdy kawałki jarzyn wypływają na powierzchnię, by po chwili z powrotem zanurzyć się w zupie.

Konwekcja to przekaz energii dzięki makroskopowym ruchom gazu lub cieczy.

W gazach i cieczach znajdujących się w naszym otoczeniu konwekcja jest najbardziej efektywnym sposobem przekazu ciepła. Konwekcja ma ogromne znaczenie dla kształtowania pogody.



Ryc. 19.4. Lampa lawa. Ogrzana od spodu ciecz unosi do góry plastyczny воск. Na górze ciecz i воск stygną i zaczynają opadać

Dzięki konwekcji w ciekłym wnętrzu Ziemi energia wewnętrzna gorącego jądra jest przenoszona do jej warstw zewnętrznych. Właśnie te ruchy konwekcyjne są przyczyną tektoniki płyt, powstawania wulkanów, a także pola magnetycznego Ziemi.



WARTO WIEDZIEĆ

Konwekcja nad bałtycką plażą

Gdy rano w słoneczny dzień wczasowicze idą na bałtycką plażę, piasek jest chłodny. W ciągu dnia piasek i gleba nagrzewają się szybko, jednak morze pozostaje chłodne. Od podłoża przez przewodzenie nagrzewa się najniższa warstwa powietrza, która następnie się unosi, a w jej miejsce od morza napływa chłodne powietrze. Na dużej wysokości, gdzie temperatura jest niższa, para wodna zawarta w powietrzu skrapla się i tworzą się białe niewielkie chmury, zwane cumulusami.



Tak zwykle wygląda dzień słonecznej pogody na bałtyckiej plaży: chłodny wiatr od morza i chmury przestaniające słońce. Wieczorem podłoże szybko stygnie. Zanika wtedy wiatr, znikają też cumulusy.

Promieniowanie

Czy energia może być przekazywana przez próżnię? Tak, jest to możliwe, gdyż istnieje trzeci sposób przekazu energii w postaci ciepła: przez promieniowanie. Przykładem mogą być fale elektromagnetyczne emitowane przez Słońce, docierające do nas przez próżnię. Tylko dzięki temu promieniowaniu Słońce może ogrzewać naszą planetę.

Fale elektromagnetyczne są emitowane przez poruszające się z przyspieszeniem ładunki elektryczne. Wszystkie ciała są zbudowane z atomów, które składają się między innymi z elektronów o ładunku ujemnym. **Gdy atomy drgają, ich ładunki są źródłem fal elektromagnetycznych.** Przy temperaturach występujących na powierzchni Ziemi są to głównie fale elektromagnetyczne w zakresie podczerwieni. Dlatego czasem nazywa je

się promieniowaniem termicznym lub ciepłym (ryc. 19.5). Ciała podgrzane do temperatury kilkuset stopni zaczynają wysyłać dodatkowo światło, które również przenosi energię (ryc. 19.2). **Promieniowanie padające na ciała może pobudzić cząsteczki do drgań o większej amplitudzie.** W ten sposób ciała pochłaniają energię promieniowania. Proces ten jest szczególnie efektywny w przypadku rezonansu, gdy częstotliwość fali jest zbliżona do częstotliwości drgań cząsteczek. Ciała przezroczyste nie pochłaniają promieniowania, więc nie są przez nie ogrzewane. Ciała przezroczyste dla promieniowania w jednym zakresie fal elektromagnetycznych nie muszą być przezroczyste w innym zakresie.

Każde ciało emituje promieniowanie elektromagnetyczne. Dzięki **promieniowaniu** ciała mogą przekazywać sobie energię bez bezpośredniego kontaktu, nawet poprzez próżnię.

Emisja podczerwieni może być zaskakująco duża – na przykład nasze własne ciała emitują ją z mocą około 700 W. To moc małego czajnika lub kilkudziesięciu przeciętnych żarówek LED. Moc, z jaką emitujemy promieniowanie, zależy tylko od temperatury ciała. Jest prawie jednakowa, niezależnie od tego, czy biegamy, czy śpimy. To przede wszystkim dlatego w małych chłodnych pomieszczeniach, w których znalazło się wiele osób, temperatura powietrza dość szybko rośnie. Trzeba jednak pamiętać, że nasze ciała pochłaniają też promieniowanie podczerwone padające ze strony innych obiektów. Czasem pochłaniamy więcej podczerwieni, niż emitujemy. Właśnie bilans między pochłanianą a emitowaną energią decyduje o tym, czy jest



Ryc. 19.5. Promiennik podczerwieni zapewnia komfort cieplny na tarasie podczas chłodnego wieczoru



Ryc. 19.6. Przy ognisku obserwujemy trzy sposoby przekazu energii w postaci ciepła

nam subiektywnie zimno czy ciepło. Komfort termiczny odczuwamy w sytuacji, gdy różnica między mocą emitowaną i pochłanianą wynosi około 100 W. Gdy jest większa – jest nam chłodno, gdy mniejsza – gorąco.

Istnieją zatem trzy podstawowe sposoby przekazu energii w postaci ciepła: przez przewodnictwo, konwekcję i promieniowanie. Wszystkie trzy łatwo zaobserwować, gdy w chłodny wieczór siedzimy przy ognisku (ryc. 19.6). W wyniku przewodnictwa silnie ogrzewane są tylko cienkie warstwy powietrza przylegające do płomienia, jednak one od razu unoszą się do góry na skutek konwekcji. Dlatego właśnie najszybciej upieczemy kielbasę, gdy będziemy trzymać ją nad ogniem. Siedzących ludzi ogrzewa głównie podczerwień emitowana we wszystkie strony przez gorący płomień. Powietrze jest dla podczerwieni praktycznie przezroczyste, zatem podczerwień nie ogrzewa powietrza. Dlatego gdy siedzimy przy ognisku, ogrzewamy tylko część ciała zwróconą w jego stronę.

PODSUMOWANIE

- ▶ Ciało o wyższej temperaturze przekazuje ciału o niższej temperaturze energię w postaci ciepła.
 - ▶ **Przewodnictwo cieplne** to przekaz energii dzięki zderzeniom cząsteczek lub elektronów.
 - ▶ **Konwekcja** to przekaz energii dzięki makroskopowym ruchom gazu lub cieczy.
 - ▶ Każde ciało emituje promieniowanie elektromagnetyczne. Dzięki **promieniowaniu** ciała mogą przekazywać sobie energię bez bezpośredniego kontaktu, nawet poprzez próżnię.
-

PYTANIA I ZADANIA

1. Ludzie odczuwają, że jest im zimno, gdy z ich ciała szybko odplywa ciepło. Które substancje o temperaturze niższej od temperatury ciała ludzkiego będą cieplejsze w dotyku: przewodniki czy izolatory cieplne o tej samej temperaturze? Uzasadnij odpowiedź.
2. Które łóżko – górne czy dolne – warto wybrać, żeby było nam cieplej podczas spania na łóżku piętrowym? Uzasadnij odpowiedź z odwołaniem się do sposobów przekazywania ciepła.
3. Dlaczego konwekcja nie zachodzi w ciałach stałych? Wyjaśnij ten fakt z uwzględnieniem budowy cząsteczkowej ciał stałych, cieczy i gazów.
4. Dlaczego karoseria samochodu podczas słonecznej pogody może się nagrzewać do dużo wyższej temperatury niż otaczające ją powietrze?
5. Narysuj pokój z kominkiem. Zaznacz na rysunku kierunki przepływu ciepła pochodzącego od ognia. Dla każdego kierunku określ sposób przekazu ciepła.



20. I zasada termodynamiki

- I zasada termodynamiki
- Ciepło i praca
- Wartość energetyczna paliw



→ **Przypomnij sobie** zasadę zachowania energii oraz to czym są praca i energia wewnętrzna.

Zziębnięte ręce możemy ogrzać przez przyłożenie ich do ciepłego grzejnika lub energiczne pocieranie ich o siebie. W obu sytuacjach do rąk przekazywana jest energia – ale na dwa różne sposoby. Pierwszy to przepływ ciepła od grzejnika do rąk, a drugi to wykonana praca. W tym rozdziale dowiemy się, jak stosować zasadę zachowania energii do zjawisk cieplnych.

I zasada termodynamiki

Zgodnie z zasadą zachowania energii całkowita energia układu izolowanego się nie zmienia. W klasie pierwszej ustaliliśmy, że energia ta zmienia się, gdy siła zewnętrzna wykonuje pracę nad układem. Można zapisać to wzorem:

$$\Delta E = W \quad (1)$$

Rozważmy dwa stykające się ciała o różnych temperaturach. Cząsteczki ciała o wyższej temperaturze uderzają w cząsteczki ciała chłodniejszego. Obliczenie na podstawie zasad dynamiki energii przekazanej podczas każdego pojedynczego zderzenia jest praktycznie niemożliwe, dlatego w zjawiskach termodynamicznych wprowadza się pojęcie ciepła Q jako sumarycznej energii przekazanej podczas zderzeń. **Dostarczone ciału ciepło jest drugim obok pracy siły zewnętrznej źródłem zmiany energii układu.**

O pracy W mówimy wówczas, gdy podczas działania siły przemieszcza się całe ciało lub jego część. Dostarczone ciepło Q to energia przekazana do układu wskutek zderzeń cząsteczek lub pochłonięcia promieniowania – w tym przypadku nie ma przesunięcia żadnej makroskopowej części ciała.

W termodynamice rozważamy na ogół procesy, w których zmienia się tylko energia wewnętrzna ciała, a nie ich energia mechaniczna. **Energia wewnętrzna to całkowita energia wszystkich cząsteczek ciała i ich oddziaływań wewnątrz ciała.** Inaczej mówiąc: energia wewnętrzna ciała to jego energia całkowita po odjęciu energii kinetycznej i oddziaływań ciała jako całości. Energię wewnętrzną będziemy oznaczać E_w .

Teraz możemy sformułować zasadę zachowania energii w formie, którą nazywamy **I zasadą termodynamiki**.

I zasada termodynamiki

Przyrost energii wewnętrznej ciała ΔE_w jest równy sumie energii przekazanej ciału w postaci ciepła Q i w formie pracy W .

$$\Delta E_w = Q + W \quad (2)$$

Każdy człon we wzorze (2) może być dodatni lub ujemny. Ujemna praca W wykonana nad ciałem oznacza, że to ciało wykonało pracę dodatnią, czyli przekazało energię do otoczenia. Q jest ujemne, jeśli ciepło odpłynęło z ciała.

Zastosujmy I zasadę termodynamiki do powszechnie występujących zjawisk. Gdy na przykład podgrzewamy wodę w czajniku, grzałka przekazuje jej energię w postaci ciepła. Żadna siła nie wykonuje w tej sytuacji pracy, czyli $W = 0$. Przyrost energii wewnętrznej wody jest równy ciepłu, które dopłynęło do niej z grzałki. Natomiast gdy gorącą wodę zostawimy w wyłączonym czajniku, wówczas ciepło z niej odpływa. Z I zasady termodynamiki możemy wywnioskować, że woda straci tyle energii wewnętrznej, ile ciepła odpłynie z niej do otoczenia. W obu przypadkach $\Delta E_w = Q$, jednak w przypadku ogrzewania wody Q jest dodatnie, a w przypadku ochładzania – ujemne.

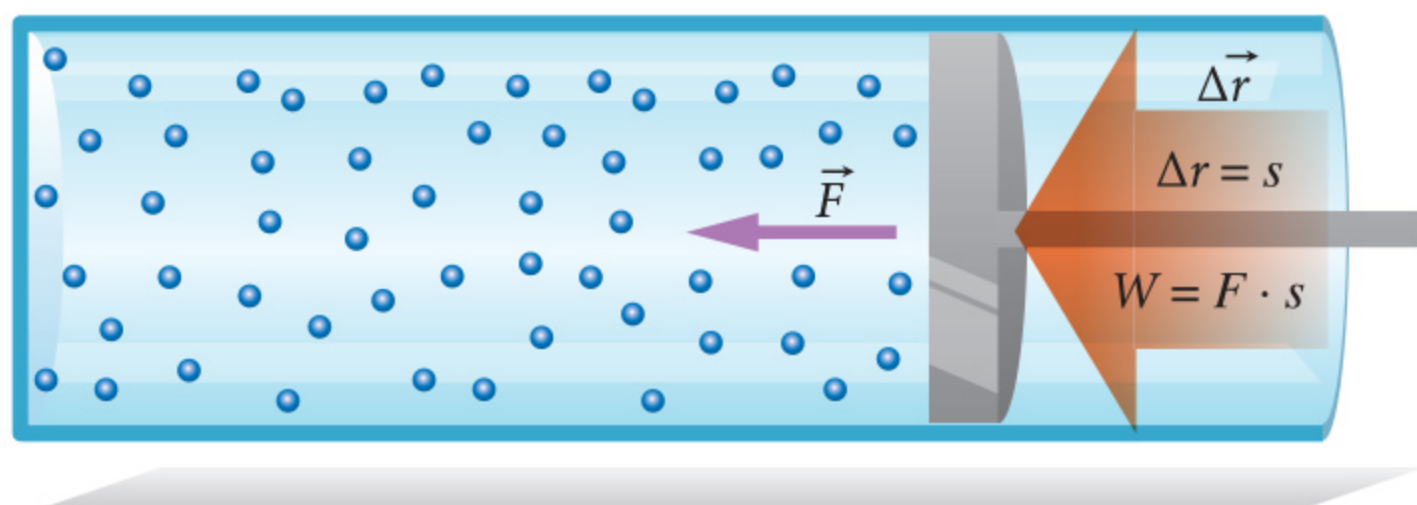


Ryc. 20.1. Tarcze hamulcowe świejące z powodu rozgrzania

Czy można zwiększyć temperaturę ciała w inny sposób niż przez dostarczanie ciepła? Spójrzmy na rycinę 20.1. Na zdjęciu widać hamulce samochodu wyścigowego rozgrzane do czerwoności. Jak w tym przypadku zastosować I zasadę termodynamiki? Tarcze hamulcowe samochodu nie kontaktują się z żadnym ciałem o wyższej temperaturze, zatem nie dopływa do nich ciepło, czyli $Q = 0$. Jednak podczas hamowania na przesuwanie się względem siebie elementy układu hamulcowego działają siły i wykonują pracę dodatnią. Z I zasady termodynamiki wynika, że energia wewnętrzna hamulców rośnie teraz tylko kosztem wykonanej pracy, czyli $\Delta E_w = W$.

Procesy bez wymiany ciepła z otoczeniem

Rozważmy sprężanie gazu w izolowanym cylindrze (ryc. 20.2). Skoro cylinder jest izolowany, nie ma przepływu ciepła, czyli $Q = 0$. Wobec tego możemy zastosować I zasadę termodynamiki w uproszczonej wersji: $\Delta E_w = W$. Tłok działa na gaz pewną siłą, równoległą do przemieszczenia warstwy gazu przylegającej do tłoka. Praca wykonana nad gazem jest dodatnia, więc powoduje wzrost energii wewnętrznej, a tym samym wzrost temperatury gazu. W mikroskopowym obrazie można to wyjaśnić tym, że tłok uderza cząsteczki gazu i pcha je, przez co zwiększa ich prędkość.



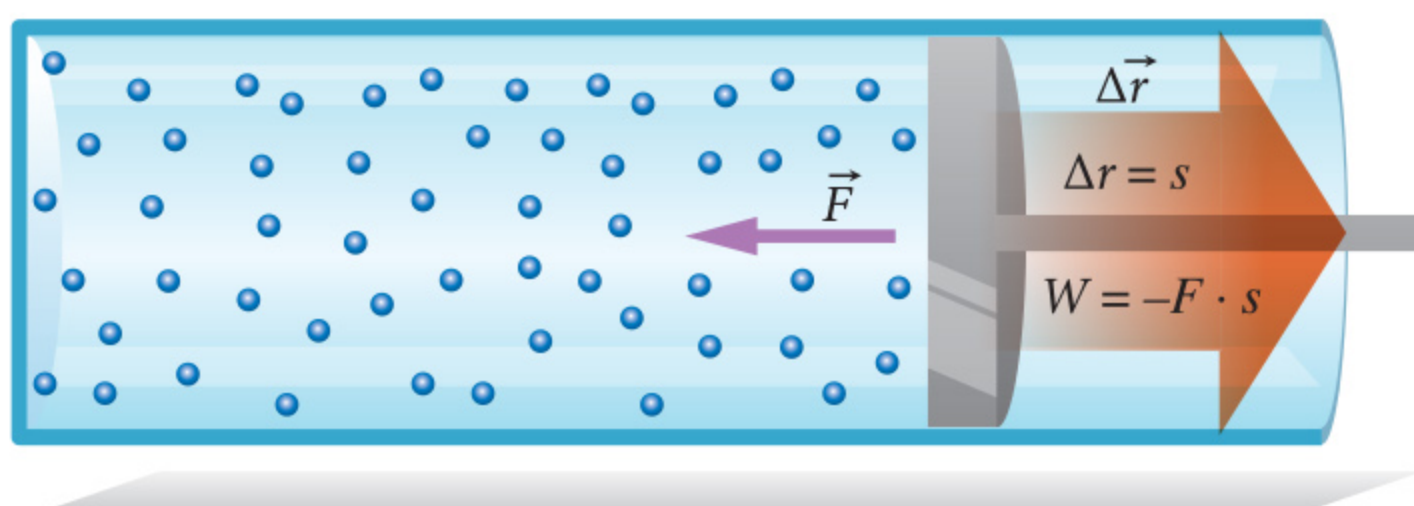
Ryc. 20.2. Sprężanie gazu w cylindrze. Siła jest skierowana tak jak przemieszczenie przylegającej do tłoka porcji gazu, więc tłok wykonuje nad gazem pracę dodatnią

DOŚWIADCZENIE 1.

Gdy szybko pompujemy koło w rowerze, możemy zauważyć, że po kilkunastu ruchach tłoka pompka robi się ciepła. Sprawdź, czy po kilkunastu ruchach tłoka pompka z otwartym wylotem również będzie ciepła. Wyjaśnij wynik swoich obserwacji.

Rozważmy jeszcze proces odwrotny, czyli rozprężanie gazu w izolowanym cylindrze (ryc. 20.3). Jeśli cylinder jest izolowany, nie ma przepływu ciepła, czyli $Q = 0$. Gaz przesuwa tłok i w ten sposób przekazuje mu część swojej energii. Wobec tego energia wewnętrzna gazu maleje, podobnie jak jego temperatura. Jest to zgodne ze wzorem $\Delta E_w = W$, gdyż teraz praca tłoka nad gazem jest ujemna (ryc. 20.3). W mikroskopowym obrazie cząsteczki uderzają w tłok i pchają go kosztem swojej energii kinetycznej.

Czy efekty będą takie same, jeśli gaz rozpręży się bez tłoka, np. przez otwór w zbiorniku? Tak, tylko że w tym przypadku gaz będzie pchał powietrze znajdujące się na jego drodze.



Ryc. 20.3. Rozprężanie gazu w cylindrze. Tłok działa na gaz siłą skierowaną przeciwnie do jego przemieszczenia, więc wykonuje nad gazem pracę ujemną

DOŚWIADCZENIE 2.

Do wykonania doświadczenia będzie potrzebny pojemnik ze sprężonym powietrzem (można go nabyć w sklepach ze sprzętem komputerowym) lub pusty pojemnik po dezodorancie, w którym został jeszcze gaz pod ciśnieniem. Naciskaj zawór pojemnika przez kilka sekund, wypuszczając sprężone powietrze. Potem dotknij górnej części pojemnika (przy zaworze). Co możesz powiedzieć o jego temperaturze?

Procesy bez wymiany ciepła z otoczeniem to tzw. procesy adiabatyczne. Wiele przemian w przyrodzie odbywa się właśnie w ten sposób. Przepływ ciepła nie jest natychmiastowy, wymaga pewnego czasu. Jeśli proces przebiega bardzo szybko, możemy go uznać za proces bez wymiany ciepła z otoczeniem.

Przemiany adiabatyczne zachodzące w atmosferze są przyczyną tego, że w górach prawie zawsze jest chłodniej niż na nizinach (ryc. 20.4). Rozważmy porcję powietrza ogrzanego od powierzchni Ziemi. Powietrze to ma mniejszą gęstość od sąsiadujących z nim chłodniejszych warstw, więc unosi się do góry. Podczas wznoszenia obniża się ciśnienie, czyli powietrze się rozpręża. Ten proces jest powolny, ale wymiana ciepła między tą porcją powietrza a sąsiednimi jest jeszcze wolniejsza (powietrze jest dobrym izolatorem). Wobec tego rozprężanie się powietrza podczas wznoszenia można uznać w przybliżeniu za proces adiabatyczny. To dlatego temperatura wznoszącego się powietrza maleje.



Ryc. 20.4. Temperatura wznoszącego się powietrza maleje

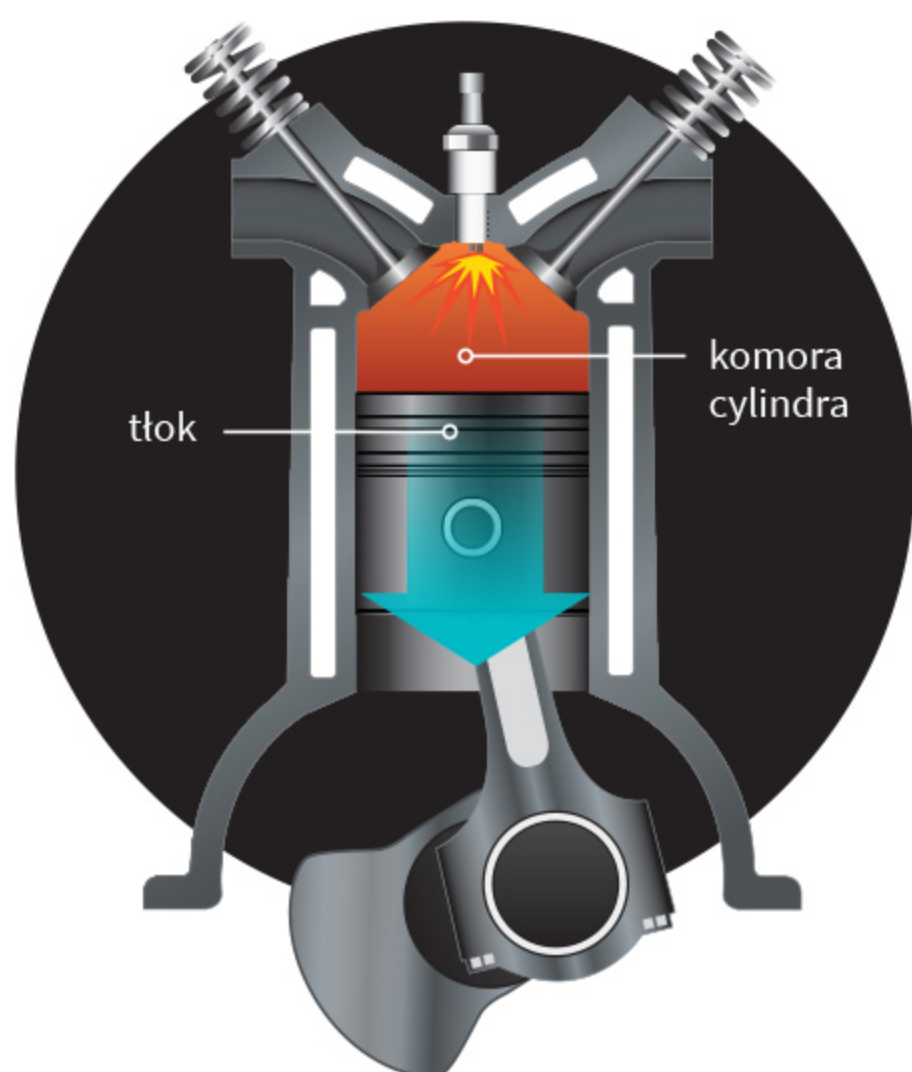


WARTO WIEDZIEĆ

Czy otwarta lodówka ochłodzi kuchnię?

Układ chłodzący lodówki w czasie pracy pobiera ciepło Q_2 z wnętrza lodówki i oddaje to ciepło do otoczenia. Prąd elektryczny zasilający lodówkę wykonuje pracę dodatnią W . Praca ta jest całkowicie zamieniana na ciepło, które również jest oddawane do otoczenia (ryc.). Wobec tego układ oddaje do otoczenia więcej ciepła Q_1 , niż pobiera z wnętrza lodówki. Oznacza to, że działająca lodówka ogrzewa pomieszczenie, w którym się znajduje. Analogicznie działa pompa ciepła – pobiera ciepło z chłodnego otoczenia budynku i „przenosi je” do jego wnętrza. Ciepło oddane do wnętrza budynku jest większe od pobranego z otoczenia.

Podobnie działa klimatyzator – pobiera ciepło z wnętrza pomieszczenia, w którym się znajduje, i oddaje na zewnątrz budynku.



Ryc. 20.5. Schemat budowy silnika benzynowego. Gaz rozprężający się w komorze pcha tłok

Przemiana ciepła w pracę

Nasza cywilizacja rozwinęła się między innymi dzięki wykorzystaniu energii wewnętrznej paliw – na przykład do ogrzewania pomieszczeń czy napędzania pojazdów. W procesie spalania (utleniania) paliwa zostają przerwane pewne wiązania między cząsteczkami, mogą też tworzyć się inne wiązania o mniejszej energii potencjalnej. Oznacza to zmniejszenie energii potencjalnej oddziaływań między cząsteczkami. Ten spadek kompensowany jest wzrostem energii kinetycznej cząsteczek. Z tego powodu produkty spalania osiągają często bardzo wysoką temperaturę. Wydzielone w ten sposób ciepło można częściowo zamienić na pracę. Gorący gaz powstały ze spalania paliwa pcha tłok (ryc. 20.3) i wykonuje użyteczną dla nas pracę. Tak działają silniki spalinowe (ryc. 20.5).



Wartość energetyczna (opałowa) **paliwa** to część jego energii wewnętrznej, która w trakcie spalania jednostki masy lub jednostki objętości paliwa wydzielą się w postaci ciepła. Na przykład wartość energetyczna benzyny to 32 MJ/l, a węgla kamiennego – około 21 MJ/kg. To znaczy, że ze spalania litra benzyny możemy uzyskać 32 MJ energii, a ze spalania kilograma węgla – 21 MJ.

Tabela 1. Przybliżone wartości opałowe wybranych paliw

Rodzaj paliwa	Wartość opałowa
węgiel kamienny	21 MJ/kg
węgiel brunatny	8 MJ/kg
ekogroszek	24 MJ/kg
siano	17 MJ/kg
gaz ziemny wysokometanowy	36 MJ/m ³
gaz ziemny zaazotowany	25 MJ/m ³
gaz płynny	45 MJ/kg
olej opałowy	40 MJ/kg
benzyna	32 MJ/l

Wartość energetyczna nie jest jedynym czynnikiem, który uwzględnia się przy podejmowaniu decyzji o zastosowaniu konkretnego paliwa. Najczęściej decydującym czynnikiem są po prostu koszty, jednak coraz częściej bierze się pod uwagę także oddziaływanie produktów spalania na środowisko naturalne.

s. 209

PRZYKŁAD 1.

Oszacujmy, która energia na początku roku 2023 była tańsza: elektryczna czy ta uzyskiwana ze spalania benzyny? To pytanie jest dość istotne ze względu na przewidywany szybki wzrost liczby aut elektrycznych na naszych drogach. Cena jednej kilowatogodziny energii elektrycznej wynosiła około 80 gr, a cena jednego litra benzyny – około 6,7 zł. Przyjmijmy wartość energetyczną benzyny równą 32 MJ/l.

Zamieniamy najpierw MJ na kWh.

$$1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J} = 10^6 \text{ W} \cdot \text{s} = 10^6 \cdot (10^{-3} \text{ kW}) \cdot \frac{1}{3600} \text{ h} \approx 0,28 \text{ kWh}$$

Wobec tego energia uzyskana z jednego litra benzyny wynosi:

$$32 \text{ MJ} = 32 \cdot 0,28 \text{ kWh} \approx 9 \text{ kWh}$$

Gdyby zastąpić tę energię (cena 6,7 zł) energią elektryczną, trzeba by za nią zapłacić:

$$9 \cdot 0,8 \text{ zł} = 7,2 \text{ zł}$$

Jak widać, ceny energii elektrycznej i energii uzyskiwanej ze spalania benzyny były porównywalne. Z punktu widzenia konsumenta warto wziąć pod uwagę również to, że silniki elektryczne mają większą sprawność od silników spalinowych, tzn. większą część energii zamieniają na pracę użyteczną.

PODSUMOWANIE

- **I zasada termodynamiki:** przyrost energii wewnętrznej ciała ΔE_w jest równy sumie energii przekazanej mu w postaci ciepła Q i w formie pracy W .

$$\Delta E_w = Q + W$$

- **Wartość energetyczna paliwa** to część jego energii wewnętrznej, która w trakcie spalania jednostki masy lub jednostki objętości paliwa wydzielą się w postaci ciepła.

PYTANIA I ZADANIA

1. Do leżącego kamienia dołynęło w pewnym czasie 26 J ciepła przez przewodzenie od otaczających go ciał. W tym samym czasie kamień wypromieniował energię 13 J i pochłoniął jeszcze promieniowanie o energii 8 J. Jak zmieniła się energia wewnętrzna tego kamienia?
2. Chcemy ścisnąć powietrze w pompce tak, by jego temperatura się nie zmieniła. Czy w tym celu należy przesuwac tłok szybko czy powoli? Uzasadnij odpowiedź na podstawie I zasady termodynamiki.
3. W silniku spalinowym gorący gaz powstały ze spalania paliwa pcha tłok w zamkniętym cylindrze. Czy temperatura gazu podczas tej fazy działania silnika rośnie, maleje, czy jest stała? Odpowiedź uzasadnij na podstawie I zasady termodynamiki.
4. Elektrownia spalająca węgiel kamienny zużyła 1000 t węgla. Ile węgla brunatnego musi spalić elektrownia korzystająca z tego paliwa, żeby „wytworzyć” tyle samo energii elektrycznej? Wartość opałowa węgla brunatnego to około 8,7 MJ/kg, a kamiennego – około 21 MJ/kg.
5. Do silnika spalinowego pracującego z mocą 80 kW dołynęło w ciągu jednej sekundy 250 kJ ciepła pochodzącego ze spalania benzyny. Ile ciepła oddał silnik w tym czasie na zewnątrz? Wskazówka: energia wewnętrzna silnika się nie zmieniła.



21. Ciepło właściwe i bilans cieplny

- Ciepło właściwe
- Bilans cieplny
- Pojemność cieplna

→ **Przypomnij sobie** zasadę zachowania energii i to czym jest ciepło.

Wiemy już, że są substancje, które szybko przekazują energię w postaci ciepła, i takie, w których ten proces zachodzi powoli. Ważna jest jeszcze inna kwestia: ile energii należy dostarczyć danej substancji, aby zwiększyć jej temperaturę na przykład o jeden stopień Celsjusza.

Ciepło właściwe

Dlaczego niektóre ciała ogrzewają się podczas słonecznej pogody bardzo szybko, np. blacha stalowa czy piasek, a inne znacznie wolniej, np. woda lub drewno? Decydują o tym nie tylko przewodzenie ciepła czy zdolność pochłaniania promieniowania, lecz również to, ile energii potrzeba do podgrzania danej substancji. Energia ta zależy od rodzaju i masy substancji oraz od przyrostu temperatury. Aby porównać własności różnych materiałów pod tym względem, wprowadzono pojęcie ciepła właściwego.

Ciepło właściwe danej substancji określa, ile ciepła potrzeba do ogrzania 1 kg tej substancji o 1 K (lub 1 °C).

Jednostką ciepła właściwego w układzie SI jest $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$. Ponieważ przyrost temperatury w kelwinach jest taki sam jak w stopniach Celsjusza, stosuje się również zapis $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ (ciepło właściwe wyrażone w obu jednostkach jest takie samo).

Ciepło właściwe zwykle oznaczamy literą c . W tabeli 2. zamieszczono wartości ciepła właściwego wybranych materiałów występujących w naszym otoczeniu. Widać, że metale będące przewodnikami ciepła mają mniejsze ciepło właściwe od materiałów będących izolatorami. **Zdecydowanie największe ciepło właściwe spośród powszechnie występujących substancji ma woda.** Do ogrzania kilograma wody o 1 °C (lub o 1 K) potrzeba około 4200 J energii. Fakt ten ma bardzo duże znaczenie zarówno w życiu codziennym, jak i w kształtowaniu klimatu.

s. 205 W scenariuszu doświadczenia 4 (s. 205) opisano sposób wyznaczania ciepła właściwego.

Tabela 2. Ciepło właściwe niektórych substancji

Nazwa substancji	Ciepło właściwe $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$
aluminium	900
beton	840
drewno	1500–2400
lód	2100*
miedź	380
ołów	130
piasek suchy	880
woda	4200
złoto	130
żelazo	460

* Ciepło właściwe lodu zależy od jego temperatury. Wartość w tabeli podano dla 0°C , a np. dla temperatury -10°C wynosi ono $2000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$.

Ciepło Q potrzebne do ogrzania dowolnej masy substancji można obliczyć ze wzoru:

$$Q = mc\Delta t \quad (1)$$

gdzie:

m – masa substancji, c – ciepło właściwe,

Δt – przyrost temperatury (będziemy go wyrażać w skali Celsjusza).

Ochładzanie jest procesem odwrotnym do ogrzewania, więc ciepło oddane podczas tego procesu obliczamy w ten sam sposób.

PRZYKŁAD 1.

Obliczmy, ile ciepła potrzeba, aby doprowadzić do wrzenia 2 litry wody w czajniku. Przyjmijmy temperaturę początkową $t_0 = 15^\circ\text{C}$. Temperatura końcowa $t = 100^\circ\text{C}$. Gęstość wody wynosi 1 kg/dm^3 , zatem masa 2 litrów wody wynosi 2 kg.

Dane podstawiamy do wzoru (1):

$$Q = mc(t - t_0) = 2 \text{ kg} \cdot 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 85^\circ\text{C} = 714\,000 \text{ J}$$

Otrzymaliśmy 714 kJ. Ze względu na bardzo duże ciepło właściwe wody jej zagotowanie wymaga dużej energii.

Różnice ciepła właściwego otaczających nas substancji powodują, że choć otrzymują one tyle samo energii, nagrzewają się w różnym stopniu. Na przykład **mniejsze ciepło właściwe piasku niż wody powoduje, że w słoneczny dzień wzrost temperatury piasku jest znacznie większy niż wody**. Asfalt ma ciepło właściwe podobne do piasku, dlatego podczas letnich upałów rozgrzewa się równie mocno (ryc. 21.1).



Ryc. 21.1. Asfaltowa szosa nagrzewa się bardzo mocno w słoneczny letni dzień

s. 160

PRZYKŁAD 2.

W słoneczną pogodę leżały obok siebie blacha stalowa i deska, ważące tyle samo. Deska ogrzała się o 2°C . Oszacujmy, o ile stopni Celsjusza ogrzała się blacha. Przyjmijmy, że ciepło właściwe drewna jest w tym przypadku równe $2000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$, a ciepło właściwe stali wynosi $460 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$.

Zakładamy, że deska i blacha otrzymały od Słońca taką samą ilość energii. Oczywiście to przybliżenie, dlatego nasz wynik będzie tylko oszacowaniem. Wobec tego:

$$Q_s = Q_d$$

$$mc_s \Delta t_s = mc_d \Delta t_d$$

Po przekształceniu otrzymujemy:

$$\Delta t_s = \frac{c_d}{c_s} \Delta t_d$$

Do wzoru podstawiamy dane:

$$\Delta t_s = \frac{2000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}}{460 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}} \cdot 2^{\circ}\text{C} \approx 8,7^{\circ}\text{C}$$

Blacha ogrzała się o prawie 9°C . Przyrost temperatury stalowej blachy był zatem ponadczterokrotnie większy od przyrostu temperatury deski.



Bilans cieplny

Wokół nas nieustannie trwa wymiana energii w postaci ciepła między różnymi ciałami. Do jej analizy stosujemy zasadę zachowania energii. Rozważmy dwa ciała o różnej temperaturze, między którymi przepływa ciepło. Załóżmy, że ciała wymieniają energię tylko ze sobą, zatem nie ma wymiany energii z otoczeniem. Przykładem może być sytuacja, gdy jajko po ugotowaniu wkładamy do zimnej wody. Jajko, czyli ciało o temperaturze wyższej, przekazuje część swojej energii wodzie, więc jego temperatura maleje. Woda pobiera energię od jajka, więc jej temperatura rośnie. Po pewnym czasie ustala się końcowa temperatura równowagi. Temperaturę końcową jajka i wody możemy obliczyć poprzez ułożenie tzw. **bilansu cieplnego**.

Bilans cieplny to stwierdzenie, że w wymianie ciepłej ciepło pobrane przez jedno ciało jest równe ciepłu oddanemu przez drugie ciało.

$$Q_{\text{pob}} = Q_{\text{odd}} \quad (2)$$

Przy takim opisie obydwie ciepła traktujemy jako dodatnie. Po podstawieniu do obu stron tego równania wzoru (1) możemy obliczyć temperaturę końcową lub inną niewiadomą wielkość – pod warunkiem że niewiadoma jest tylko jedna. Należy pamiętać o odpowiedniej kolejności odejmowania przy obliczaniu zmian temperatury, aby wyrażenia po obu stronach równania były dodatnie.

PRZYKŁAD 3.

Obliczmy, o ile ochłodzi się gorąca herbata, jeżeli włożymy do niej łyżeczkę z aluminium ($c_a = 900 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$) o masie 20 g, która ma początkowo temperaturę pokojową 20°C . Przyjmijmy, że herbata o temperaturze początkowej 80°C i masie 200 g ma ciepło właściwe takie samo jak woda.

Po włożeniu łyżeczki energia płynie do niej z herbaty aż do wyrównania temperatur. Kończącą temperaturę herbaty i łyżeczki oznaczmy jako t . Ciepło pobrane przez łyżeczkę jest równe ciepłu oddanemu przez herbatę:

$$Q_{\text{pob}} = Q_{\text{odd}}$$

Podstawiamy do obu stron równania wzór (1):

$$m_a c_a (t - 20^\circ\text{C}) = m_w c_w (80^\circ\text{C} - t)$$

Podstawiamy dane i skracamy jednostki:

$$0,02 \text{ kg} \cdot 900 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (t - 20^\circ\text{C}) = 0,2 \text{ kg} \cdot 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (80^\circ\text{C} - t)$$

$$18 \cdot (t - 20^\circ\text{C}) = 840 \cdot (80^\circ\text{C} - t)$$

Po wykonaniu mnożenia i uporządkowaniu otrzymujemy:

$$18 \cdot t + 840 \cdot t = 67\,200^\circ\text{C} + 360^\circ\text{C}$$

$$858 \cdot t = 67\,560^\circ\text{C}$$

Po przekształceniu otrzymujemy:

$$t = \frac{67\,560^\circ\text{C}}{858} \approx 79^\circ\text{C}$$

Temperatura herbaty po włożeniu łyżeczki obniży się tylko o około 1°C . Wynika to z małej masy łyżeczki oraz niedużego – w porównaniu z wodą – ciepła właściwego aluminium.

Pojemność cieplna

W przykładzie 3. analizowaliśmy zmiany temperatury wody i łyżeczki. Energia pochłonięta przez łyżeczkę była taka sama jak energia oddana przez wodę, ale zmiana temperatury wody była znikoma w porównaniu ze zmianą temperatury łyżeczki. O ciałach, które są w stanie pochłoniąć lub oddać duże ilości energii przy niewielkich zmianach temperatury, mówimy, że mają dużą **pojemność cieplną**. Obiekty o dużej pojemności



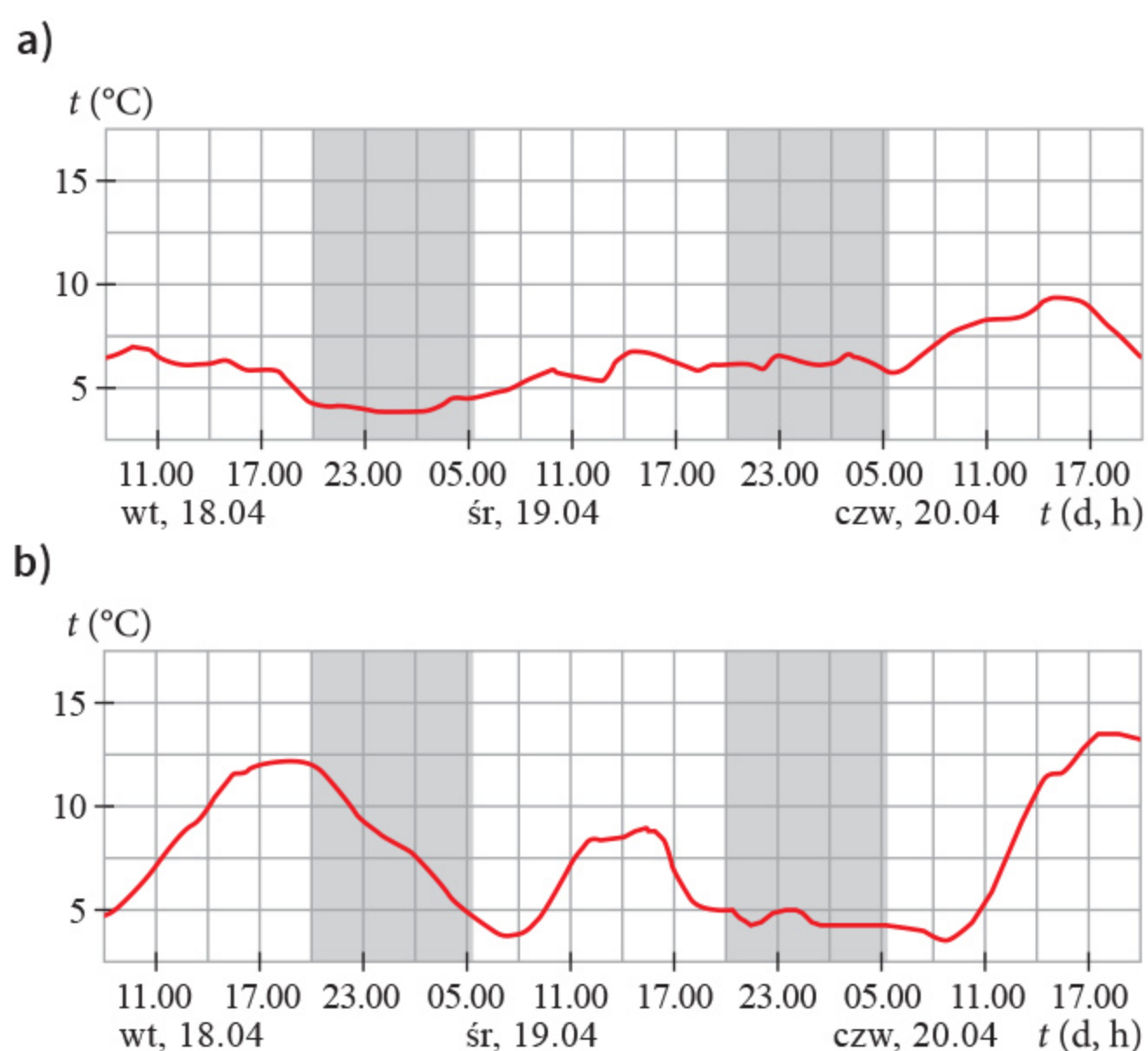
Ryc. 21.2. Woda ogrzewana w papierowym kubku

cieplnej stabilizują temperaturę otoczenia, w którym się znajdują.

Miarą pojemności cieplnej ciała jest iloczyn jego masy i ciepła właściwego.

Zwykle pojemność cieplna ścian w naszych domach jest znacznie większa niż pojemność cieplna powietrza zawartego wewnątrz budynku. Gdyby było odwrotnie, zimą po każdym wietrzeniu wewnątrz mocno by się wychładzało. Latem duża pojemność cieplna ścian powoduje powolne nagrzewanie się pomieszczeń w trakcie upałów.

Wodę w papierowym kubku można podgrzać nad płomieniem świecy, bo papier się nie zapali (ryc. 21.2). Dlaczego? Papier jest izolatorem, jednak jego warstwa jest tak cienka, że ciepło łatwo przechodzi do wody, która ma bardzo dużą pojemność cieplną. Wobec tego prawie całe ciepło z płomienia przechodzi do wody i powoli podnosi jej temperaturę.



Ryc. 21.3. Wykresy temperatury powietrza w kwietniu 2023 roku na Helu (a) oraz w Poznaniu (b). Obecność morza powoduje, że temperatury na Helu w ciągu dnia i w nocy niewiele się od siebie różnią

Zbiorniki wody mają bardzo dużą pojemność cieplną, co ma zasadnicze znaczenie dla klimatu. Szczególnie dobrze widać to w różnicy między klimatem kontynentalnym a morskim. Ze względu na bardzo dużą pojemność cieplną woda w morzu latem ogrzewa się powoli i dlatego ochładza wybrzeże. Zimą jest odwrotnie – morze zgromadziło latem dużo energii wewnętrznej i teraz ją oddaje, co powoduje ogrzewanie wybrzeża. Różnice temperatur między latem a zimą są znacznie mniejsze w klimacie morskim niż w klimacie kontynentalnym. Znacznie mniejsze są też na ogół różnice między temperaturą dnia i nocy (ryc. 21.3).

PODSUMOWANIE

- ▶ **Ciepło właściwe c** to wielkość określająca ilość ciepła niezbędnego do ogrzania 1 kg substancji o 1 K (lub 1 °C).
- ▶ Ciepło potrzebne do ogrzania masy m substancji o Δt można obliczyć ze wzoru:

$$Q = mc\Delta t$$

- ▶ **Bilans cieplny** to stwierdzenie, że w wymianie cieplnej ciepło pobrane przez jedno ciało jest równe ciepłu oddanemu przez drugie ciało.

$$Q_{\text{pob}} = Q_{\text{odd}}$$

PYTANIA I ZADANIA

1. Dlaczego blaszany kubek po wlaniu do niego gorącej herbaty ogrzewa się prawie natychmiast? Wyjaśnij to z użyciem pojęć wprowadzonych w tym rozdziale.
2. Do pół litra wody o temperaturze 50 °C znajdującej się w termosie wlano wodę o temperaturze 30 °C. Po wymieszaniu temperatura wynosiła 35 °C. Oblicz masę wlanej wody.
3. Do izolowanego naczynia wlano 3 litry wody o temperaturze 20 °C. Następnie do tej wody wrzucono stalowe kombinarki o masie 0,2 kg, mające temperaturę 90 °C. Jaka będzie temperatura końcowa kombinerek?
4. Gdy latem wchodzimy do średniowiecznej katedry o grubych murach, odczuwamy przyjemny chłód. Dlaczego temperatura powietrza jest tam dużo niższa niż na dworze?
5. Która ściana o tych samych rozmiarach będzie miała większą pojemność cieplną: z drewna o cieple właściwym $1600 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ i gęstości 700 kg/m^3 czy z betonu o cieple właściwym $840 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ i gęstości 2000 kg/m^3 ?



22. Topnienie i krzepnięcie

- Topnienie i krzepnięcie
- Temperatura topnienia
- Ciepło topnienia

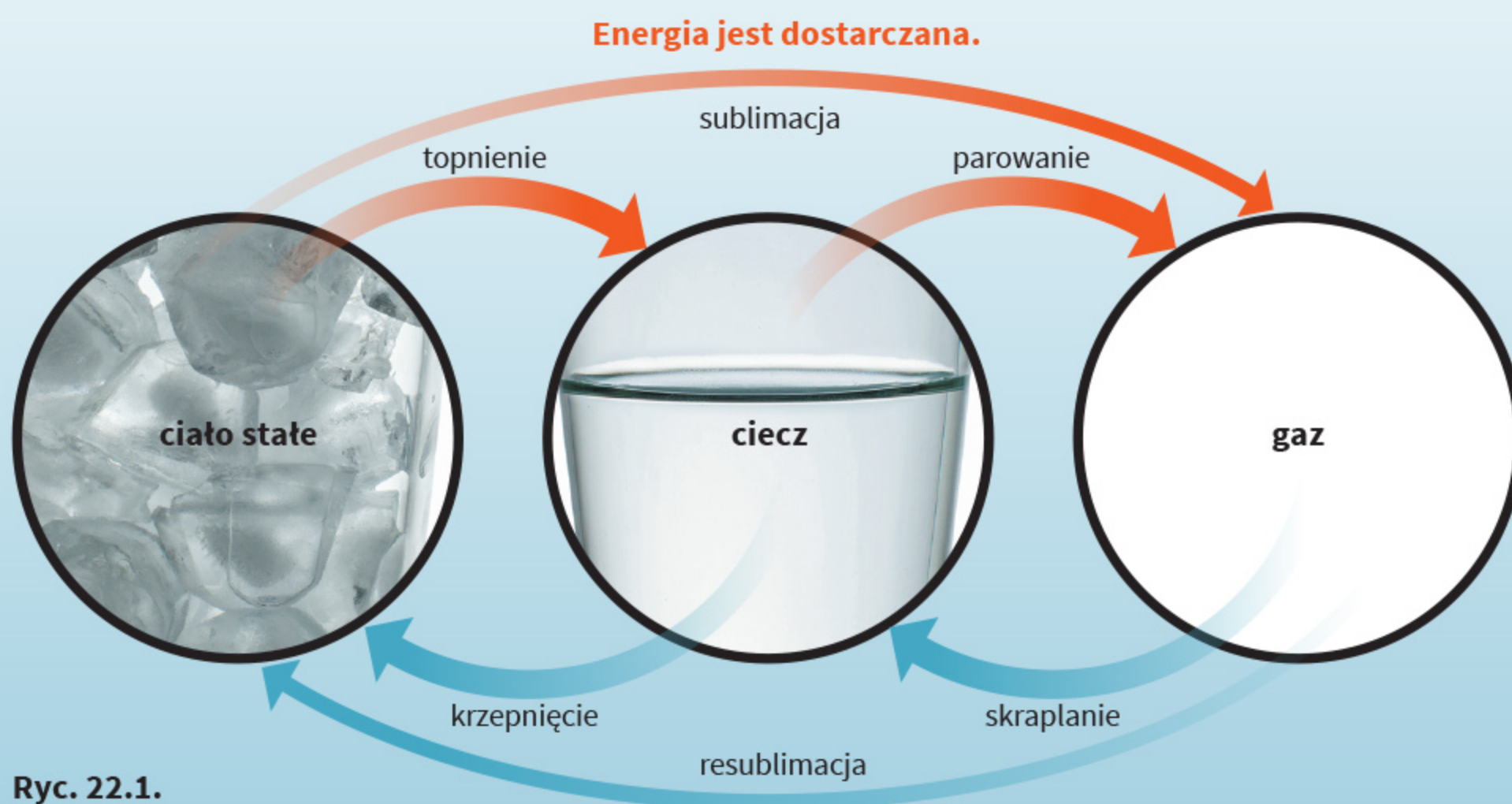
→ **Przypomnij sobie** różnice między budową wewnętrzną cieczy i ciał stałych.

W poprzednich rozdziałach stwierdziliśmy, że wskutek dopływu ciepła temperatura różnych substancji rośnie. Są jednak przypadki, gdy mimo dopływu ciepła temperatura pozostaje stała. Czy w tym przypadku również jest spełniona zasada zachowania energii?

Zmiany stanu skupienia materii

Materia zbudowana z cząsteczek występuje w trzech stanach skupienia: jako ciało stałe, ciecz lub gaz. Niektóre spośród ciał stałych mają budowę krystaliczną, np. sól kuchenna i lód. Cząsteczki tworzą w nich uporządkowaną strukturę.

Pod wpływem zewnętrznych czynników zmieniających energię wewnętrzną substancja może przejść w inny stan skupienia (ryc. 22.1). Gdy ciepło jest dostarczane, mogą nastąpić przemiany: ciała stałego w ciecz – **topnienie**, cieczy w gaz – **parowanie** lub ciała stałego w gaz – **sublimacja**. Z kolei gdy ciepło jest oddawane do otoczenia, mogą nastąpić przemiany: gazu w ciecz – **skraplanie**, cieczy w ciało stałe – **krzepnięcie** lub gazu w ciało stałe – **resublimacja**.



Ryc. 22.1.
Zmiany stanów
skupienia materii

Opisane procesy na co dzień najłatwiej zaobserwować na przykładzie wody. Lód po dostarczeniu do niego ciepła może zamienić się w wodę lub parę wodną. Na przykład w słoneczny zimowy dzień zanika śnieg pokrywający gałęzie drzew. Śnieg częściowo się topi, częściowo sublimuje i unosi się para wodna. Z kolei powstawanie w chmurach kropli deszczu czy płatków śniegu to przykłady procesów, podczas których para wodna oddaje energię do otoczenia.



WARTO WIEDZIEĆ

Szron i szadź

Powstawanie szronu oraz szadzi to procesy, w których para wodna lub woda oddają energię. Szron powstaje, gdy w mroźny dzień cząsteczki pary wodnej w procesie resublimacji osadzają się na przedmiotach takich jak trawa czy igielki drzew. Szadź powstaje, gdy kropelki wody (mgły) stykają się z powierzchnią jakiegoś przedmiotu i na niej zamarzają.



szron



szadź

Topnienie i krzepnięcie

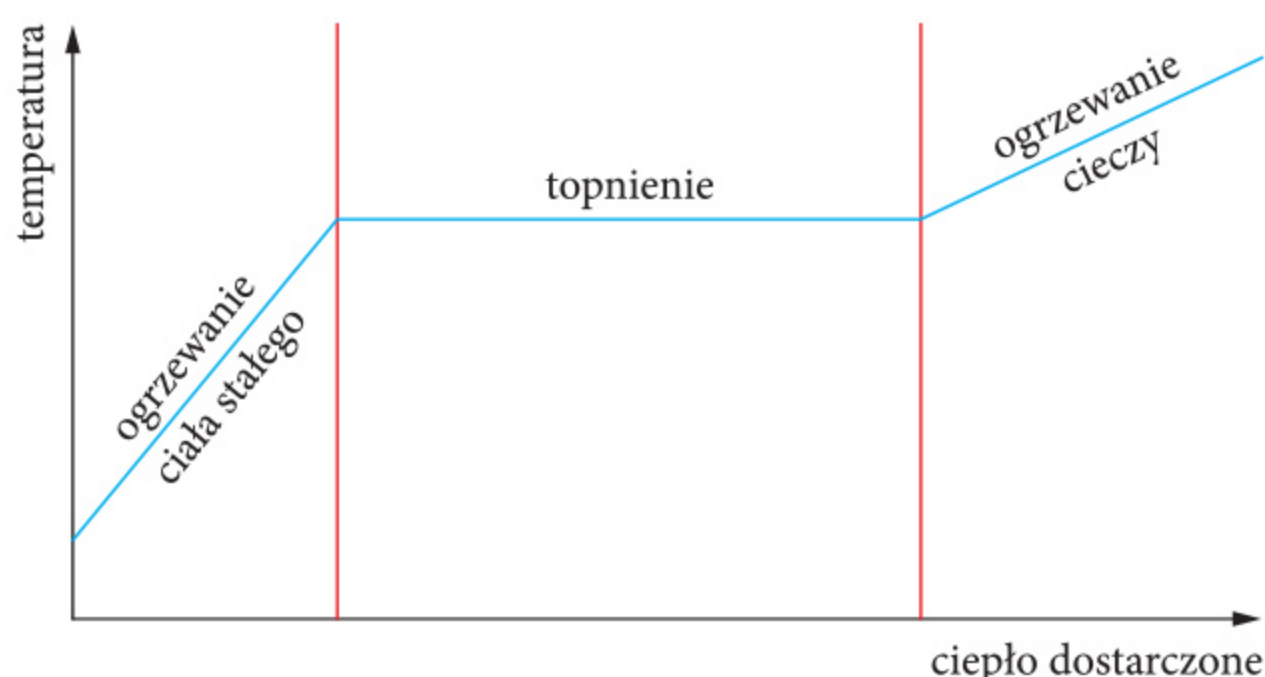
DOŚWIADCZENIE 1.

Wrzuć do kubka kostki lodu i umieść w nim termometr kuchenny. Co pewien czas odczytuj wskazania termometru i jednocześnie obserwuj, co dzieje się z kostkami lodu. Jaką temperaturę wskazuje termometr, gdy w naczyniu jest jednocześnie lód i woda, która powstała z lodu?

Lód wyjęty z zamrażalnika ma temperaturę około $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po wrzuceniu do kubka nie topi się od razu. Woda zaczyna pojawiać się dopiero wtedy, gdy temperatura lodu osiągnie $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Gdy w kubku jest i lód, i woda, która z niego powstała, temperatura będzie ciągle wynosić $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jest to **temperatura topnienia** lodu. Dalszy wzrost temperatury można



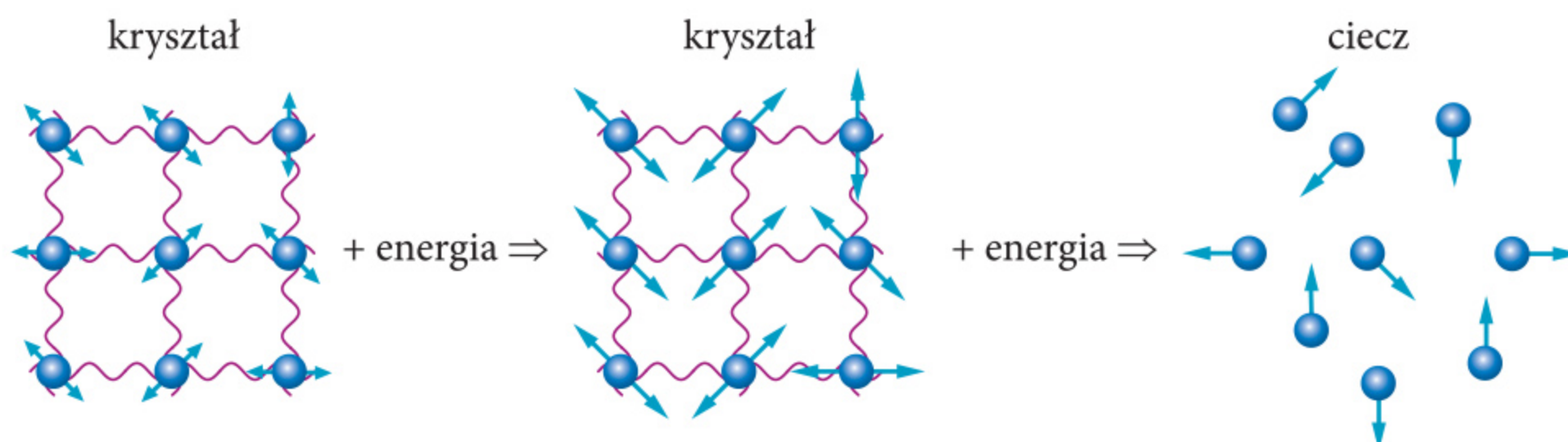
zaobserwować dopiero po stopieniu całego lodu. Inne substancje krystaliczne zachowują się podobnie, choć mają różne temperatury topnienia. **Podczas topnienia mimo ciągłego dostarczania ciepła temperatura substancji nie zmienia się aż do całkowitej zamiany ciała stałego w ciecz** (ryc. 22.2).



Ryc. 22.2. Wykres zależności temperatury substancji krystalicznej od dostarczonego ciepła, przy założeniu, że energia dopływa równomiernie do każdego fragmentu substancji

Dlaczego tak się dzieje? Wyobraźmy sobie, że cząsteczki tworzące kryształ to połączone ze sobą sprężynkami małe kulki, które mogą poruszać się tylko wokół położenia równowagi. W rzeczywistości rolę sprężynek odgrywają siły między cząsteczkami. Podczas ogrzewania kryształu rośnie prędkość, a więc i energia kinetyczna cząsteczek. W temperaturze topnienia cząsteczki mają największą energię kinetyczną w danym stanie skupienia. Dalsze dostarczanie ciepła prowadzi do zerwania wiązań sieci krystalicznej, czyli w naszym modelu – do zerwania sprężynek. Energia kinetyczna cząsteczek przed zerwaniem wiązań oraz po nim jest taka sama, ale inna jest energia oddziaływań. Z rozważań tych wynika, że **energia wewnętrzna cieczy tuż po jej powstaniu z ciała stałego jest większa niż energia wewnętrzna tego ciała stałego przed stopieniem, mimo że mają tę samą temperaturę**.

Krzepnięcie jest procesem odwrotnym do topnienia. Podczas krzepnięcia energia wewnętrzna substancji (na początku cieczy, potem mieszaniny cieczy i kryształu) maleje w wyniku przekazywania ciepła do otoczenia. Wówczas cząsteczki wiążą się ze sobą i tworzą sieć krystaliczną.

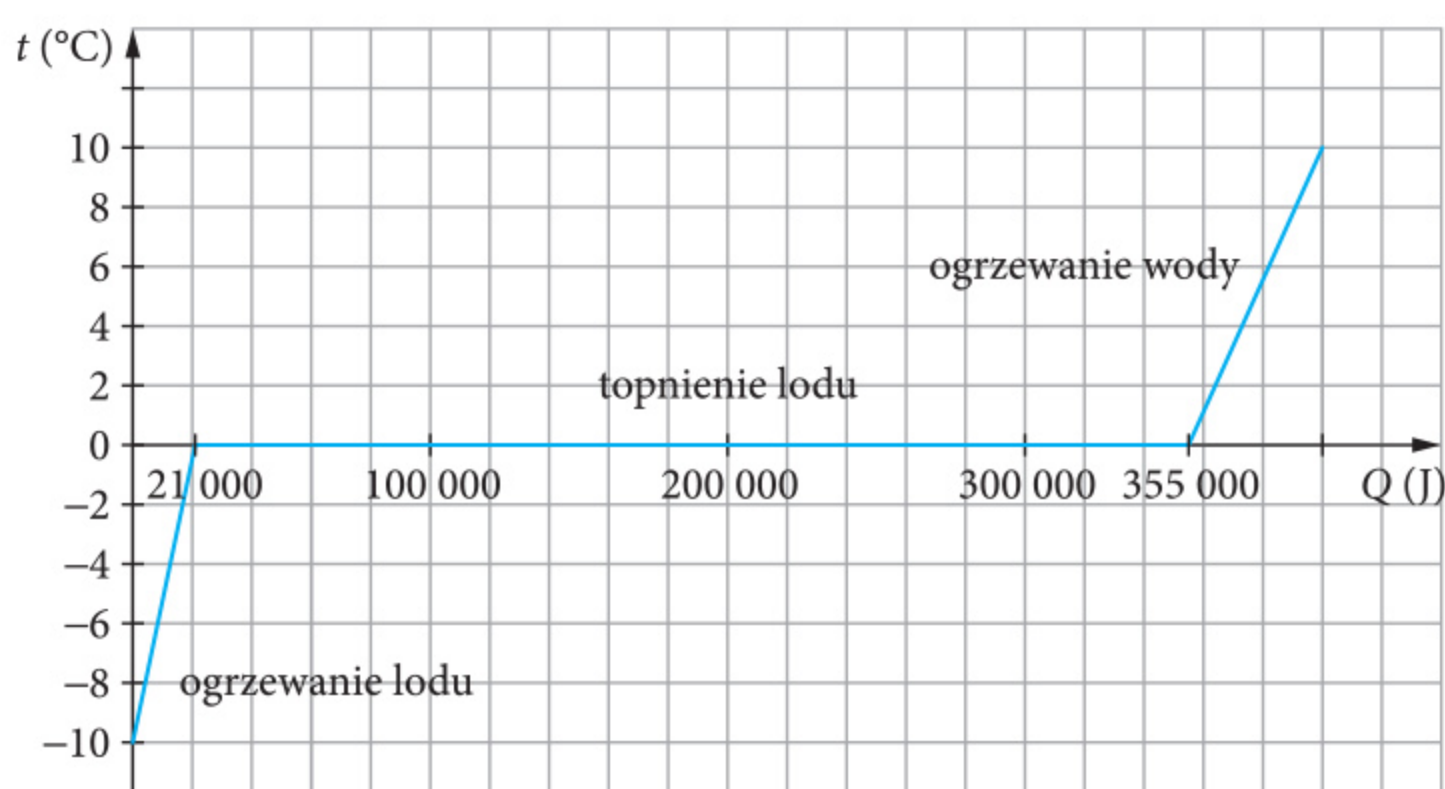


Ryc. 22.3. Dostarczenie ciepła podczas topnienia powoduje rozerwanie sieci krystalicznej i powstanie cieczy

Krzepnięcie danej substancji zachodzi w **takiej samej temperaturze jak jej topnienie**. Ciepło oddane przez ciecz podczas krzepnięcia jest takie samo jak ciepło pobrane przez ciało stałe (powstałe z tej cieczy) podczas topnienia.

Ciepło topnienia

Na podstawie pomiarów można sporządzić wykres zależności temperatury lodu, a potem wody, od dostarczonego do substancji ciepła (ryc. 22.4). Z wykresu wynika, że do stopienia 1 kg lodu potrzeba prawie 16 razy więcej energii niż do ogrzania 1 kg lodu od temperatury $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. To tłumaczy wysoką skuteczność użycia kostek lodu do chłodzenia napojów. Na przykład aby schłodzić szklankę soku o temperaturze pokojowej o kilka stopni Celsjusza, wystarczą dwie kostki lodu o temperaturze $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Gdybyśmy zamiast lodu użyli takiej samej masy wody o temperaturze $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, w niewielkim stopniu wpłynęłaby ona na zmianę temperatury soku.



Ryc. 22.4. Zależność temperatury 1 kg wody (lodu) od dostarczonego ciepła

Ciepło topnienia danej substancji określa, ile ciepła potrzeba do stopienia jednostki masy substancji w temperaturze topnienia.

Ciepło Q potrzebne do stopienia dowolnej masy substancji w temperaturze topnienia można obliczyć ze wzoru:

$$Q = L \cdot m \quad (1)$$

gdzie:

m – masa ciała,

L – ciepło topnienia.

Jednostką ciepła topnienia jest $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

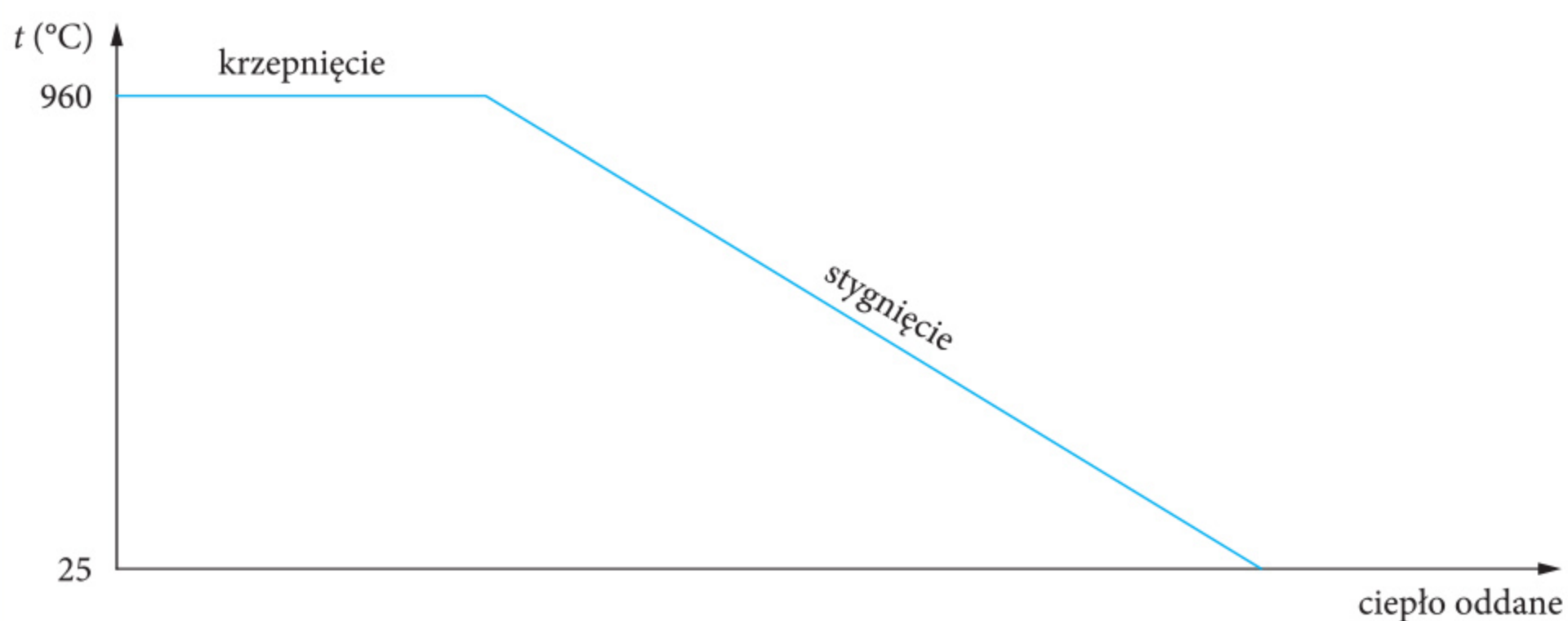
Tabela 3. Temperatura topnienia i ciepło topnienia niektórych substancji

Substancja	Temperatura topnienia (°C)	Ciepło topnienia ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)
alkohol etylowy	−114	105
rteć	−39	13
gliceryna	−18	176
woda (lód)	0	334
cyna	232	59
ołów	328	25
aluminium	658	398
srebro	960	105
złoto	1060	63
żelazo	1400	268
wolfram	3360	193

PRZYKŁAD 1.

Wydział Metali Szlachetnych Huty Miedzi w Głogowie jest jednym z największych producentów srebra na świecie. W przeprowadzonym tam procesie odlewania srebra 30 kg płynnego metalu wlewa się do formy, w której ów metal stygnie. Temperatura topnienia srebra jest równa 960 °C, jego ciepło topnienia wynosi $105 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, a ciepło właściwe to $240 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$. Obliczmy, ile energii odda srebro do otoczenia podczas krzepnięcia i stygnięcia do temperatury 25 °C.

W opisanym zjawisku zachodzą dwa następujące po sobie procesy – krzepnięcie oraz stygnięcie od temperatury topnienia do temperatury 25 °C.



Energia przekazana do otoczenia podczas krzepnięcia:

$$Q_k = L \cdot m = 105 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 30 \text{ kg} = 3150 \text{ kJ}$$

Energia przekazana do otoczenia podczas stygnięcia:

$$Q_s = cm\Delta t = 240 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 30 \text{ kg} \cdot 935 ^\circ\text{C} = 6732 \text{ kJ}$$

Wobec tego ciepło oddane do otoczenia podczas całego procesu jest równe:

$$Q = Q_k + Q_s = 3150 \text{ kJ} + 6732 \text{ kJ} \approx 9,88 \text{ MJ}$$

Ciepło topnienia lodu ma jedną z największych wartości w porównaniu z innymi substancjami z naszego otoczenia. Duże ciepło topnienia lodu powoduje, że wraz z nadejściem wiosny pokrywa śnieżna ustępuje powoli mimo silnego nasłonecznienia. Poza tym biały śnieg w większym stopniu niż ciemna gleba odbija promieniowanie padające na powierzchnię Ziemi. Obecność topniejącego śniegu, pobierającego energię z otoczenia, obniża temperaturę powietrza, a ocieplenie musi trwać wiele dni, aby stopił się cały nagromadzony śnieg. Gdyby ciepło topnienia lodu nie było tak duże, każdego roku wielkie obszary Ziemi byłyby narażone na powódzie, spowodowane nagłym stopieniem pokrywy śnieżnej. Na terenach górzystych nie wykształciłaby się gleba (nie byłoby więc roślinności), gdyż gwałtowne roztopy powodowałyby wymywanie jakichkolwiek szczątków organicznych.



WARTO WIEDZIEĆ

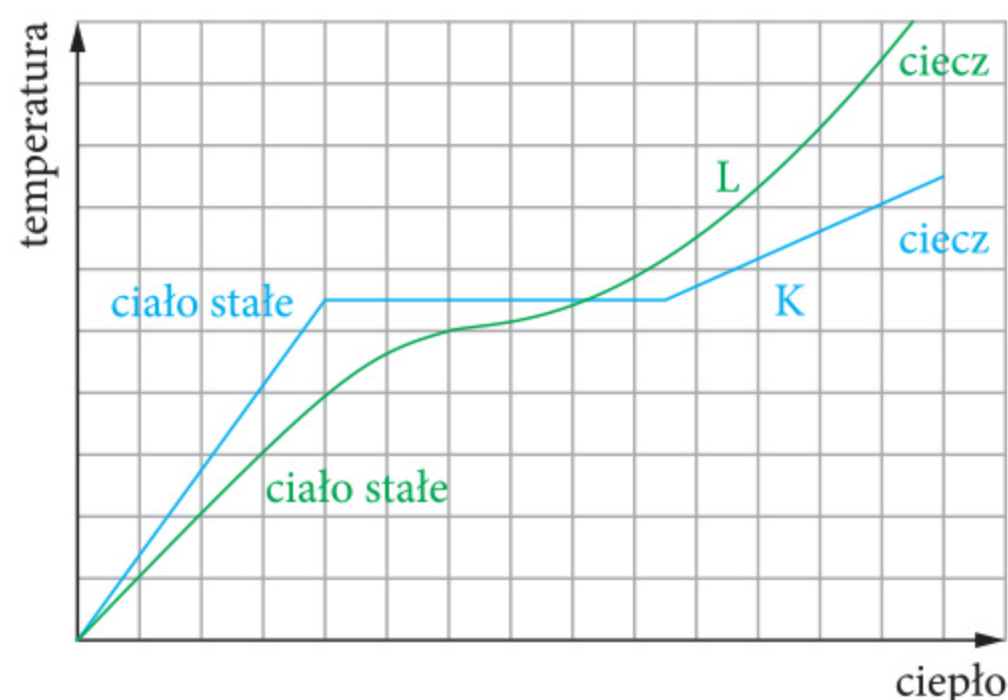
Lód na wulkanie

Podczas letniej wędrowki na zboczach wulkanu Etna na Sycylii, na wysokości około 2900 m n.p.m., można natknąć się na lód, leżący około 20 cm pod powierzchnią sypkiego gruntu. Lód jest tam nawet w lipcu podczas słonecznych dni. Dlaczego? Do stopienia lodu potrzeba bardzo dużo ciepła, a wulkaniczny pył jest izolatorem cieplnym, więc mimo dużego nasłonecznienia lód topi się powoli.



Ciała bezpostaciowe (amorficzne)

Oprócz ciał stałych o strukturze krystalicznej można spotkać w naszym otoczeniu ciała stałe bez takiej struktury. O takich ciałach mówimy, że są bezpostaciowe. Należą do nich np. szkło, smoła oraz niektóre tworzywa sztuczne. Takie substancje nie mają określonej temperatury topnienia – topią się w pewnym przedziale temperatur. Podczas podgrzewania robią się coraz bardziej miękkie, aż wreszcie stają się płynne. Dla tych ciał nie określa się ciepła topnienia. Na wykresie 22.5 przedstawiono porównanie zależności temperatury substancji od dostarczonej energii dla ciała krystalicznego (K) oraz dla ciała bezpostaciowego (L).



Ryc. 22.5. Porównanie zmian temperatury krysztalu (K) oraz ciała bezpostaciowego (L) podczas zmiany stanu skupienia

Podsumowanie

- ▶ Podczas topnienia ciepło jest dostarczane do ciała, a podczas krzepnięcia ciało oddaje ciepło do otoczenia.
- ▶ **Ciepło topnienia L** to wielkość określająca ilość ciepła niezbędnego do stopienia jednostki masy substancji mającej temperaturę topnienia.
- ▶ Ciepło pobrane (lub oddane) podczas topnienia (lub krzepnięcia) przez substancję o masie m można obliczyć ze wzoru:

$$Q = L \cdot m$$

PYTANIA I ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego w upalny dzień lody w wafelku topią się powoli.
2. Gdy włożymy foremkę z wodą do zamrażalnika, po stosunkowo krótkim czasie woda osiągnie temperaturę 0°C . Proces zamiany tej wody w lód trwa natomiast o wiele dłużej. Wyjaśnij, co jest tego przyczyną.
3. Basia wyjęła z zamrażalnika kostki lodu o temperaturze -15°C i umieściła je w termosie. Gdy po jakimś czasie zaczęła wyjmować lód z termosu, zauważyła, że była tam również woda. Zapisz, jaka była wówczas temperatura lodu w termosie. Uzasadnij odpowiedź.
4. Porównaj ciepło niezbędne do stopienia pewnej masy lodu z ciepłem potrzebnym do ogrzania wody powstałej z tego lodu do temperatury wrzenia.
5. Czy kawałki ołowiu o temperaturze 200°C stopią się, gdy zalejemy je ciekłą cyną o temperaturze 280°C ? Skorzystaj z tabeli 3. Uzasadnij odpowiedź.



23. Parowanie i skraplanie

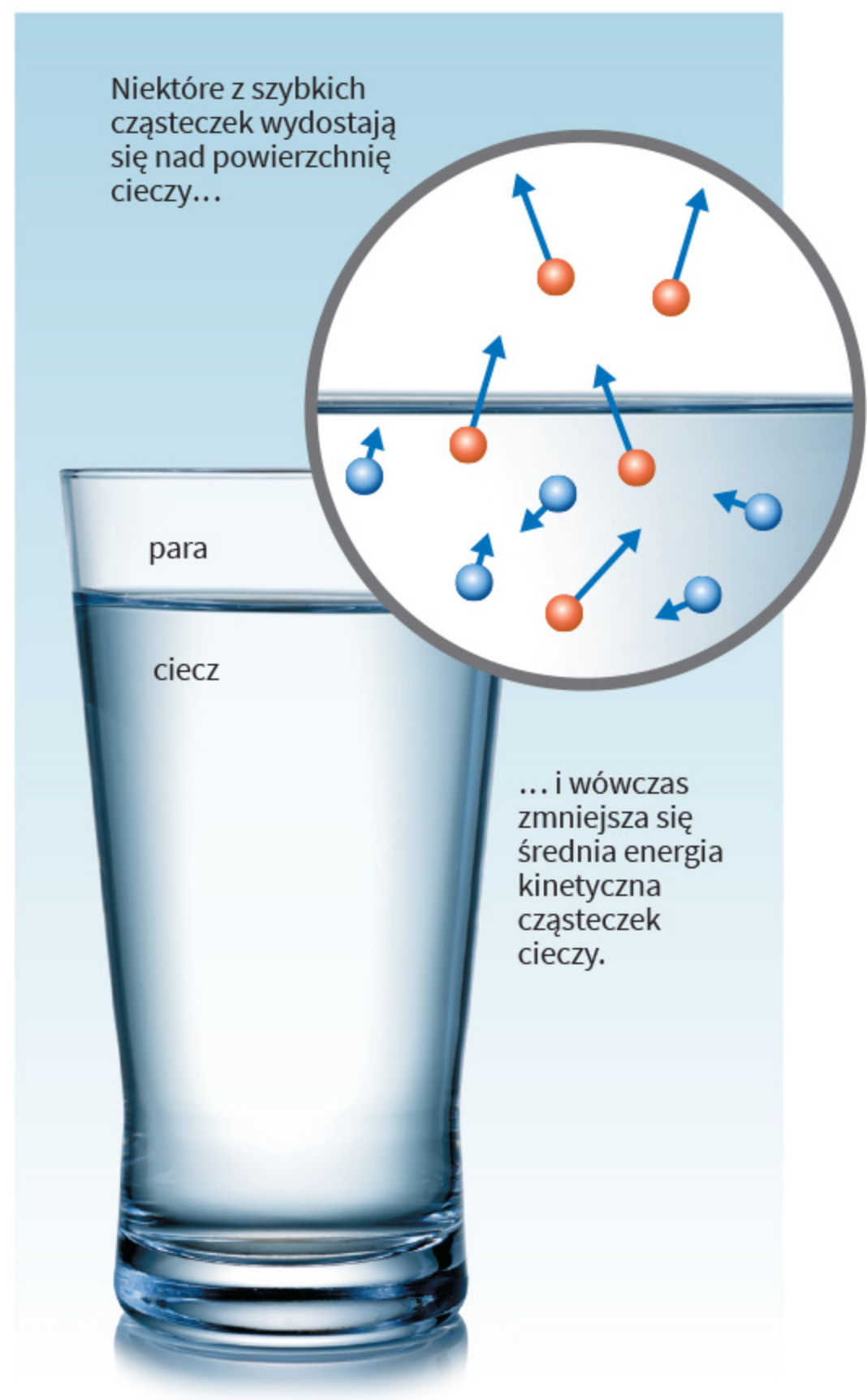
- Parowanie i wrzenie
- Ciepło parowania
- Skraplanie

→ **Przypomnij sobie** różnice w budowie wewnętrznej cieczy i gazów.

Parowanie i skraplanie to procesy, które możemy obserwować na co dzień. Wysychanie mokrych ubrań rozwieszonych na sznurze w słoneczny dzień czy powstawanie chmur to tylko niektóre przykłady tych zjawisk. Jednym z ważniejszych mechanizmów pozwalających ludziom utrzymywać stałą temperaturę ciała jest pocenie się. W tym rozdziale wyjaśnimy, dlaczego w wyniku parowania obniża się temperatura ciała.

Parowanie

Przemiana cieczy w gaz to **parowanie**. Ciecze składają się z chaotycznie mieszających się i oddziałujących ze sobą cząsteczek. Oderwanie się każdej cząsteczki od pozostałych wymaga pokonania sił przyciągania i wiąże się ze wzrostem energii oddziaływań. Większość cząsteczek na powierzchni cieczy nie ma wystarczającej energii kinetycznej do oderwania się od pozostałych. Jednak w wyniku zderzeń niektóre cząsteczki uzyskują prędkości dużo większe od pozostałych. Gdy szybka cząsteczka porusza się w odpowiednią stronę, może opuścić ciecz. Im wyższa temperatura cieczy, tym więcej jest w niej szybkich cząsteczek. Zatem im wyższa temperatura – tym bardziej intensywne jest parowanie. Z cieczy uwalniają się cząsteczki o największych energiach, a pozostają w niej cząsteczki o energiach mniejszych. Oznacza to, że **średnia energia kinetyczna cząsteczek parującej cieczy maleje, więc parowanie cieczy obniża jej temperaturę**.

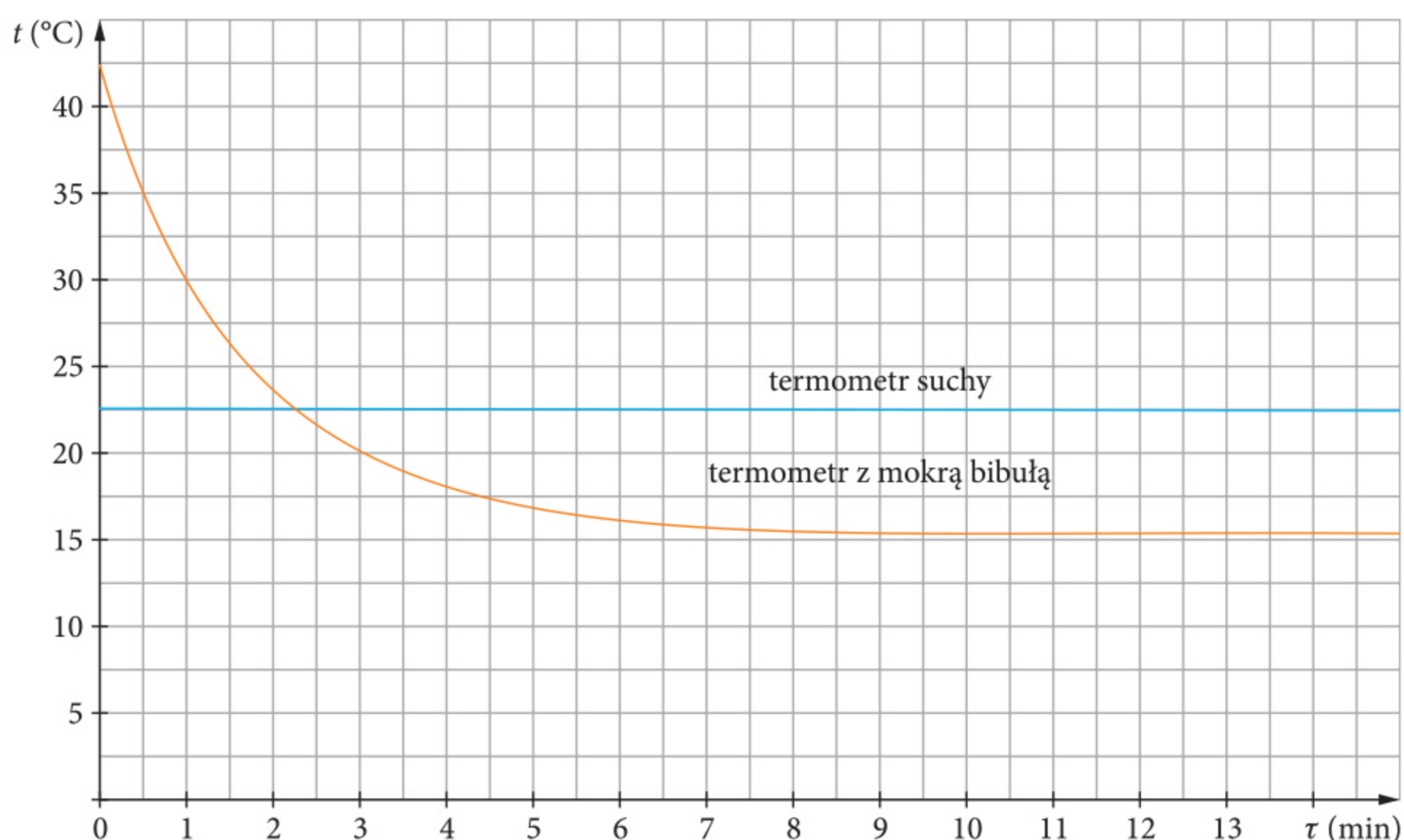


Ryc. 23.1. Schemat mechanizmu parowania



Można się o tym przekonać przez wykonanie prostego doświadczenia. Dwa termometry kuchenne owijamy bibułą. Bibułę jednego z nich oblewamy ciepłą wodą. Termometry ustawiamy w niedużej odległości od siebie i obserwujemy ich wskazania.

Ryc. 23.2. Termometr owinięty wilgotną bibułą wskazuje temperaturę niższą niż temperatura otoczenia, którą wskazuje drugi termometr



Ryc. 23.3. Zależność temperatury wskazywanej przez termometry od czasu (oznaczonego literą τ)

Na rycinie 23.3 przedstawiono wyniki uzyskane podczas takiego doświadczenia. Termometr z suchą bibułą cały czas pokazywał temperaturę otoczenia, natomiast temperatura wskazywana przez termometr z mokrą bibułą szybko spadała. Parująca woda pobierała energię z termometru, z którym się stykała, dlatego jego temperatura była mniejsza od temperatury otoczenia.

To zjawisko możemy wykorzystać, gdy na przykład chcemy schłodzić butelkę wody w upalny dzień nad morzem, ale bez wkładania jej do wody. Butelkę należy owinąć wilgotną szmatką, a następnie zawiesić w miejscu zacienionym (np. pod parasolem) i przewiewnym. Schnąca szmatka będzie pobierała energię od wody w butelce, a to spowoduje obniżanie temperatury wody.

Parowanie wody z powierzchni skóry jest najbardziej efektywnym sposobem pozbywania się nadmiaru energii przez organizm ludzki. Gdy jest nam zbyt ciepło, na skórze pojawia się pot, składający się głównie z wody. Jej parowanie powoduje ochładzanie organizmu. Mechanizm ten działa efektywnie tylko wówczas, gdy pot może odparować. Gdy w otaczającym nas gorącym powietrzu jest dużo pary wodnej, parowanie jest wolniejsze i jest nam gorąco. Dlatego łatwiej jest znieść upał w klimacie suchym niż wilgotnym.

Niektóre zwierzęta nie mają tak licznych gruczołów potowych jak ludzie. Na przykład koty, gdy jest im zbyt gorąco, mają zwyczaj wylizywać swoje futro. Pokrywają je w ten sposób warstwą śliny, w większości składającej się z wody (ryc. 23.4). Parowanie wody z futra ochładza ciało.



Ryc. 23.4. Parowanie wody z powierzchni skóry jest jednym z głównych mechanizmów termoregulacji ssaków

Wrzenie

Parowanie cieczy zachodzi w każdej temperaturze, ale jest tym bardziej intensywne, im wyższa jest temperatura cieczy. **Wrzenie to parowanie odbywające się w całej objętości cieczy, nie tylko na jej powierzchni.** Powstają wówczas pęcherzyki pary, które unoszą się dzięki działaniu siły wyporu. Pod ciśnieniem atmosferycznym woda wrze w temperaturze 100 °C. Temperatura wrzenia pod ciśnieniem atmosferycznym jest ściśle określona dla każdej cieczy.



Ryc. 23.5. Wrzenie, czyli parowanie wody w całej jej objętości

DOŚWIADCZENIE 1.

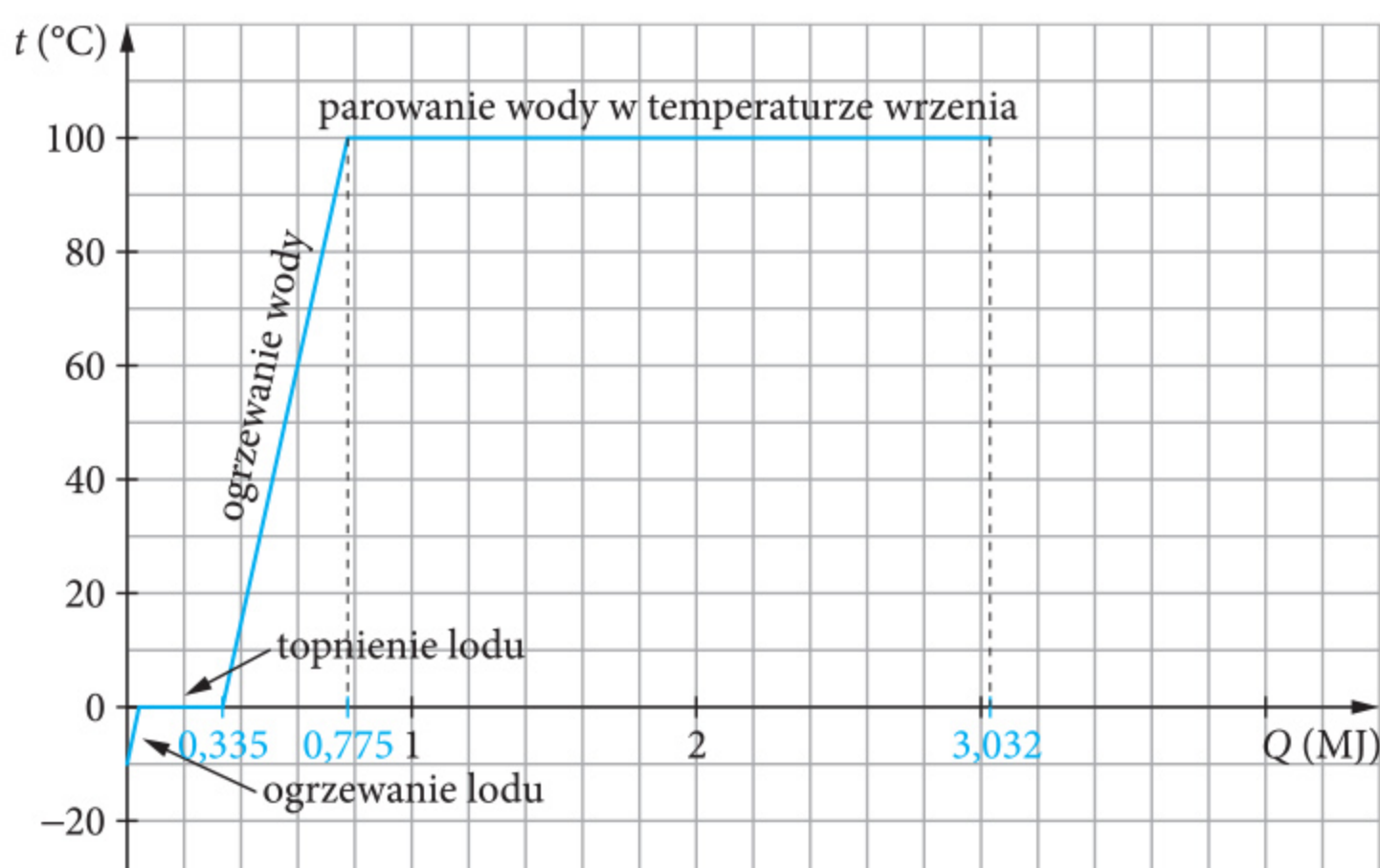
Do wykonania doświadczenia będą potrzebne: próżniowy pojemnik do przechowywania żywności, dwie szklanki oraz termometr.

Wlej do szklanek przegotowaną wodę o temperaturze około $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jedną ze szklanek umieść w pojemniku próżniowym i zamknij pokrywę, a drugą pozostaw na zewnątrz pojemnika. Za pomocą pompki próżniowej usuń powietrze ze środka pojemnika. Wtedy woda zacznie intensywnie parować.

Wyjmij szklankę z pojemnika i sprawdź, jak zmieniła się temperatura wody w obu szklankach. Wyjaśnij obserwowany efekt.

Ciepło parowania

W poprzednim rozdziale analizowaliśmy wykres zależności temperatury od dostarczonej energii podczas ogrzewania lodu, a potem wody. Teraz uzupełnimy ten wykres o fragment przedstawiający ogrzewanie wody do temperatury $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ oraz odparowanie wody w temperaturze wrzenia (ryc. 23.6).



Ryc. 23.6. Zależność temperatury 1 kg wody od dostarczonej energii podczas przemian, w których z lodu powstaje para wodna o temperaturze 100°C

Z wykresu wynika, że energia potrzebna do odparowania wody jest znacznie większa od energii potrzebnej do stopienia tej samej masy lodu. Oznacza to, że uwolnienie cząsteczek wody ze stanu ciekłego wymaga dużo większej energii niż rozerwanie wiązań sieci krystalicznej lodu.

Ciepło parowania danej cieczy określa, ile ciepła potrzeba do odparowania jednostki masy tej cieczy w stałej temperaturze.

Ciepło parowania zależy od temperatury, lecz w niewielkim stopniu, więc będziemy tę zależność pomijać.

Ciepło Q potrzebne do odparowania dowolnej masy cieczy w stałej temperaturze można obliczyć ze wzoru:

$$Q = R \cdot m \quad (1)$$

gdzie:

m – masa ciała,

R – ciepło parowania.

Tabela 4. Temperatura wrzenia i ciepło parowania niektórych substancji (pod ciśnieniem 1000 hPa)

Substancja	Temperatura wrzenia (°C)	Ciepło parowania $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$
azot	-196	198
tlen	-163	214
alkohol etylowy	78,5	844
woda	100	2260
rtęć	357	290
ołów	1750	860
srebro	2200	2360
żelazo	2800	6300

PRZYKŁAD 1.

Podczas gotowania wody w garnku w czasie 5 minut odparowało 70 g wody. Obliczmy moc palnika kuchenki.

Zakładamy, że można pominąć straty energii podczas dostarczania ciepła do garnka. Ciepło niezbędne do odparowania wody obliczymy ze wzoru:

$$Q = R \cdot m$$

Po podstawieniu danych do wzoru otrzymujemy:

$$Q = 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,07 \text{ kg} = 158,2 \text{ kJ}$$

Moc palnika obliczymy ze wzoru:

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

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$P = \frac{158,2 \cdot 10^3 \text{ J}}{300 \text{ s}} \approx 530 \text{ W}$$

Moc palnika wynosiła zatem około 530 W.

Skraplanie

Skraplanie to proces odwrotny do parowania, gdyż w tym procesie gaz zamienia się w ciecz. Gdy gaz oddaje ciepło, obniża się jego temperatura i cząsteczki zaczynają się wolniej poruszać. Wówczas w chwilach zderzeń siły działające między cząsteczkami mogą je ze sobą połączyć. W ten sposób może powstać skupisko cząsteczek, czyli kropla cieczy. Skraplanie przyspieszają niewielkie cząstki pyłu, wokół których mogą się tworzyć krople cieczy. Podczas skraplania gaz oddaje do otoczenia tyle energii, ile ciecz o tej samej masie pobrałaby podczas parowania.

Im większa gęstość gazu, tym więcej cząsteczek się do siebie zbliża, zatem odpowiednie zwiększenie gęstości gazu również powoduje skraplanie. Skraplanie pary wodnej prowadzi m.in. do powstawania chmur. Ciepłe i wilgotne powietrze unosi się w górę, a podczas wznoszenia się ochładza. Na pewnej wysokości powstają drobne krople wody i tworzą się chmury. Energia uwolniona w procesie skraplania pary wodnej zamienia się w energię kinetyczną ogromnych mas powietrza – stąd bierze się duża prędkość wiatru w cyklonach tropikalnych.



WARTO WIEDZIEĆ

Mokry namiot

Skąd się bierze woda po wewnętrznej stronie namiotu nad ranem, nawet po bezchmurnej nocy? Wewnątrz namiotu panuje wyższa wilgotność niż na zewnątrz. Jest ona wywołana obecnością przebywających w środku ludzi. Ścianka namiotu styka się z chłodniejszym powietrzem na zewnątrz, więc jej temperatura jest niższa od temperatury powietrza wewnątrz. Gdy wilgotne powietrze zetknie się z chłodniejszą powierzchnią, następuje skraplanie zawartej w nim pary wodnej. Podobnie skrapla się para na szklach okularów, gdy wchodzimy podczas mrozu do ciepłego pomieszczenia.



PODSUMOWANIE

- ▶ **Parowanie** to przemiana cieczy w gaz. **Skraplanie** to proces odwrotny – przemiana gazu w ciecz.
- ▶ Parowanie zachodzi w każdej temperaturze. Im wyższa temperatura, tym szybsze parowanie.
- ▶ **Wrzenie** to parowanie cieczy w całej jej objętości w ściśle określonej temperaturze, zwanej **temperaturą wrzenia**.
- ▶ **Ciepło parowania R** to wielkość określająca ilość ciepła niezbędnego do całkowitego odparowania jednostki masy cieczy w stałej temperaturze.
- ▶ Zależność ciepła pobranego przez substancję podczas parowania od jej masy dana jest wzorem:

$$Q = R \cdot m$$

PYTANIA I ZADANIA

1. Dlaczego trudniej znieść upał w powietrzu wilgotnym niż suchym?
2. Wyjaśnij, dlaczego po wyjściu z kąpieli często jest nam chłodniej, nawet wówczas, gdy temperatura powietrza jest taka sama jak temperatura wody.
3. Oblicz, ile razy ciepło potrzebne do zamiany wody w parę wodną jest większe od ciepła niezbędnego do zamiany tej samej masy lodu w wodę.
4. W programach kulinarnych można usłyszeć o tym, że aby zagęścić sos, należy podgrzewać go bez przykrywki. Wyjaśnij, dlaczego sos poddany takiemu procesowi stanie się bardziej gęsty.
5. Czajnik elektryczny o mocy 1200 W pracował przez 15 minut i stale dostarczał energię do wrzącej wody. Oblicz, ile wody wyparowało w tym czasie z czajnika.





24. Bilans cieplny – przykłady

- Bilans cieplny w przemianach stanu skupienia
- Efekt cieplarniany
- Bilans energetyczny Ziemi

→ **Przypomnij sobie**, co wiesz o bilansie cieplnym oraz zmianach stanu skupienia.

W tym rozdziale będziemy kontynuować rozważania dotyczące bilansu cieplnego, rozpoczęte w rozdziale 21. Omówimy również efekt cieplarniany i bilans cieplny naszej planety.

Bilans cieplny w przemianach stanu skupienia

Z zasady zachowania energii wynika, że **gdy dwa ciała wymieniają energię w postaci ciepła, ciepło oddane przez jedno ciało jest równe ciepłu pobranemu przez drugie**. Rozpatrywaliśmy już proste przypadki bilansu cieplnego, a teraz przeanalizujemy przykłady z uwzględnieniem zmian stanu skupienia.

s. 211

PRZYKŁAD 1.

Do pojemnika, którego ścianki pokryto izolatorem, wlewo wodę o temperaturze 37°C . Pojemnik pozostawiono otwarty. W wyniku parowania temperatura wody spadła do 36°C , a w pojemniku pozostało 60 kg wody. Obliczmy, ile pary wodnej opuściło pojemnik z wodą.

Możemy zapisać bilans cieplny – ciepło pobrane przez wodę w procesie parowania jest równe ciepłu oddanemu przez pozostałą wodę w procesie ochładzania:

$$Q_{\text{pob}} = Q_{\text{odd}}$$

$$Rm_p = c_w m_w (t_0 - t_k)$$

Szukana masa pary wodnej:

$$m_p = \frac{c_w m_w (t_0 - t_k)}{R}$$

Po podstawieniu danych do wzoru otrzymujemy:

$$m_p = \frac{4200 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}} \cdot 60 \text{ kg} \cdot 1^{\circ}\text{C}}{2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} \approx 0,11 \text{ kg}$$

Odparowało około 0,1 kg wody, więc jej ubytek jest niewielki.

Ten wynik jest istotny z uwagi na termoregulację człowieka. Człowiek w większości składa się z wody. Wobec tego, aby temperatura ciała ludzkiego obniżyła się o 1°C , wystarczy, że z powierzchni skóry odparuje około 0,1 kg wody.

PRZYKŁAD 2.

Obliczmy, o ile ochłodzi się gorący napój po wrzuceniu do niego kostki lodu. Załóżmy, że napój (będziemy go traktować jak wodę) ma masę 200 g i temperaturę początkową 80 °C, a kostka lodu – masę 20 g i temperaturę 0 °C. Zakładamy, że napój jest w termosie, czyli nie ma wymiany energii z otoczeniem.

Ponieważ naczynie jest izolowane, ciepło pobrane przez lód jest równe ciepłu oddanemu przez napój. Pomijamy zmianę temperatury ścianek termosu.

$$Q_{\text{pob}} = Q_{\text{odd}}$$

Zwróćmy uwagę, że ciepło pobrane przez lód składa się z dwóch składników: ciepła potrzebnego do stopienia lodu w temperaturze 0 °C oraz ciepła potrzebnego do podgrzania powstałej w ten sposób wody. Po podstawieniu:

$$m_l L + m_l c (t - 0 \text{ °C}) = m_w c (80 \text{ °C} - t)$$

Po wymnożeniu przez wyrażenia w nawiasach otrzymujemy:

$$m_l L + m_l c t = m_w c \cdot 80 \text{ °C} - m_w c t$$

Wyrazy z niewiadomą t zapisujemy po lewej stronie równania, a pozostałe po prawej:

$$m_l c t + m_w c t = m_w c \cdot 80 \text{ °C} - m_l L$$

Wyłączamy t przed nawias i obie strony równania dzielimy przez wyrażenie w tym nawiasie. Otrzymujemy:

$$t = \frac{m_w c \cdot 80 \text{ °C} - m_l L}{(m_l + m_w) c}$$

Teraz podstawiamy dane i obliczamy t :

$$t = \frac{0,2 \text{ kg} \cdot 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \cdot 80 \text{ °C} - 0,02 \text{ kg} \cdot 334\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}}{(0,02 \text{ kg} + 0,2 \text{ kg}) \cdot 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}} \approx 65,5 \text{ °C}$$

Temperatura napoju spadnie mniej więcej o 15 °C. Wrzucenie kostki lodu zdecydowanie bardziej ochłodzi napój niż włożenie do niego chłodnej łyżeczki (porównaj otrzymaną temperaturę końcową z wynikiem otrzymanym w przykładzie 3. z rozdziału 21). W rzeczywistości temperatura lodu wyjętego z zamrażarki jest znacznie poniżej zera. Jak to wpłynęłoby na nasz wynik (patrz zadanie 5. ze s. 185)?

s. 161

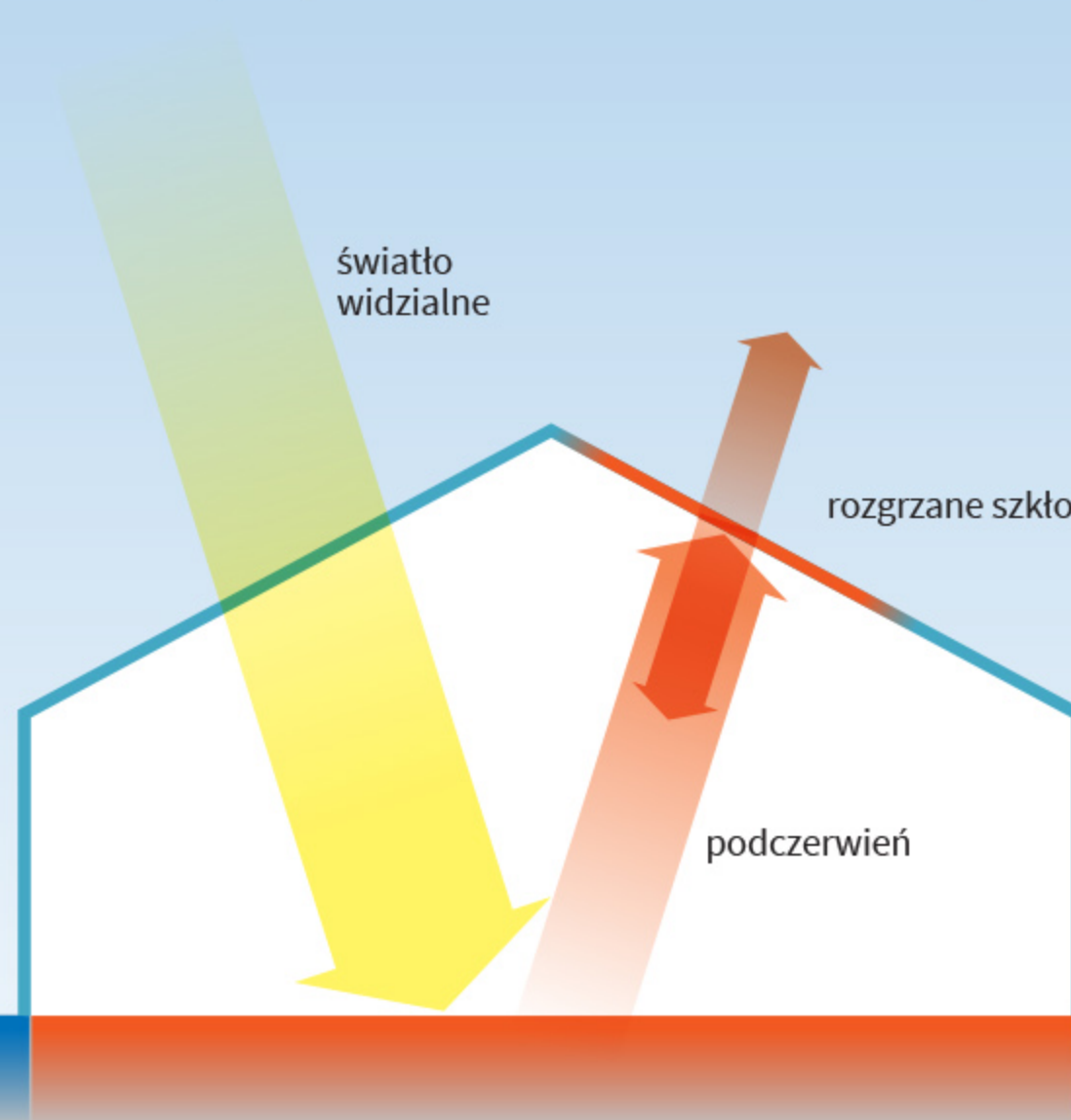
s. 185

Efekt cieplarniany

Dlaczego w samochodach lub w pociągach w czasie słonecznej pogody jest dużo cieplej niż na zewnątrz? Podobnie jest w pomieszczeniach z dużymi niezastłoniętymi oknami. Wynika to między innymi z faktu, że szkło nie jest przezroczyste dla całego zakresu promieniowania elektromagnetycznego. Przepuszcza ono światło oraz bliską (tzn. sąsiadującą ze światłem) podczerwień. Natomiast powierzchnia Ziemi, tak jak inne ciała o podobnej temperaturze, emituje promieniowanie podczerwone o długościach fali mniej więcej 5–20 μm. Podczerwień z tego zakresu jest przez szkło pochłaniana.



Spójrzmy na rycinę 24.1. Światło słoneczne przechodzące przez szkło ogrzewa podłoże szklarni, które emituje podczerwień. To promieniowanie pada od wewnątrz na szklaną powierzchnię i jest przez nią pochłaniane. Szkło ogrzewa się, więc emituje coraz więcej podczerwieni. W końcu przy pewnej temperaturze ustala się równowaga: szkło emituje tyle samo podczerwieni, ile pochłania. Szkło emituje jednak podczerwień w obie strony – w ten sposób mniej więcej połowa promieniowania wysyłanego przez podłoże wraca do niego i dodatkowo je ogrzewa. To zjawisko nosi nazwę **efektu cieplarnianego**. Jest ono powszechnie wykorzystywane w szklarniach i właśnie dzięki niemu już wczesną wiosną możemy jeść świeże warzywa. Niestety, efekt cieplarniany jest również przyczyną silnego nagrzewania się przeszklonych pomieszczeń w czasie letnich upałów.



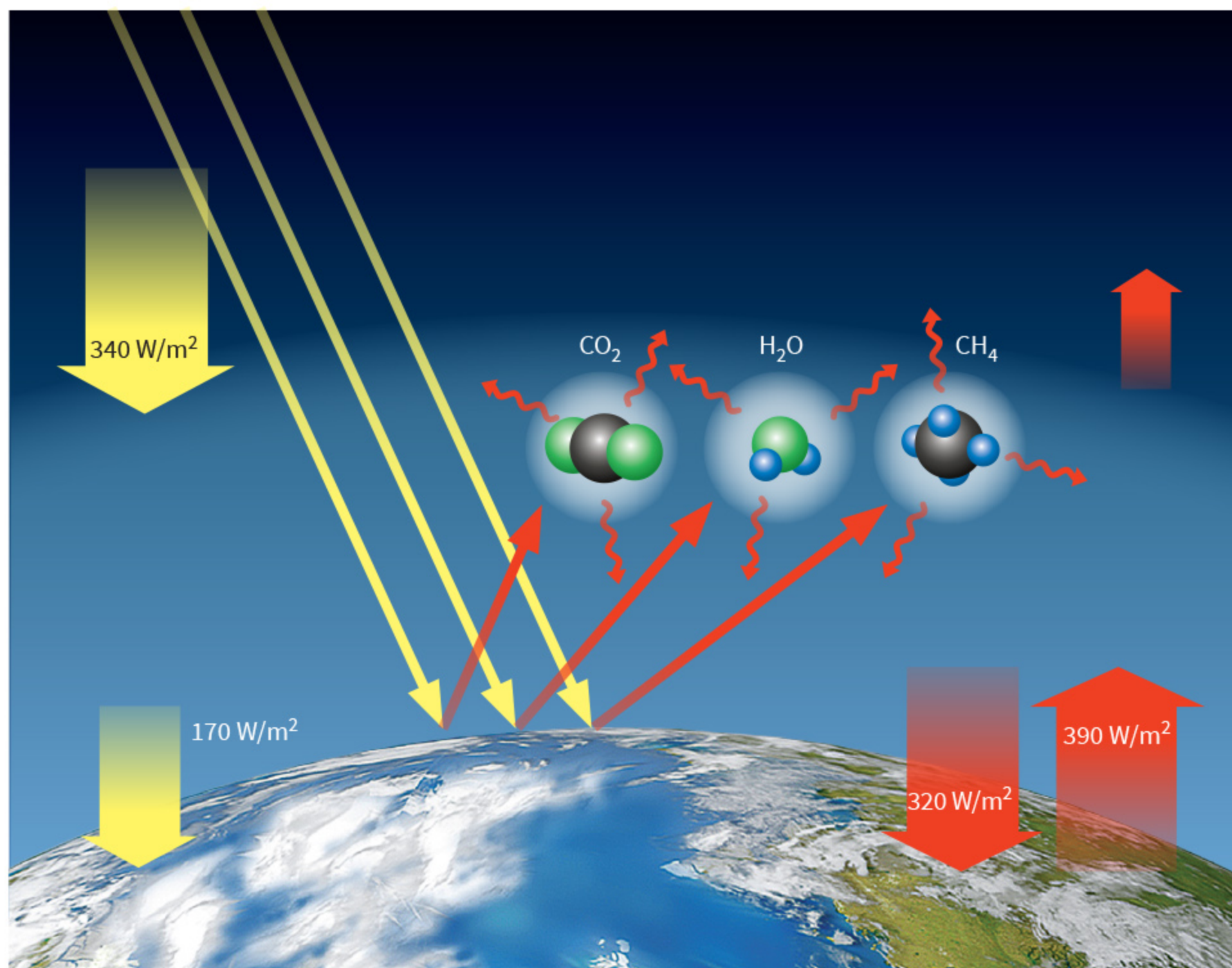
Ryc. 24.1. Efekt cieplarniany

Bilans energetyczny Ziemi

Efekt cieplarniany odgrywa ogromną rolę w kształtowaniu ziemskiego klimatu. Ziemia jako planeta istnieje wystarczająco długo, by pozostawać w równowadze termodynamicznej ze swym kosmicznym otoczeniem. Średnia moc promieniowania pochłanianego przez Ziemię jest równa mocy promieniowania przez nią emitowanego.

Powierzchnia naszej planety jest ogrzewana z dołu i z góry. Z dołu ciepło płynie z gorącego wnętrza Ziemi. Powoduje ono tak spektakularne zjawiska jak wędrówka kontynentów, erupcje wulkanów czy tworzenie się wysp, np. Hawajów. Jednak przekaz energii z wnętrza Ziemi jest co najmniej tysiąc razy mniejszy od przekazu energii słonecznej, więc praktycznie nie ma wpływu na temperaturę powierzchni. Do górnej warstwy

atmosfery dociera promieniowanie słoneczne, którego średnia moc to około 340 W na 1 m^2 powierzchni kuli ziemskiej (ryc. 24.2). Każdy metr kwadratowy powierzchni Ziemi pochłania średnio 170 W tego promieniowania, gdyż pozostała część jest odbijana lub pochłaniana przez atmosferę. Natomiast powierzchnia naszej planety promieniuje z mocą około 390 W/m^2 . Żeby wyjaśnić tę różnicę, powinniśmy uwzględnić efekt cieplarniany. Niektóre składniki atmosfery – w szczególności para wodna i dwutlenek węgla – przepuszczają promieniowanie słoneczne, lecz pochłaniają promieniowanie ciepłe emitowane przez powierzchnię Ziemi. Działają więc jak szyba (ryc. 24.1) i dlatego nazywamy je **gazami cieplarnianymi**. Pochłoniętą energię po chwili wypromieniowują we wszystkie strony. Dzięki gazom cieplarnianym atmosfera kieruje ku powierzchni Ziemi promieniowanie o mocy około 320 W/m^2 . Wobec tego powierzchnia Ziemi jest ogrzewana w znacznie większym stopniu przez jej własne promieniowanie „zawrócone” przez gazy cieplarniane niż przez promieniowanie słoneczne. Właśnie dlatego średnia temperatura na Ziemi wynosi około 15°C . Powierzchnia Ziemi pozbawionej atmosfery miałaby średnią temperaturę co najmniej o 30°C niższą. W powyższej analizie nie uwzględniono ciepła, które powierzchnia Ziemi oddaje wskutek parowania wody i konwekcji powietrza. Dokładniejszy obraz bilansu energetycznego Ziemi można zobaczyć na infografice na stronach 182–183.



Ryc. 24.2. Efekt cieplarniany w atmosferze Ziemi

Bilans energetyczny Ziemi

Uśrednione przekazy energii dochodzącej do Ziemi i wypromieniowanej przez nią w przestrzeń kosmiczną pokazują szczególną rolę atmosfery w bilansie energetycznym. Dzięki efektowi cieplarnianemu do powierzchni Ziemi dociera z atmosfery prawie dwa razy więcej energii niż ze Słońca.

342 W/m²
promieniowanie
słoneczne
docierające
do górnej warstwy
atmosfery

107 W/m²
promieniowanie
słoneczne odbite
przez chmury
i powierzchnię
Ziemi



Epoka lodowa

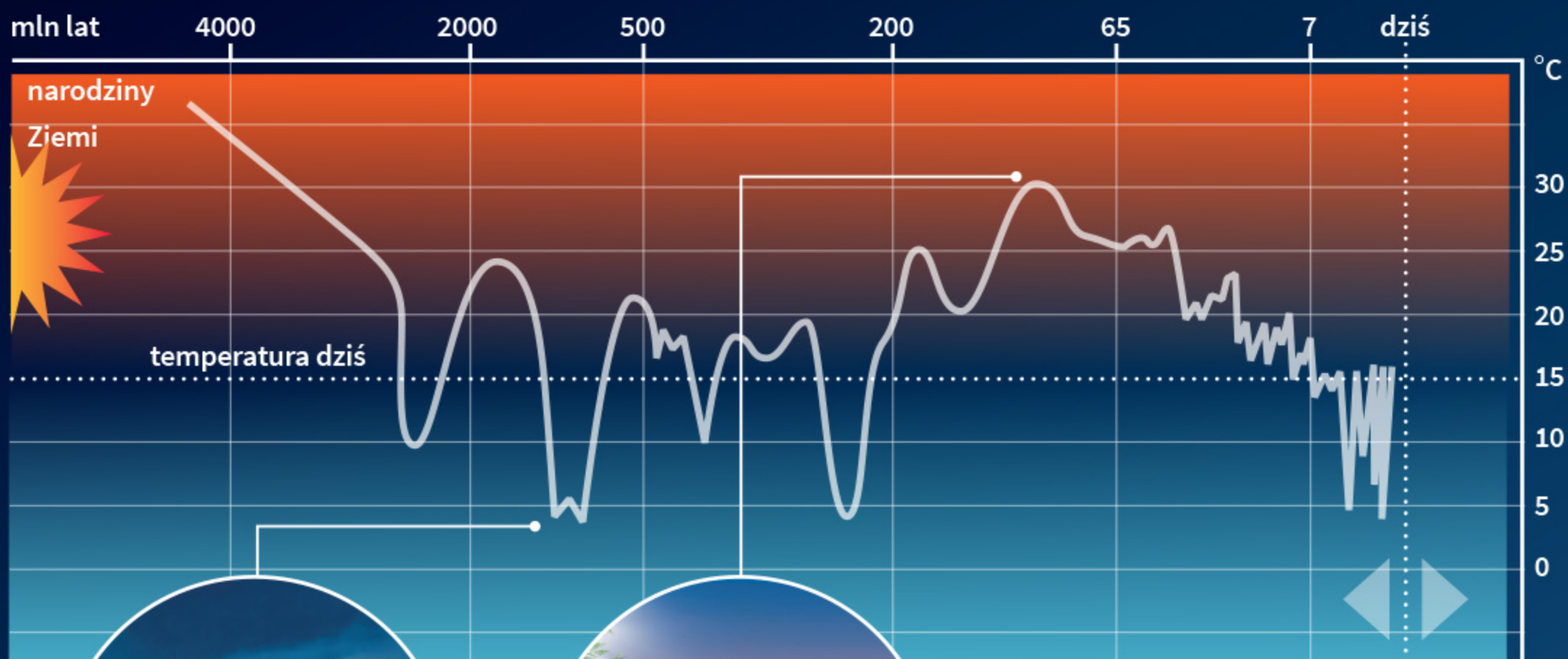
Przez większą część historii Ziemi średnia temperatura była wyższa niż dziś. My żyjemy w epoce lodowej, a dokładniej w tzw. interglacjale, czyli w okresie ocieplenia pomiędzy okresami zimna.

67 W/m²
promieniowanie
pochłonięte
w atmosferze

168 W/m²
promieniowanie
słoneczne
pochłonięte przez
powierzchnię
Ziemi

30 W/m²
promieniowanie
odbite
od powierzchni
Ziemi

Przypuszczalna zależność średniej temperatury powierzchni Ziemi od czasu



Ziemia śnieżka

Okolo 700 mln lat temu wskutek znacznego zmniejszenia się ilości dwutlenku węgla w atmosferze prawie cała powierzchnia Ziemi pokryła się śniegiem i lodem. Takie ochłodzenie teoretycznie powinno być nieodwracalne, gdyż śnieg skutecznie odbija promieniowanie słoneczne. Życie na Ziemi zostało jednak uratowane dzięki wulkanom, nieustannie emitującym CO_2 do atmosfery.

Epoka dinozaurów

Okolo 100 mln lat temu (w epoce dominacji dinozaurów) średnia temperatura powierzchni Ziemi była dużo wyższa niż dzisiaj.

gazy cieplarniane

235 W/m^2
promieniowanie
podczerwone
wychodzące
z atmosfery

390 W/m^2
podczerwień
emitowana
przez powierzchnię
Ziemi

324 W/m^2
podczerwień
pochłaniana
przez powierzchnię
Ziemi

24 W/m^2
ciepło
przekazywane
atmosferze przez
unoszące się
podgrzane
powietrze

78 W/m^2
ciepło oddawane
przez powierzchnię
Ziemi w trakcie
parowania

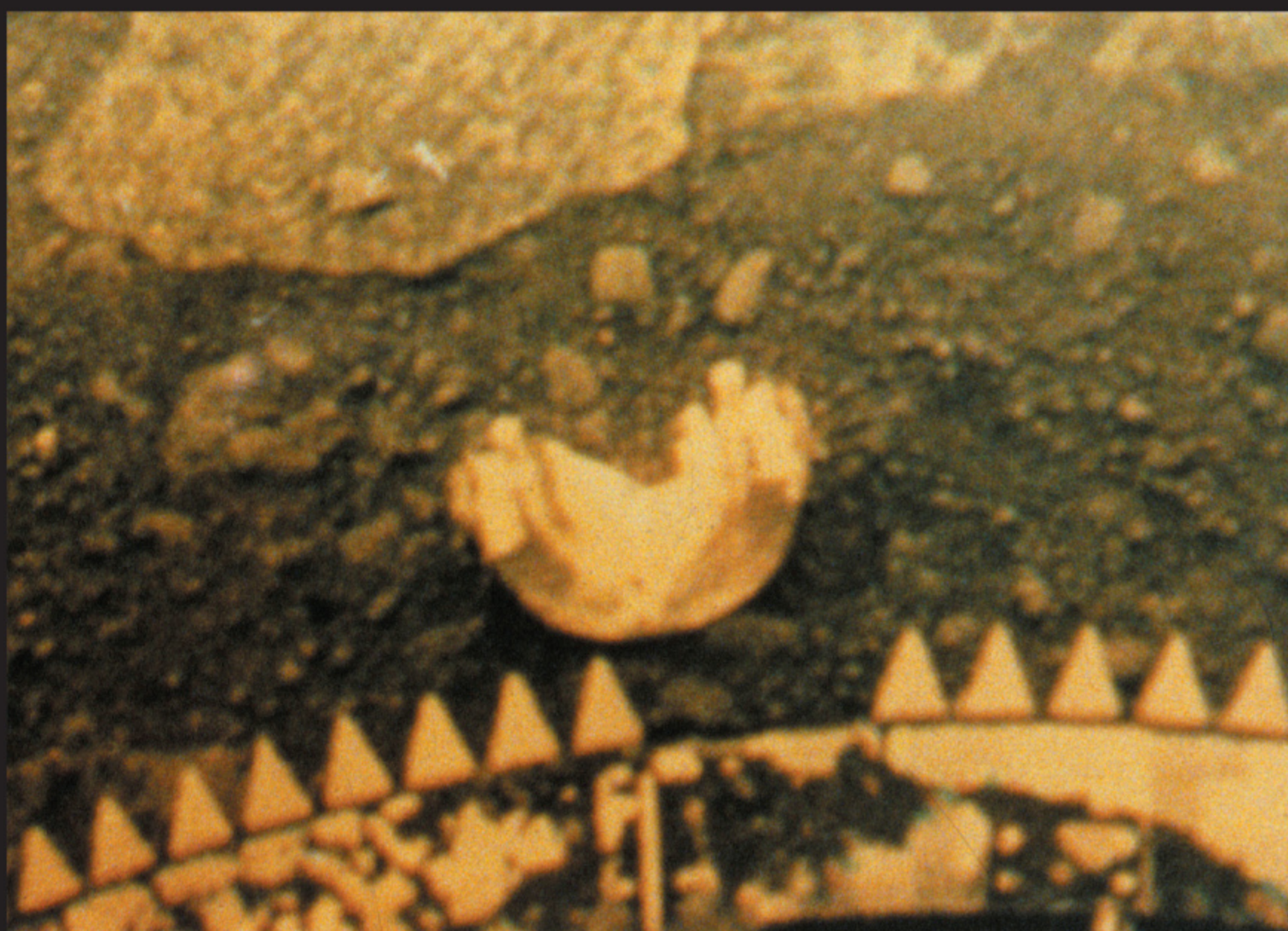


WARTO WIEDZIEĆ

Temperatura na Marsie i Wenus

Mars jest badany przez wiele sond i dysponujemy bardzo dużą liczbą szczegółowych zdjęć jego powierzchni. Średnia temperatura powierzchni Marsa wynosi około $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jest ona mniej więcej równa temperaturze obliczonej z bilansu cieplnego planety bez udziału atmosfery – moc pochłoniętego promieniowania słonecznego jest równa mocy promieniowania cieplnego wyemitowanego przez powierzchnię Marsa.

Wenus jest planetą znajdującą się najbliżej Ziemi. Jest też do niej najbardziej zbliżona masą i rozmiarami. Jednak w tym przypadku dysponujemy zaledwie paroma dość słabymi zdjęciami jej powierzchni (fot.).



Pierwsze zdjęcia powierzchni Wenus zostały wykonane w 1975 roku przez radzieckie sondy Wenera 9 i Wenera 10. Działały one po wylądowaniu zaledwie przez godzinę. Trudno się temu dziwić, skoro zarejestrowały ciśnienie ponad 90 razy większe od ziemskiego. Prawdziwą sensacją była jednak zmierzona przez sondy temperatura przy powierzchni Wenus: $485\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Wenera 9) i $465\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Wenera 10). W takiej temperaturze ołów jest cieczą!

Dlaczego na Wenus panują takie piekielne warunki? Ta planeta jest bliżej Słońca niż Ziemia, ale z powodu gęstej powłoki chmur odbija aż 70 % padającego na nią promieniowania. Obliczona dla niej temperatura równowagowa to zaledwie około $-30\text{ }^{\circ}\text{C}^*$. Wyjaśnieniem tak wysokiej rzeczywistej temperatury przy powierzchni jest efekt cieplarniany. Ponad 90-krotnie gęstsza od ziemskiej atmosfera Wenus składa się głównie z dwutlenku węgla, który jest gazem cieplarnianym. Prawdopodobnie zaraz po uformowaniu się planet warunki na Wenus, Ziemi i Marsie nie różniły się znacznie, jednak planety te ewoluowały w zupełnie inny sposób.

* P. Artymowicz, *Astrofizyka układów planetarnych*, Warszawa 1995, s. 388.

W skutek rozwoju cywilizacji przemysłowej rośnie stężenie dwutlenku węgla w powietrzu. Z tym wzrostem skorelowany jest wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi, gdyż zwiększa się efekt cieplarniany. Zjawisko to nazywamy **globalnym ociepleniem**. Skutki tego efektu mogą być trudne do wyobrażenia. Nauka dostarcza narzędzi do zrozumienia świata i pozwala w pewnym stopniu przewidzieć konsekwencje naszych działań. Co jednak ludzkość uczyni w najbliższej przyszłości, tego już nauka przewidzieć nie może.

PODSUMOWANIE

- ▶ **Efekt cieplarniany** występuje, gdy niektóre substancje przepuszczające promieniowanie słoneczne pochłaniają promieniowanie termiczne emitowane z podłoża i zwiększają w ten sposób jego temperaturę.
- ▶ Efekt cieplarniany powodowany przez niektóre gazy sprawia, że średnia temperatura na Ziemi jest dużo wyższa niż temperatura, którą miałaby Ziemia bez tego efektu.

PYTANIA I ZADANIA

1. W jaki jeszcze sposób – poza efektem cieplarnianym – szklany dach zwiększa temperaturę podłoża w szklarni? Wskazówka: porównaj ruch powietrza w szklarni i poza nią.
2. Czy bardziej skutecznie będą powstrzymywać wzrost temperatury w mieszkaniu w czasie słonecznej pogody żaluzje umieszczone na zewnątrz czy wewnątrz pomieszczenia? Załóż, że są one wykonane z tego samego materiału. Uzasadnij odpowiedź.
3. Czy dach szklarni wykonany z przezroczystego tworzywa przepuszczającego całe promieniowanie podczerwone spowoduje silniejsze czy słabsze ogrzewanie podłoża niż dach szklany? Uzasadnij odpowiedź.
4. Termos zawiera 150 g wody o temperaturze 90 °C. Oszacuj, jaka masa wody musi odparować, aby temperatura spadła o 10 °C.
5. Do napoju o temperaturze 80 °C ważącego 200 g wrzucamy kostkę lodu o masie 20 g i temperaturze –18 °C. Jaka będzie temperatura końcowa? Załóż, że nie ma wymiany ciepła z otoczeniem.



25. Własności fizyczne wody

- Rozszerzalność cieplna wody
- Wilgotność powietrza
- Ciśnienie atmosferyczne a temperatura wrzenia

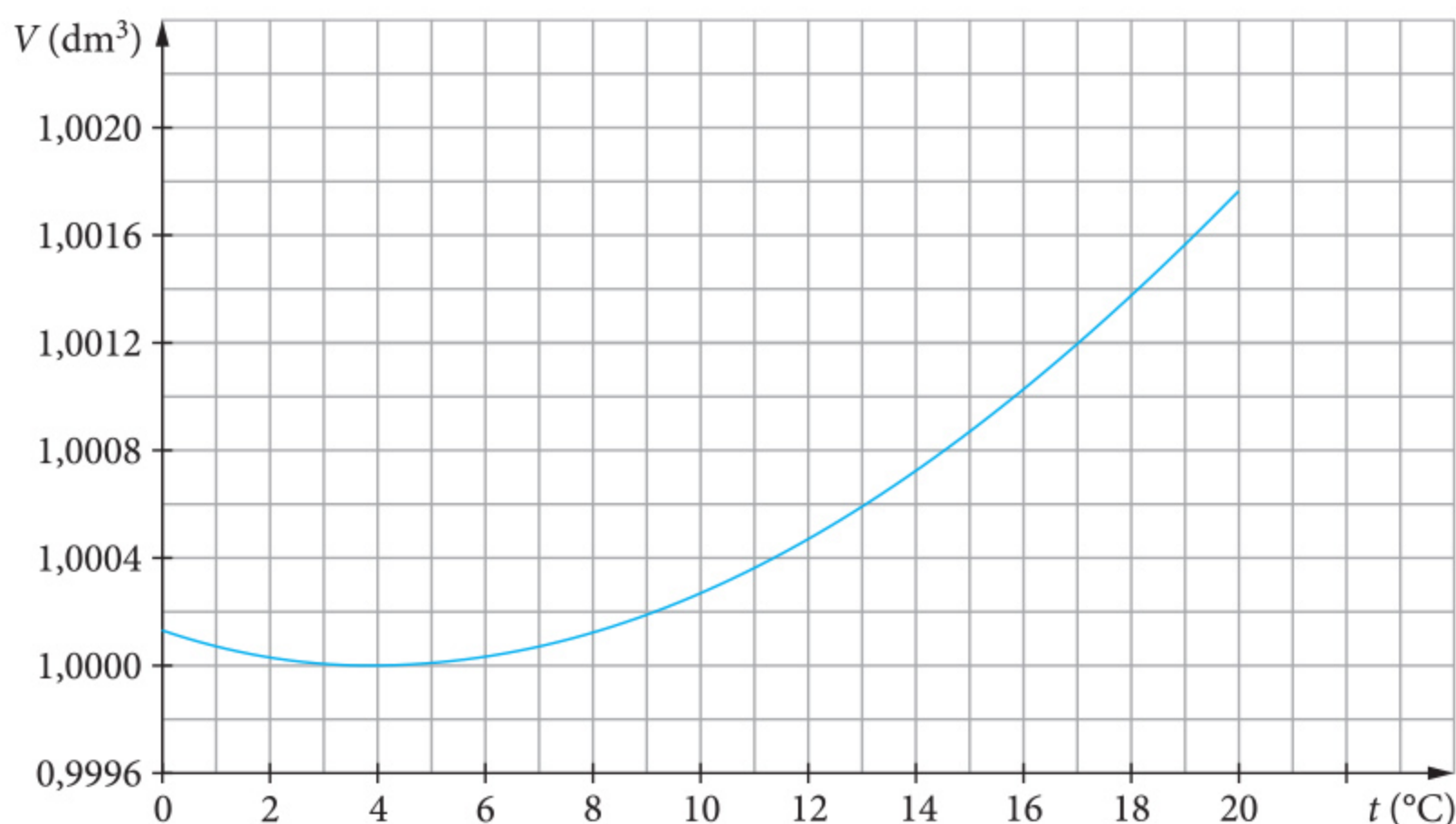
→ **Przypomnij sobie** wiadomości o zmianach stanu skupienia oraz o tym, czym są gęstość i ciśnienie.

Oceany pokrywają $\frac{2}{3}$ powierzchni Ziemi, rośliny i zwierzęta zbudowane są w głównej mierze z wody, a atmosfera zawiera biliony ton wody w postaci chmur i pary wodnej. Woda wyróżnia się spośród innych powszechnie występujących na Ziemi substancji nietypowymi własnościami fizycznymi.

Rozszerzalność cieplna wody

Podobnie jak inne substancje woda zmienia swoją objętość wraz ze wzrostem temperatury. Jednak ta zależność jest zupełnie inna niż dla większości substancji. **Objętość lodu jest prawie o 10 % większa od objętości tej samej masy wody, a zatem gęstość lodu jest mniejsza od gęstości zimnej wody.** Właśnie to powoduje, że lód tworzący się w zbiornikach wodnych jest wypierany ku górze i unosi się na powierzchni.

W procesie topnienia objętość mieszaniny wody i lodu maleje. Ale po stopieniu lodu wraz ze wzrostem temperatury objętość wody nadal maleje. Dopiero gdy temperatura przekroczy $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, dalszy jej wzrost spowoduje zwiększanie się objętości wody (ryc. 25.1).



Ryc. 25.1. Zależność objętości 1 kg wody od temperatury



Ryc. 25.2. Zestalona woda (lód) unosi się na powierzchni. To wyjątkowa cecha wśród substancji

Taka anomalna rozszerzalność cieplna wody ma bardzo duże znaczenie dla życia w środowisku wodnym. Dzięki niej w miarę głębokie zbiorniki wodne w naszych szerokościach geograficznych nigdy nie zamarzają w całości – przy dnie gromadzi się woda o temperaturze około 4 °C, co pozwala przetrwać zimę różnym organizmom.

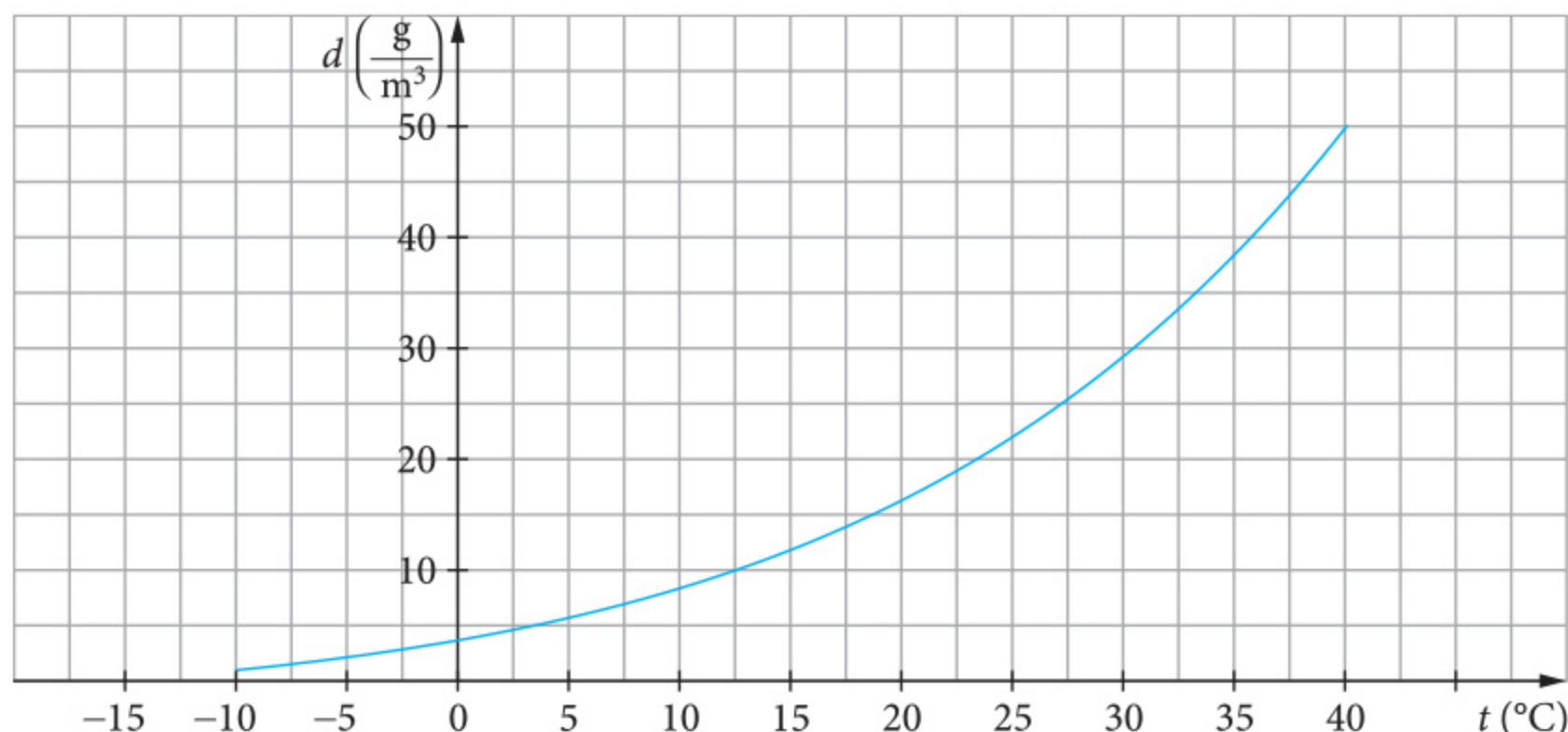
Wilgotność powietrza

Powietrze jest mieszaniną gazów, a w jego skład wchodzi również para wodna, czyli woda w stanie gazowym. Pary wodnej nie widzimy, podobnie jak większości innych gazów. Ponieważ wokół nas nieustannie trwa parowanie, a często zachodzi także skraplanie, gęstość pary wodnej w powietrzu się zmienia. Jednak nie może być ona dowolnie duża. Gdy gęstość pary wodnej w powietrzu rośnie, coraz większa liczba cząsteczek zbliża się do siebie na tyle, że siły przyciągania między nimi doprowadzają do powstawania kropli wody. **Nadmiar pary powoduje jej skraplanie**, czyli pojawienie się kropelek wody, które widzimy na przykład w postaci mgły (ryc. 25.3).



Ryc. 25.3. Mgła to skroplona para wodna. Jej pojawienie się oznacza, że w powietrzu mamy parę nasyconą

Maksymalne stężenie ma tzw. **para nasycona**. Gęstość pary nasyconej rośnie wraz z temperaturą. Wyższa temperatura oznacza, że cząsteczki mają większe prędkości, zatem siłom przyciągania trudniej jest je „przechwycić”. Zależność gęstości pary nasyconej od temperatury przedstawiono na rycinie 25.4.



Ryc. 25.4. Zależność gęstości nasyconej pary wodnej od temperatury

Zawartość pary wodnej w powietrzu ma duży wpływ zarówno na kształtowanie pogody, jak i na nasze samopoczucie, dlatego do opisu parametrów powietrza często dodaje się jego **wilgotność**^{*}.

Wilgotność powietrza h to stosunek gęstości pary wodnej d zawartej w powietrzu do gęstości pary nasyconej d_{nas} , wyrażony w procentach.

$$h = \left(\frac{d}{d_{\text{nas}}} \right) \cdot 100 \% \quad (1)$$

Na przykład wilgotność 60 % oznacza, że w powietrzu jest 60 % pary wodnej, która mogłaby się w tej temperaturze w nim „pomieścić”, czyli że gęstość pary zawartej w powietrzu stanowi 60 % gęstości pary nasyconej w danej temperaturze. W słoneczny, suchy dzień wilgotność powietrza wynosi 20–30 %, gdy jest deszczowo lub mgliście – 100 %. Wilgotność powietrza 100 % oznacza, że w powietrzu jest para nasycona. W takich warunkach praktycznie nie ma parowania, dlatego na przykład mokre rzeczy nie schną.

Duża wilgotność powietrza w połączeniu z wysokimi temperaturami może być dla ludzi niebezpieczna. Ograniczone parowanie potu powoduje, że tracimy zdolność schładzania organizmu, co może doprowadzić nawet do śmierci. Dla ludzi przebywających w pomieszczeniach najkorzystniejsza wilgotność to około 70 %.

^{*} Jest to tzw. wilgotność względna. Wilgotnością bezwzględną jest po prostu gęstość pary wodnej zawartej w powietrzu.

Z ryciny 25.4 wynika, że przy tej samej ilości pary wodnej w powietrzu wzrost temperatury pociąga za sobą spadek wilgotności, gdyż wzrasta gęstość pary nasyconej. Natomiast gdy temperatura maleje, wilgotność powietrza rośnie i para może osiągnąć stan nasycenia. To dlatego nad ranem, gdy temperatura zazwyczaj jest najniższa, skroplona para wodna pojawia się w postaci rosy i zamgleń.

PRZYKŁAD 1.

W letni dzień przy temperaturze powietrza 30 °C wilgotność wynosi 25 %. Do jakiej temperatury musi się w nocy ochłodzić, aby pojawiła się rosa?

Odczytujemy z wykresu 25.4, że gęstość pary nasyconej w temperaturze 30 °C wynosi około 30 g/m³. Po przekształceniu wzoru (1) otrzymamy zależność pozwalającą obliczyć gęstość pary wodnej zawartej w powietrzu:

$$d = \frac{h}{100 \%} \cdot d_{\text{nas}}$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymujemy:

$$d = 0,25 \cdot 30 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 7,5 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Aby pojawiła się rosa, temperatura musi spaść do takiej wartości, w której gęstość pary nasyconej jest mniejsza od 7,5 g/m³. Odczytujemy temperaturę z wykresu 25.4 – jest to około 5 °C.

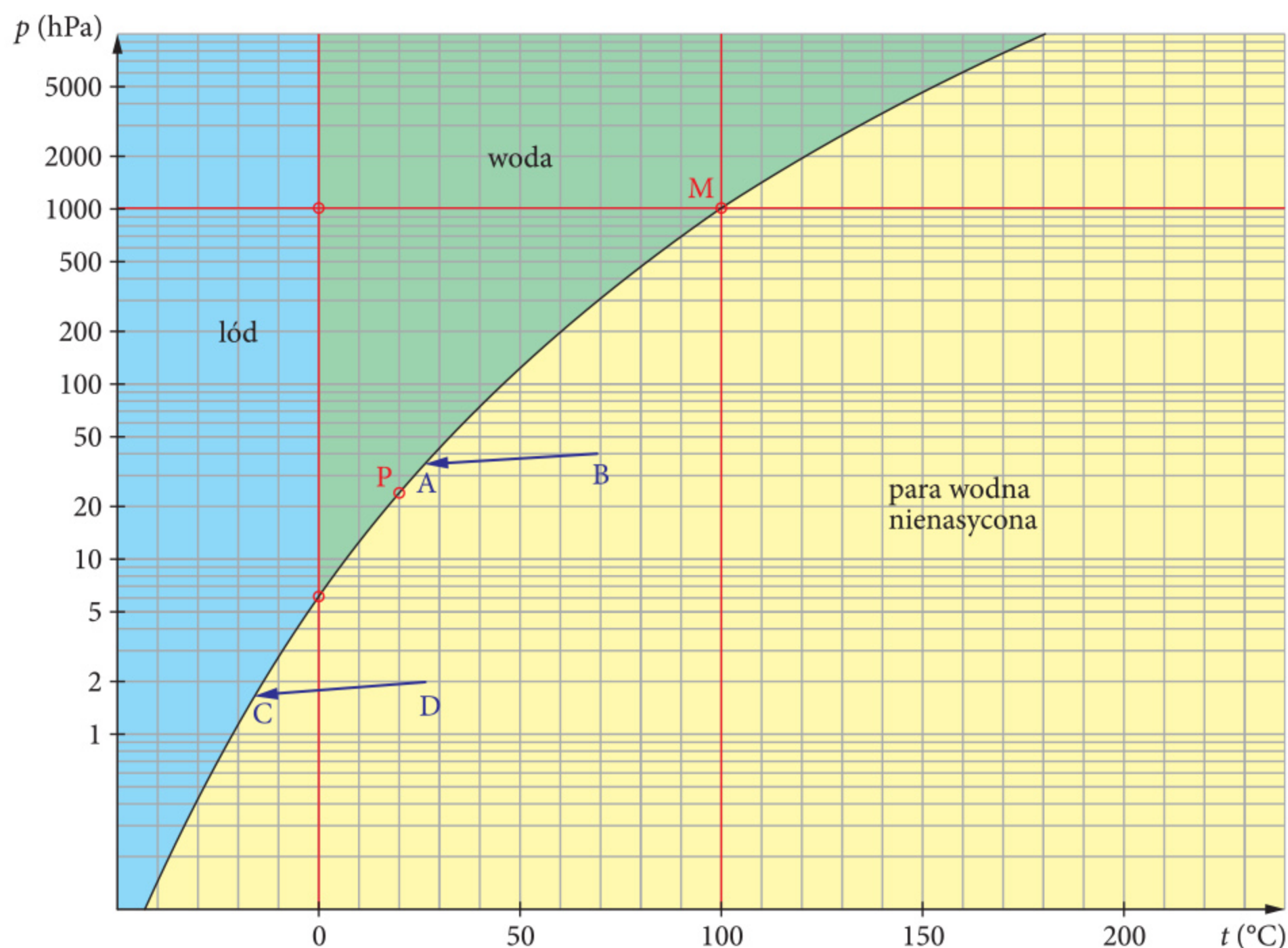
Temperatura wrzenia

Czy woda może wrzeć w innej temperaturze niż 100 °C? Okazuje się, że tak. Wrzenie to proces powstawania bąbli pary wodnej w całej objętości cieczy. Ciśnienie pary wewnątrz bąbla musi zrównoważyć ciśnienie atmosferyczne (zewnętrzne), w przeciwnym razie taki pęcherzyk pary zostałby zgnieciony przez ciecz, która jest naciskana przez atmosferę.

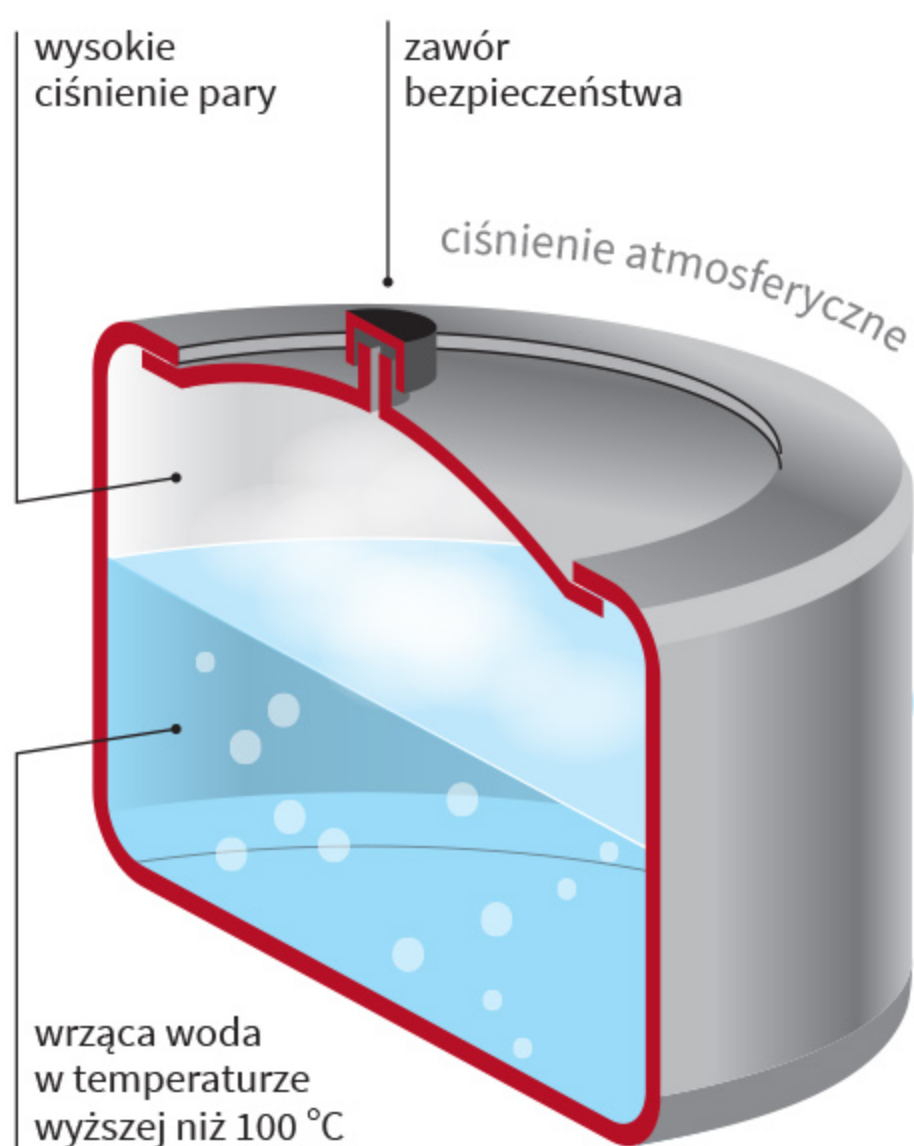
Przy obniżonym ciśnieniu powietrza wrzenie zachodzi w niższych temperaturach. Na przykład na Rysach, 2500 m n.p.m., woda wrze w temperaturze 90 °C, bo ciśnienie atmosferyczne na tej wysokości jest niższe.

Spójrzmy na tzw. diagram fazowy wody, przedstawiony na rycinie 25.5. Można z niego odczytać, w jakich warunkach (ciśnienie i temperatura) woda jest w stanie równowagi termodynamicznej ciałem stałym, cieczą lub gazem. Krzywa oddzielająca wodę i gaz określa ciśnienie pary nasyconej w danej temperaturze. W pęcherzykach wrzącej wody znajduje się właśnie nasycona para wodna i dlatego pod ciśnieniem atmosferycznym na poziomie morza woda wrze w temperaturze 100 °C (punkt M na diagramie). Po prostu w tej temperaturze ciśnienie pary nasyconej wynosi 1000 hPa, czyli jest równe ciśnieniu atmosferycznemu. Dla temperatury np. 20 °C ciśnienie pary nasyconej wynosi 23 hPa, a zatem gdy ciśnienie zewnętrzne spadnie do tej wartości, woda zacznie wrzeć już w 20 °C (punkt P). Z kolei wzrost ciśnienia zewnętrznego powoduje wzrost temperatury wrzenia.

Wrzenie zachodzi w temperaturze, w której ciśnienie gazu nad cieczą jest równe ciśnieniu pary nasyconej.



Ryc. 25.5. Diagram fazowy wody. Ze względu na bardzo duży przedział wartości ciśnienia skala na osi pionowej nie jest liniowa



Zjawisko to zostało wykorzystane w szybkowarzech, w których potrawy gotują się szybciej niż w tradycyjnych garnkach (ryc. 25.6). Dlaczego? Szybkowar jest szczelnie zamknięty, więc ciśnienie w nim jest wyższe od atmosferycznego, a zatem temperatura jest wyższa od 100 °C, co skraca czas gotowania potraw.

Ryc. 25.6. W szybkowarze temperatura może sięgać nawet 120 °C, dzięki czemu potrawy szybciej się gotują

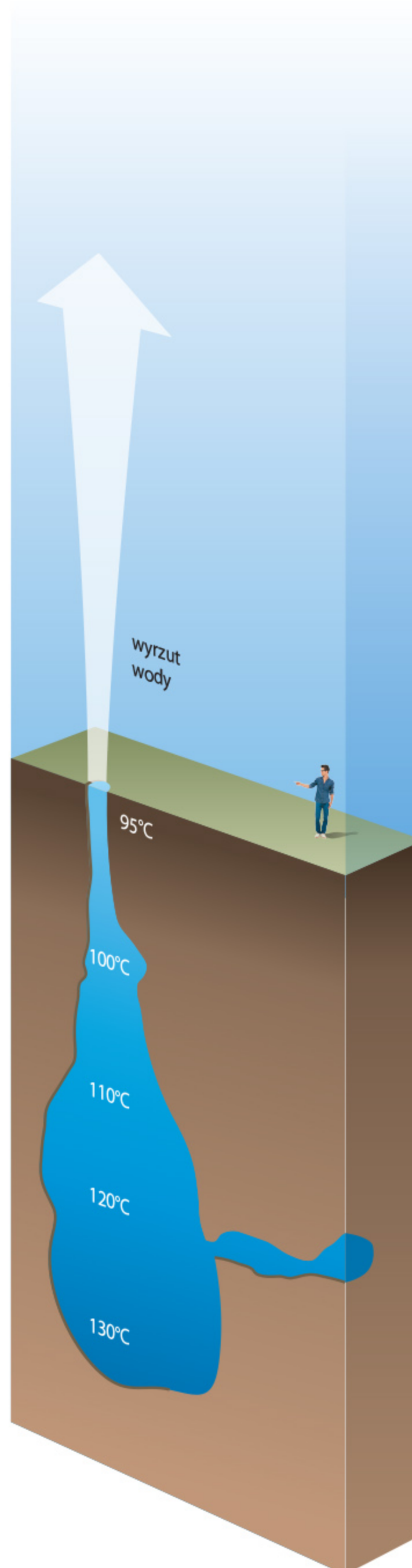


WARTO WIEDZIEĆ

**Gejzer Old Faithful**

To gejzer położony na wysokości 2250 m n.p.m. w Parku Narodowym Yellowstone w Stanach Zjednoczonych. Gejzer ten wybucha przeciętnie 17 razy na dobę, erupcje trwają od 1,5 do 5 minut, a przerwy między nimi zależą od długości erupcji. W czasie jednego wybuchu gejzera w powietrze wystrzela około 25 tysięcy litrów wrzącej wody o temperaturze około 95 °C.

Gejzer to dość wąski kanał wypełniony wodą. Woda jest ogrzewana przez gorące skały, a ciśnienie przy dnie kanału jest na tyle duże, że temperatura wrzenia wody wynosi tam około 130 °C. Im bliżej wylotu, tym ciśnienie słupa wody jest niższe, więc temperatura wrzenia również jest niższa. Podczas ogrzewania wody zjawisko konwekcji jest dość ograniczone ze względu na niewielką szerokość kanału. W wąskim kanale tylko mała objętość wody może się wznosić, dlatego tylko erupcja może przekazać ciepło na zewnątrz. Wrzenie zaczyna się przy dnie gejzera, pęcherzyki pary wędrują ku górze i na powierzchni wyrzucają wodę w górę. Zmniejszona ilość wody w komorze gejzera sprawia, że ciśnienie wody przy dnie maleje, więc wrzenie staje się gwałtowniejsze, co powoduje wyrzut jeszcze większej ilości wody niż poprzednio. Po erupcji na miejsce wyrzuconej wody napływa jej nowa porcja i proces się powtarza.



Rosa czy szron?

Spójrzmy jeszcze raz na diagram 25.5. Narysowana na nim krzywa przedstawia zależność ciśnienia pary nasyconej od jej temperatury. Punkty na prawo od niej (np. punkt B) określają możliwy stan fizyczny pary nienasyconej – jej ciśnienie i temperaturę. Odczytujemy z wykresu, że wraz z obniżaniem się temperatury pary wodnej zawartej w powietrzu coraz bliższe jest osiągnięcie stanu pary nasyconej. Gdy ten stan zostanie osiągnięty w temperaturze dodatniej (proces $B \rightarrow A$ na diagramie), dalsze obniżanie temperatury spowoduje skraplanie pary i powstanie wody, czyli rosy. Gdy zaś stan pary nasyconej zostanie osiągnięty dla temperatury ujemnej, nastąpi resublimacja i powstanie ciało stałe, czyli szron (proces $D \rightarrow C$).

Warto zwrócić uwagę, że **resublimacja pary wodnej możliwa jest tylko wówczas, gdy jej ciśnienie w powietrzu jest bardzo niskie**. Właśnie dlatego zimą szron pojawia się najczęściej przy bezchmurnym niebie.



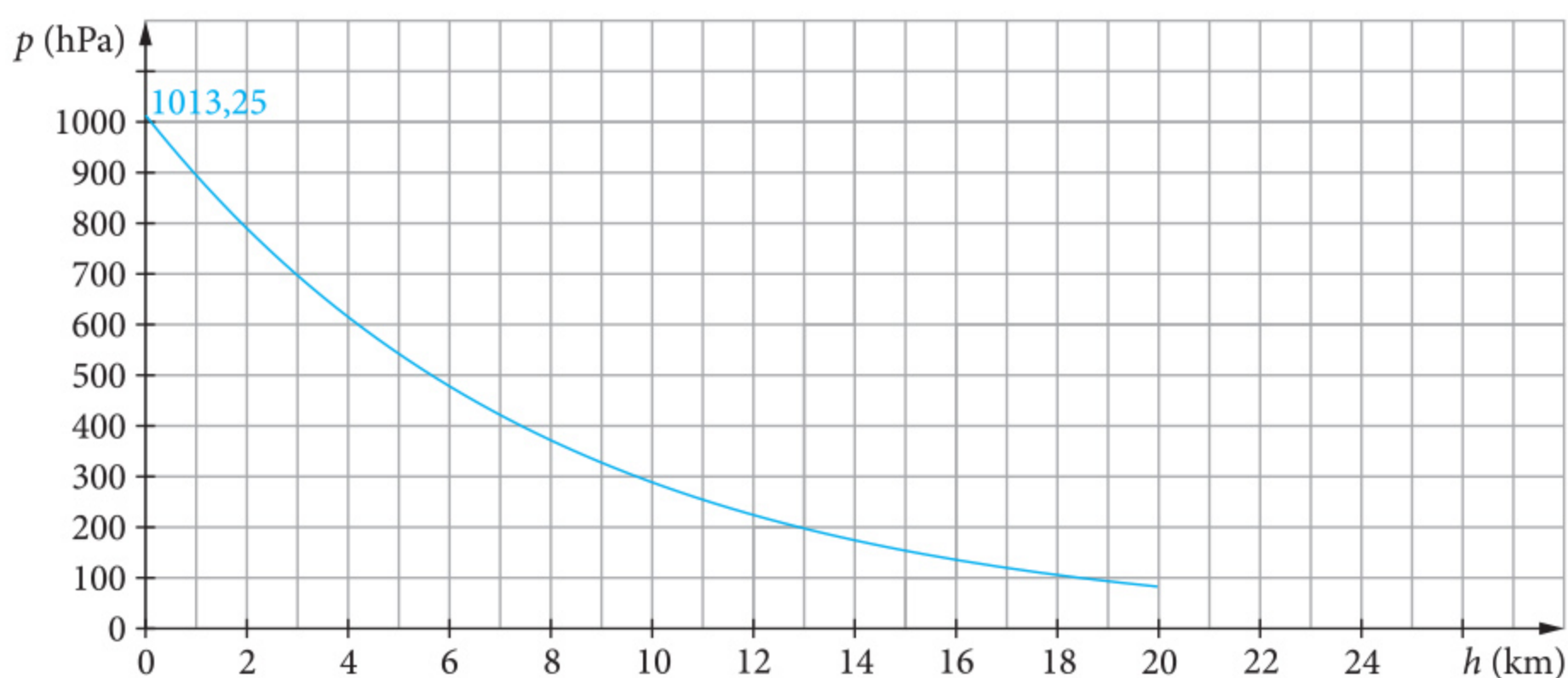
Ryc. 25.7. Szron to woda w stanie stałym, powstała wskutek resublimacji pary wodnej zawartej w powietrzu

PODSUMOWANIE

- ▶ Woda ma największą gęstość w temperaturze około 4°C .
- ▶ **Para nasycona** to para o maksymalnym ciśnieniu i gęstości w danej temperaturze.
- ▶ **Wilgotność powietrza** to stosunek gęstości pary wodnej zawartej w powietrzu do gęstości pary nasyconej, wyrażony w procentach.
- ▶ Temperatura wrzenia wody maleje wraz ze zmniejszaniem się ciśnienia gazu nad cieczą.

PYTANIA I ZADANIA

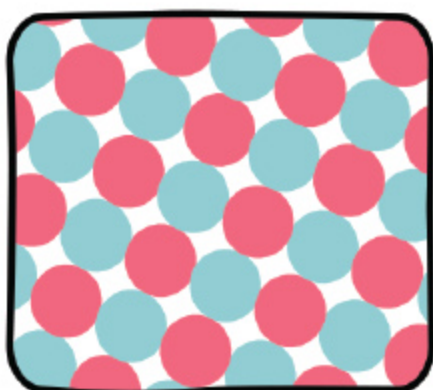
1. Wyznacz gęstość wody w temperaturze $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ z dokładnością do trzech cyfr znaczących. Skorzystaj z wykresu 25.1 (s. 186).
2. Temperatura w pomieszczeniu jest równa $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, a wilgotność powietrza wynosi 60 %. Oszacuj, jaka będzie wilgotność, gdy temperatura spadnie do $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Skorzystaj z wykresu 25.4 (s. 188).
3. Jakie ciśnienie jest w szybkowarze, w którym potrawy gotują się w temperaturze $120\text{ }^{\circ}\text{C}$? Skorzystaj z wykresu 25.5 (s. 190).
4. Na wykresie poniżej przedstawiono zależność ciśnienia atmosferycznego od wysokości nad poziomem morza. Oszacuj, w jakiej temperaturze wrze woda na Mont Blanc (4808 m n.p.m.), a w jakiej na Mount Everest (8848 m n.p.m.). Skorzystaj z wykresu 25.5 (s. 190).



5. Temperatura powietrza w suchej saunie fińskiej jest bliska $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ przy wilgotności powietrza około 10 %. W łaźni rzymskiej wilgotność powietrza jest bliska 100 %, ale temperatura powietrza nie przekracza $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dlaczego człowiek nie powinien przebywać w pomieszczeniu o wilgotności 100 % oraz temperaturze bliskiej $100\text{ }^{\circ}\text{C}$?

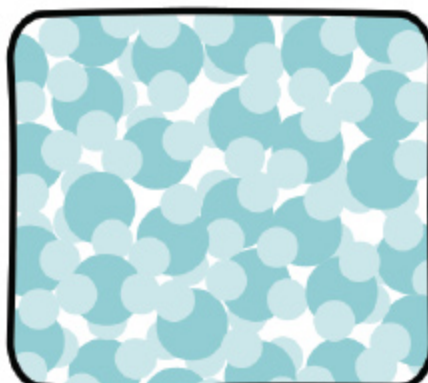
TERMODYNAMIKA

STANY SKUPIENIA MATERII



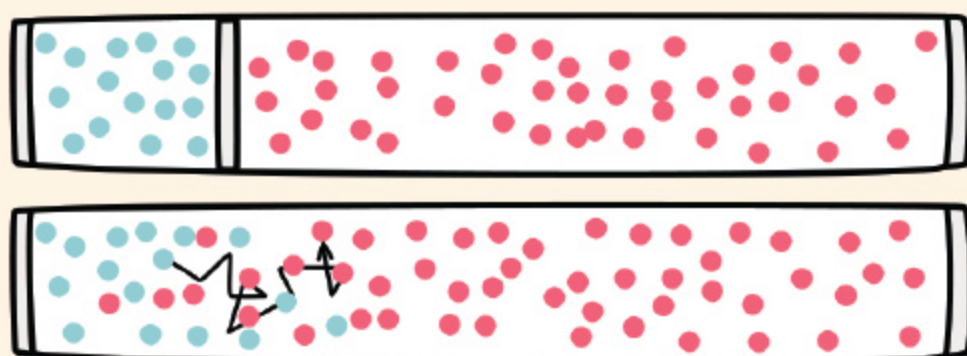
W ciałach stałych cząsteczki drgają wokół swoich położenia równowagi.

W ciekłach cząsteczki są blisko siebie i choć oddziałują ze sobą, mogą przemieszczać się względem siebie.



W gazie cząsteczki są daleko od siebie i nie są ze sobą związane.

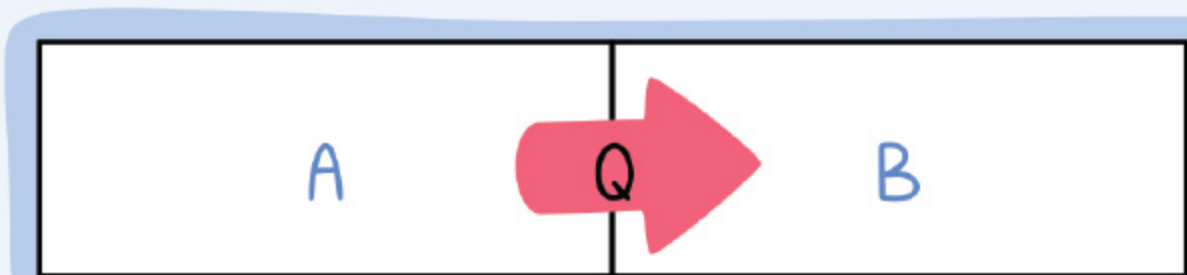
Dyfuzja to chaotyczne rozprzestrzenianie się cząsteczek danej substancji wskutek ich ruchów i wzajemnych zderzeń.



ciało A przekazuje energię ciału B

Ciało o wyższej temperaturze przekazuje ciału o niższej temperaturze energię w postaci ciepła.

$$T_A > T_B$$



Ciepło Q potrzebne do ogrzania substancji można obliczyć ze wzoru:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$

masa substancji

ciepło właściwe

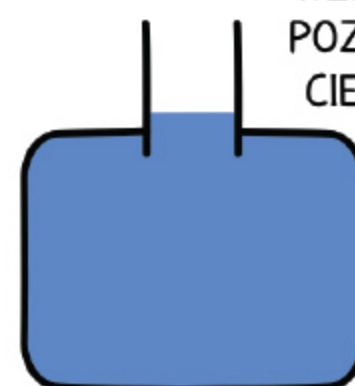
zmiana temperatury

Srednia energia kinetyczna

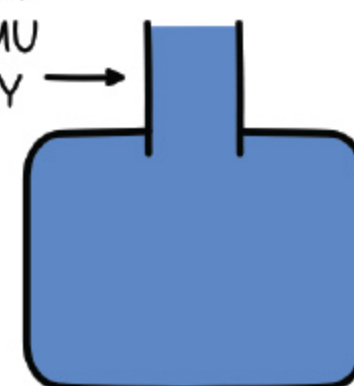
pojedynczej cząsteczki jest wprost proporcjonalna do temperatury ciała wyrażonej w skali Kelvina.

ROZSZERZALNOŚĆ CIEPLNA

WZROST POZIOMU CIECZY



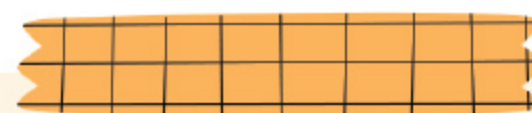
przed ogrzaniem



po ogrzaniu

ENERGIA WEWNĘTRZNA

to suma energii wszystkich cząsteczek ciała.

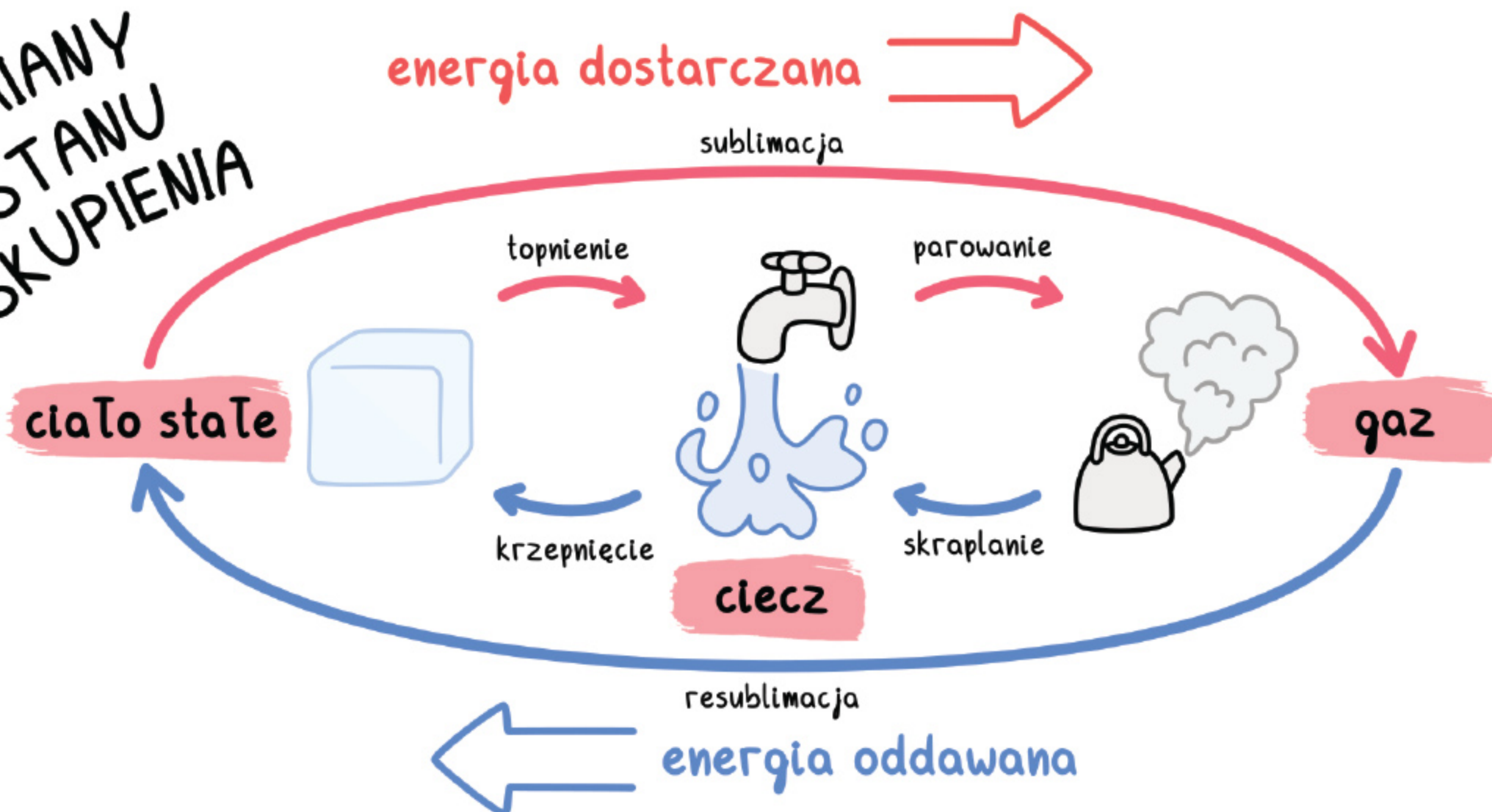


I zasada termodynamiki

przyrost energii wewnętrznej ΔE_w jest równy sumie energii przekazanej w postaci ciepła Q i w formie pracy W .

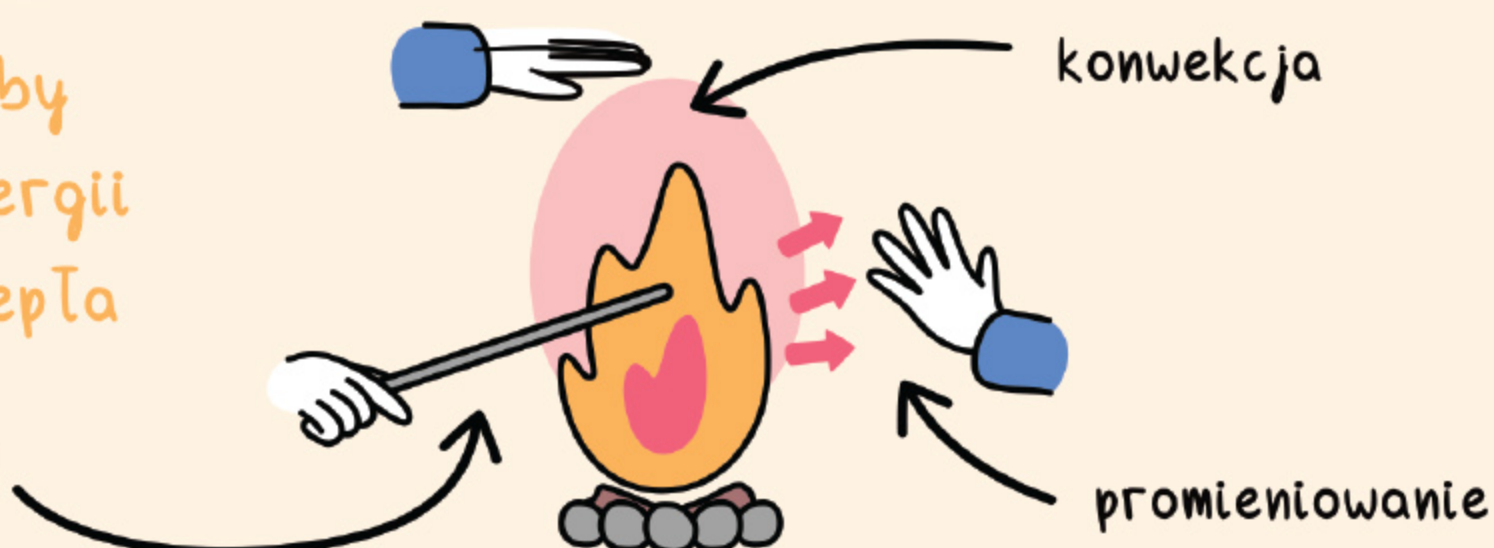
$$\Delta E_w = Q + W$$

ZMIANY STANU SKUPIENIA



trzy sposoby przekazu energii w postaci ciepła

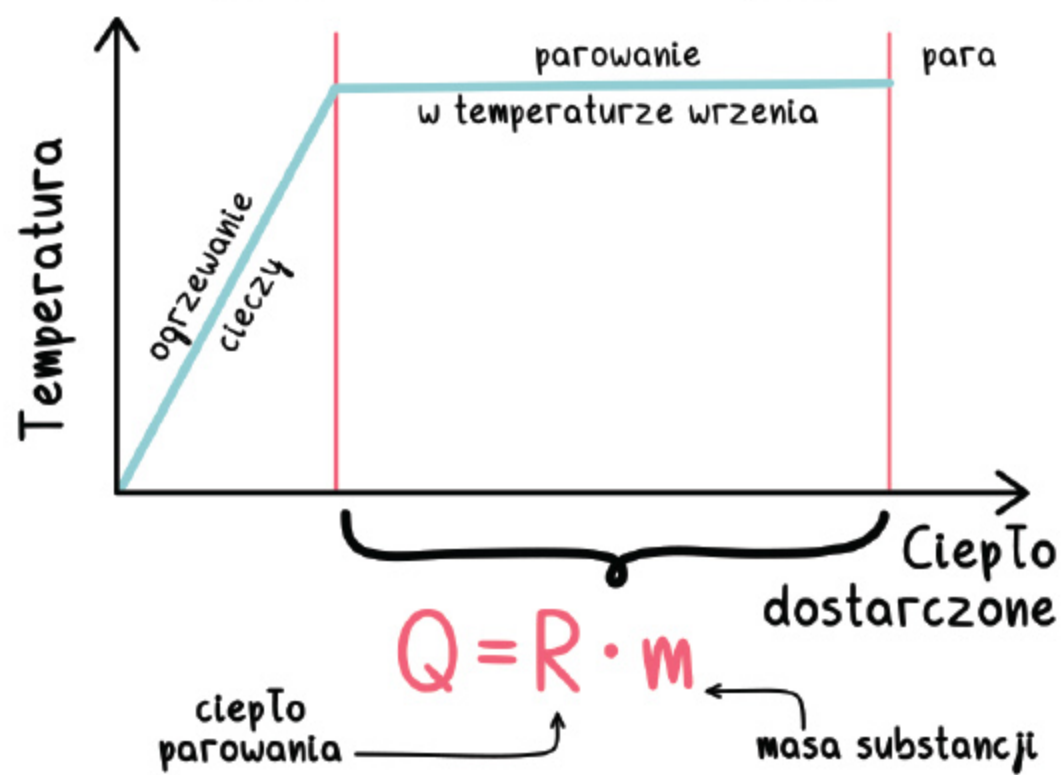
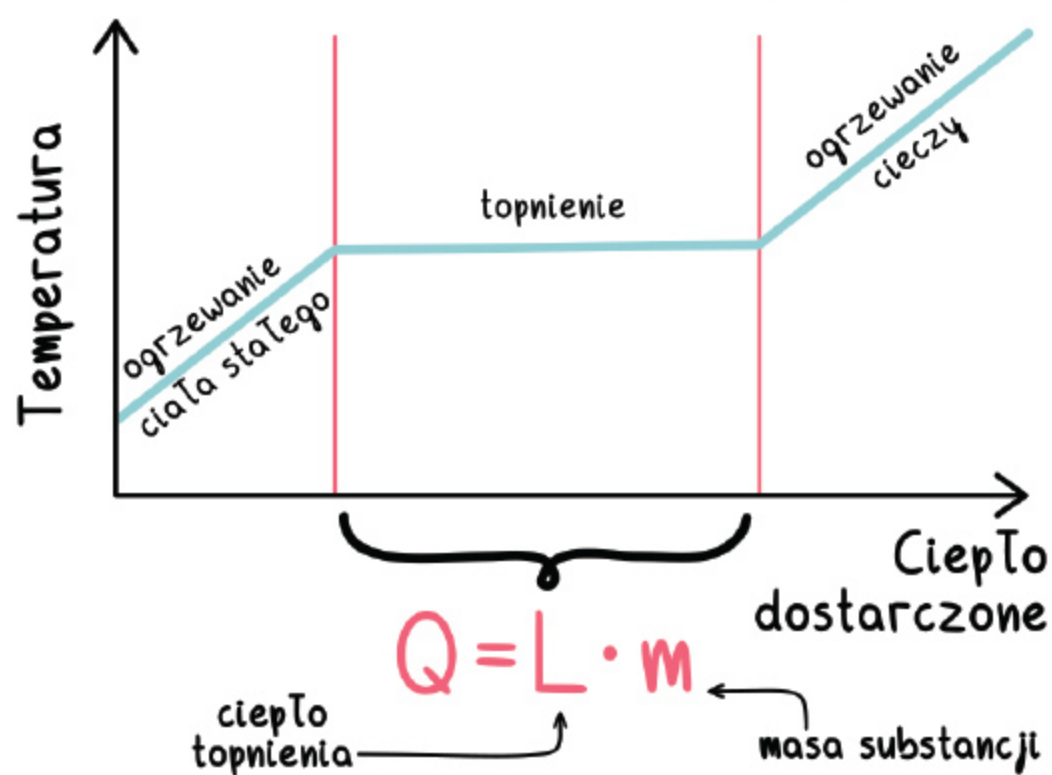
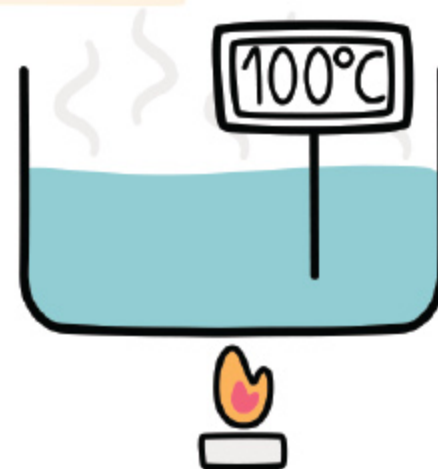
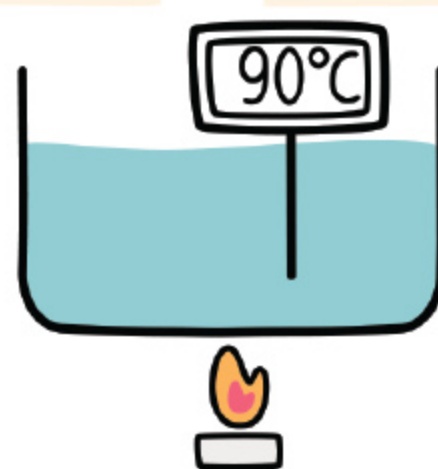
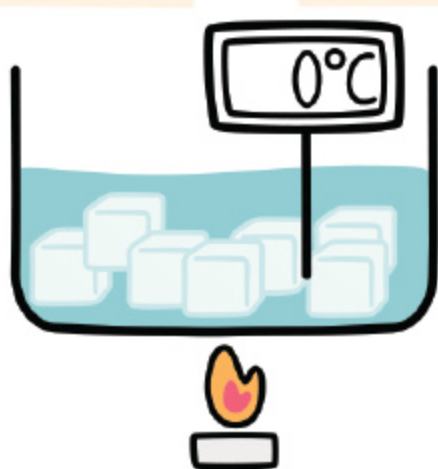
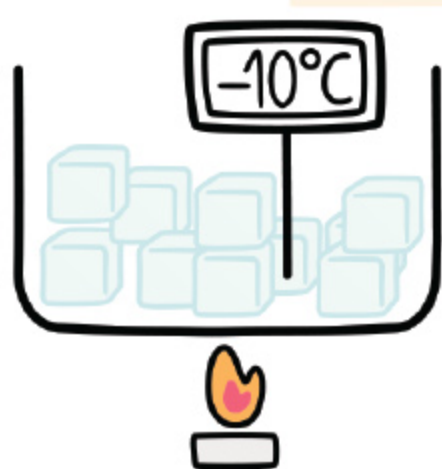
przewodnictwo



TOPNIENIE

PAROWANIE

WRZENIE



PYTANIA I ZADANIA

1. Do identycznych miseczek z wodą wprowadzono jednakowe masy barwników. Cząsteczki barwników mają bardzo podobne rozmiary. Woda w każdym naczyniu ma inną temperaturę.



Zaznacz poprawne dokończenie zdania.

Rozprzestrzenienie barwnika nastąpi szybciej w naczyniu, w którym

- A. znajduje się niebieski barwnik.
 B. znajduje się czerwony barwnik.
 C. znajduje się cieplejsza woda.
 D. znajduje się zimniejsza woda.
2. Do dwóch jednakowych butelek nalano wodę o temperaturze 20 °C. Przez szczelne korki do obu butelek wprowadzono rurki. Rurka w butelce A miała większą średnicę niż rurka w butelce B. Wodę w obu butelkach ogrzano do tej samej temperatury.



Czy poziom wody po ogrzaniu będzie taki sam w obu rurkach? Odpowiedź uzasadnij.

3. W pokoju stoją dwa krzesła: jedno metalowe, a drugie drewniane.
Wybierz właściwe dokończenie zdania spośród A i B oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–3.

Gdy będziemy siadać na krzesłach, chłodniejsze wydawać się będzie krzesło

A.	drewniane,	ponieważ materiał, z którego jest wykonane,	1.	ma większe ciepło właściwe.
			2.	jest lepszym przewodnikiem ciepła.
			3.	ma większą pojemność cieplną.
B.	metalowe,			

4. Spożywane posiłki dostarczają dorosłemu człowiekowi energię około 10 mln J na dobę, a w tym samym czasie człowiek emituje w postaci promieniowania energię około 60 mln J. Skąd może pochodzić brakujące 50 mln J?
5. Kamil przeniósł z ogrodu do domu kamienną figurkę i ustawił ją w pobliżu kominka. W pewnym czasie figurka pochłonęła energię promieniowania równą 150 J, a jednocześnie wyemitowała promieniowanie o energii 120 J. W wyniku przewodzenia do figurki dołączyło też ciepło o wartości 24 J.

Zaznacz poprawne dokończenie zdania.

Energia wewnętrzna figurki

A. wzrosła o 54 J. **B.** zmalała o 54 J. **C.** wzrosła o 294 J. **D.** zmalała o 294 J.

6. W termosie znajdowało się 150 ml kawy o temperaturze 90 °C. Po wlaniu mleka o temperaturze 10 °C ustaliła się temperatura 75 °C. Oblicz, ile mleka wlano do kawy. Przyjmij, że ciepło właściwe kawy oraz mleka jest równe ciepłu właściwemu wody.
7. Do stalowego kubka wrzucono rozdrobniony lód o temperaturze –8 °C. Kubek ustawiono na kuchennym stole i obserwowano jego zawartość.

Oceń prawdziwość zdań. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe.

1.	Topnienie lodu rozpoczęło się natychmiast po wrzuceniu go do kubka.	P	F
2.	Temperatura mieszaniny wody i lodu jest równa 0 °C.	P	F
3.	Ogrzanie lodu do temperatury 0 °C trwało krócej niż jego stopienie.	P	F

8. Do kubka termicznego wlano 200 ml herbaty o temperaturze 95 °C. Oszacuj, ile wody wyparowało z herbaty podczas obniżania jej temperatury o 10 °C, przy założeniu że proces parowania był jedyną przyczyną obniżania się jej temperatury.
9. Do 300 g soku o temperaturze 30 °C wrzucono dwie kostki lodu o temperaturze 0 °C. Gdy lód się stopił, a powstała z niego woda wymieszała się z sokiem, temperatura napoju była równa 20 °C. Oblicz masę wrzuconego lodu. Przyjmij, że ciepło właściwe soku jest równe ciepłu właściwemu wody.
10. W pewien zimowy dzień wilgotność powietrza na dworze wynosiła 80 %, a jego temperatura –5 °C. W mieszkaniu, przy temperaturze 20 °C, wilgotność powietrza była równa 60 %. Podczas wietrzenia mieszkania nastąpiła wymiana połowy powietrza zawartego w pomieszczeniu. Następnie powietrze ogrzano ponownie do temperatury 20 °C.

Zaznacz poprawne dokończenie zdania.

Wilgotność powietrza w mieszkaniu po jego wywietrzeniu i ponownym ogrzaniu wynosiła

A. ponad 80 %. **B.** około 70 %. **C.** około 60 %. **D.** mniej niż 60 %.



Najważniejsze pojęcia w dziale

- bilans cieplny [*thermal balance*] 160–161, 178–179
- ciepło parowania [*heat of vaporization*] 174
- ciepło topnienia [*heat of fusion*] 167
- ciepło właściwe [*specific heat*] 158
- dyfuzja [*diffusion*] 133
- efekt cieplarniany [*greenhouse effect*] 179–180
- energia wewnętrzna [*internal energy*] 135
- globalne ocieplenie [*global warming*] 185
- konwekcja [*convection*] 147
- krzepnięcie [*solidification*] 166
- parowanie [*evaporation/vaporization*] 171
- I zasada termodynamiki [*first law of thermodynamics*] 151–152
- pojemność cieplna [*heat capacity*] 161–163
- proces adiabatyczny [*adiabatic process*] 154
- promieniowanie [*radiation*] 148–150
- przewodnictwo cieplne [*thermal conductivity*] 144–146
- rozszerzalność liniowa [*linear expansion*] 140
- równowaga termodynamiczna [*thermodynamic equilibrium*] 145
- skraplanie [*condensation*] 176
- temperatura [*temperature*] 134
- topnienie [*fusion*] 165
- wartość opałowa [*calorific value*] 156
- wilgotność powietrza [*air humidity*] 188
- wrzenie [*boiling*] 173, 189–190
- zero bezwzględne [*absolute zero*] 134

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 1. Ciężarek na sprężynie

s. 16

Problem badawczy

Jak okres drgań ciężarka przymocowanego do ciała sprężystego zależy od masy ciężarka?

Wstęp

Odkształcenie ciała sprężystego jest nietrwałe – gdy siła odkształcająca przestaje działać, ciało wraca do poprzedniego kształtu. Zanim jednak przyjmie ten kształt, często wykonuje drgania.

Obiektem badań w tym doświadczeniu będzie ruch ciężarków o różnej masie, przymocowanych do sprężystej linijki (lub listewki). W przypadku, gdy masę ciała sprężystego można pominąć, gdyż jest znacznie mniejsza od masy ciężarka, okres drgań ciężarka możemy obliczyć ze wzoru:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Po przekształceniu (podniesieniu obu stron równania do potęgi drugiej) otrzymujemy:

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{m}{k}$$

Oznacza to, że kwadrat okresu drgań jest wprost proporcjonalny do masy ciężarka. Taką zależność łatwo można przedstawić na wykresie.

Przyrządy pomiarowe i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ długa linijka lub listewka
- ▶ kilkanaście jednakowych elementów służących jako ciężarki (np. klocki, śruby, duże nakrętki, sztućce), których masa jest większa od masy linijki
- ▶ woreczek foliowy

Hipoteza badawcza

Kwadrat okresu drgań ciężarka jest wprost proporcjonalny do jego masy.

Przebieg doświadczenia

1. Przymocuj koniec linijki do stołu lub parapetu, tak aby była ustawiona poziomo.
2. Do drugiego końca linijki przymocuj woreczek foliowy.
3. Umieść w woreczku jeden element obciążający, wpraw linijkę w niewielkie drgania i wyznacz okres drgań.
4. Pomiary powtórz dla większej liczby elementów w woreczku.
5. Zanotuj wyniki pomiarów w tabeli.

Numer pomiaru	Liczba elementów N	Liczba pełnych wychyleń n	Czas trwania ruchu t (s)	Okres drgań $T = \frac{t}{n}$ (s)	Kwadrat okresu T^2 (s ²)
1					
2					
...					

Opracowanie wyników pomiarów

Przedstaw na wykresie zależność kwadratu okresu drgań od liczby elementów obciążających.

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy punkty pomiarowe układają się wzdłuż linii prostej?
2. Czy hipoteza badawcza została potwierdzona?
3. Czy niepewność przeprowadzonych pomiarów była wystarczająco mała do weryfikacji hipotezy?

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 2. Kąt graniczny a współczynnik załamania światła

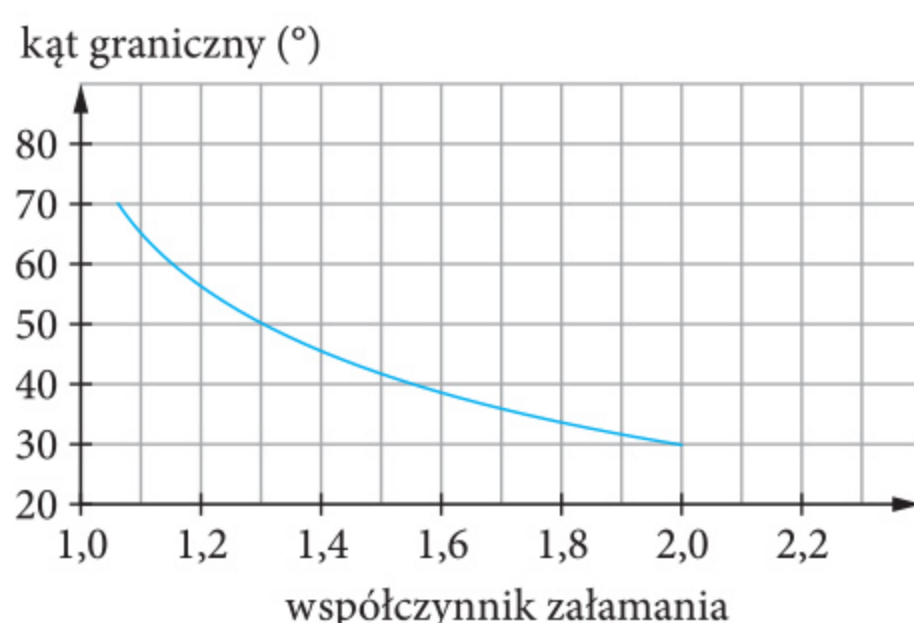
s. 110

Problem badawczy

Pomiar współczynnika załamania światła dla wody i oleju

Wstęp

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia polega na całkowitym odbiciu się światła od powierzchni przezroczystego ośrodka. Zjawisko to zachodzi wówczas, gdy światło pada na powierzchnię oddzielającą ośrodki pod kątem większym od granicznego. Wartość kąta granicznego dla danej substancji zależy od jej współczynnika załamania światła n . Na wykresie poniżej przedstawiono zależność kąta granicznego od współczynnika załamania światła.



Celem doświadczenia jest zmierzenie kąta granicznego dla wody i oleju oraz wyznaczenie na tej podstawie współczynnika załamania światła dla tych substancji.

Przyrządy i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ przezroczyste naczynie prostokątne lub w kształcie walca (szklanka, słoik)
- ▶ woda, olej
- ▶ ścieralny pisak
- ▶ wskaźnik laserowy lub np. poziomnica laserowa
- ▶ kątomierz

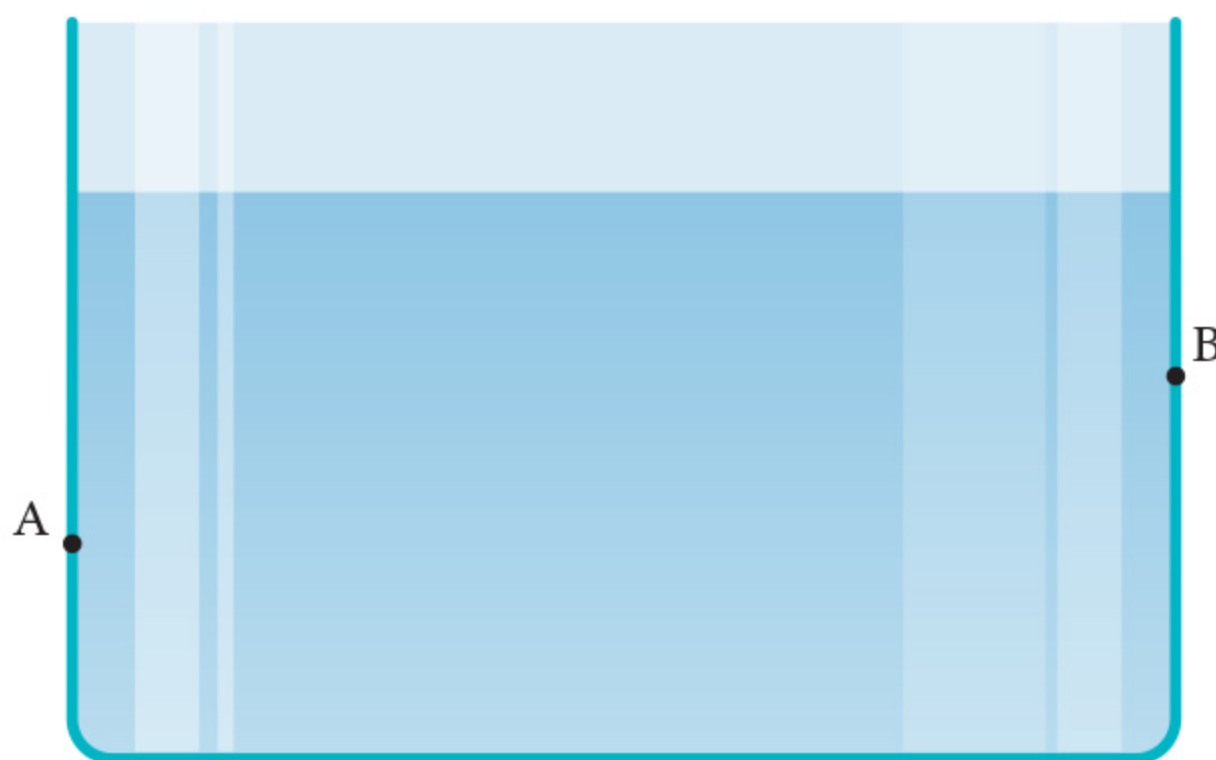
Przebieg doświadczenia

1. Nalej wody do naczynia. Możesz dodać parę kropel mleka, aby móc obserwować bieg światła w wodzie.
2. Skieruj wiązkę światła lasera na boczną powierzchnię naczynia poniżej linii wody. Znajdź takie ustawienie wskaźnika laserowego, aby światło całkowicie odbiło się od powierzchni wody „od spodu” i opuściło naczynie przez przeciwległą ściankę.
3. Ustal minimalny kąt (w stosunku do pionu), przy którym jest spełniony warunek z punktu 2.
4. Zaznacz pisakiem na ściankach naczynia punkt, w którym światło wpada do naczynia, i punkt, w którym je opuszcza, gdy spełniony jest warunek z punktu 3.

5. Zmierz szerokość naczynia i odległości zaznaczonych punktów od powierzchni wody. Zanotuj wyniki pomiarów.
6. Zmień poziom wody w naczyniu i ponownie przeprowadź pomiary.
7. Przeprowadź pomiary dla oleju jadalnego (powtórz punkty 1.–6.).

Opracowanie wyników doświadczenia

1. Dla każdego poziomu wody narysuj z zachowaniem proporcji naczynie, powierzchnię cieczy oraz punkty, w których światło wpada do naczynia (A) i je opuszcza (B), jak na rysunku poniżej.



2. Na rysunku znajdź punkt, w którym światło odbija się od powierzchni wody.
3. Narysuj bieg światła w wodzie oraz prostą prostopadłą do powierzchni wody w punkcie odbicia.
4. Zmierz kątomierzem kąt padania i kąt odbicia światła od powierzchni wody. Jest to w przybliżeniu wartość kąta granicznego.
5. Oblicz wartość średnią pomiarów kąta granicznego dla każdej cieczy.
6. Z wykresu odczytaj współczynnik załamania światła dla wody i dla oleju.

Omówienie wyniku doświadczenia

1. Porównaj uzyskane wyniki z danymi tablicowymi.
2. Czy w czystej wodzie, tzn. bez dodanego mleka, widać wiązkę światła? Czy w czystym oleju widać wiązkę światła? Wyjaśnij swoje obserwacje.
3. Czy grubość szkła naczynia ma wpływ na wynik pomiarów? Uzasadnij odpowiedź.

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 3. Sejsza

s. 87

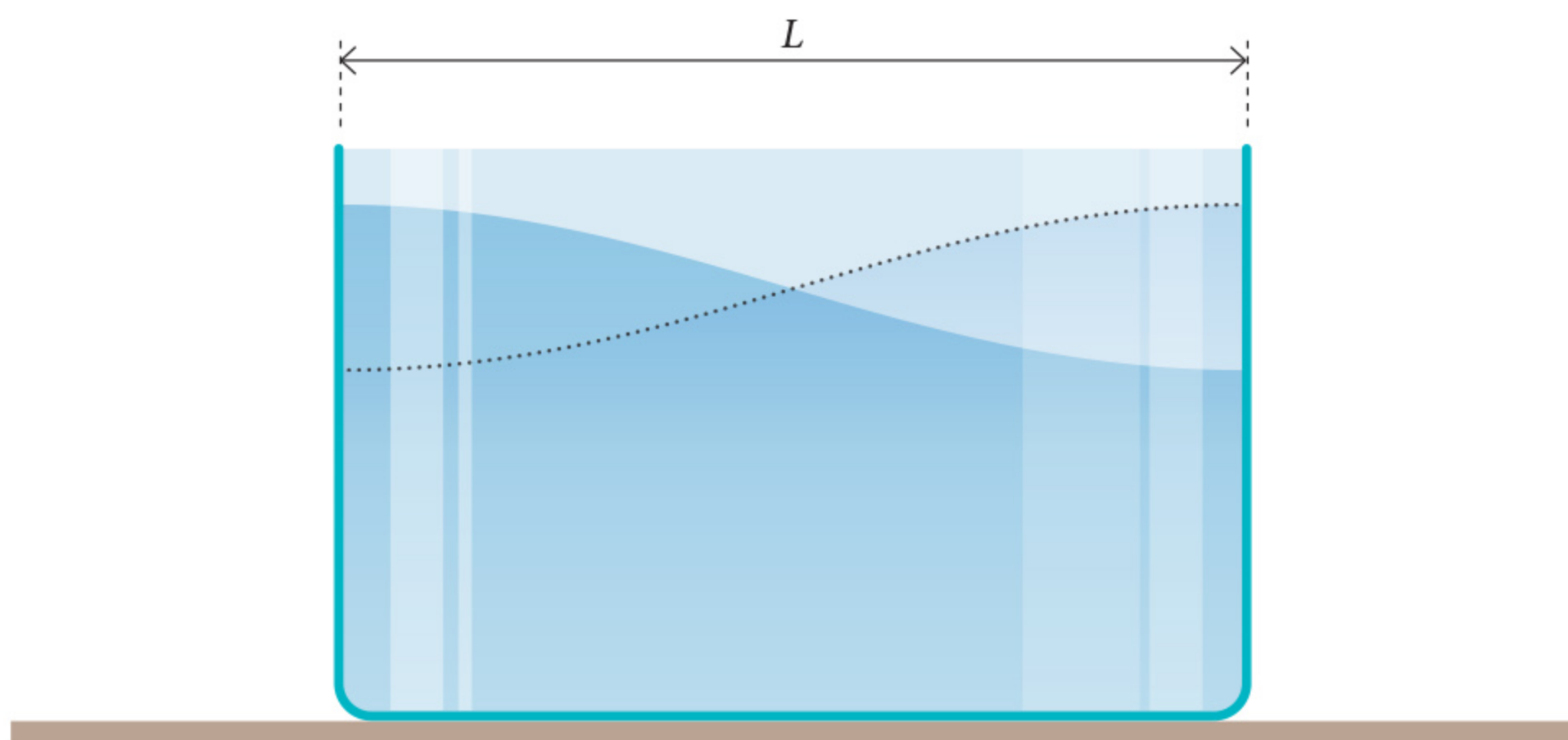
Problem badawczy

Czy prędkość fali na powierzchni wody zależy od głębokości wody?

Wstęp

Sejsza to fala powstająca w wyniku interferencji na powierzchni zamkniętych zbiorników wodnych (jeziora, zatoki). Jej cechą charakterystyczną jest unoszenie się poziomu wody przy jednym brzegu z jednoczesnym obniżaniem się tego poziomu po drugiej stronie zbiornika. Wówczas powierzchnia wody w całym zbiorniku się kołysze. Sejsza może być wywołana np. długo wiejącym wiatrem.

W warunkach domowych można wytworzyć falę o charakterze sejszy. Najlepiej użyć do tego naczynia prostopadłościennego, np. niewielkiego akwarium.



Wzbudzoną falę pokazano na rysunku. W naczyniu widać falę od doliny do grzbietu, więc długość całej takiej fali jest dwa razy większa niż rozmiar naczynia:

$$\lambda = 2L$$

Gdy zmierzymy długość naczynia i okres drgań fali, będziemy mogli wyznaczyć prędkość tej fali w naczyniu:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{2L}{T}$$

Przyrządy do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ prostopadłościenne naczynie o krawędziach długości kilkunastu centymetrów
- ▶ stoper
- ▶ linijka

Hipoteza badawcza

Prędkość fali na wodzie rośnie wraz z głębokością wody.

Przebieg doświadczenia

1. Nalej wody do naczynia i zmierz jej głębokość.
2. Wzbudź w naczyniu falę o charakterze sejszy, np. przez lekkie kotysanie naczyniem.
3. Zmierz długość naczynia i wyznacz długość fali.
4. Zmierz stoperem czas kilku wahaniec fali i wyznacz na tej podstawie jej okres.
5. Zanotuj wyniki pomiarów w tabeli.
6. Pomiary wykonaj przynajmniej dla 10 różnych głębokości.

Nr pomiaru	Głębokość d (m)	Liczba wahaniec n	Czas t (s)	Okres $T = \frac{t}{n}$ (s)	Prędkość $v = \frac{\lambda}{T} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$
1					
2					
...					
10					

Opracowanie wyników pomiarów

1. Dla każdej głębokości oblicz prędkość fali.
2. Przenieś dane do arkusza kalkulacyjnego i przedstaw na wykresie zależność prędkości fali na wodzie od głębokości wody.
3. W arkuszu kalkulacyjnym dopasuj linię trendu do otrzymanych punktów pomiarowych.

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy hipoteza badawcza została potwierdzona?
2. Czy prędkość fali na wodzie jest wprost proporcjonalna do głębokości wody?
3. Czy uzyskane wyniki są zgodne z literaturą opisującą badane zjawisko?

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 4. Ciepło właściwe stali nierdzewnej

s. 158

Problem badawczy

Wyznaczanie ciepła właściwego stali nierdzewnej

Wstęp

Ciepło Q potrzebne do ogrzania dowolnej masy m substancji o dowolną liczbę stopni Celsjusza Δt obliczamy ze wzoru:

$$Q = cm\Delta t$$

gdzie c – ciepło właściwe substancji.

Niech m_s oznacza masę elementów stalowych zanurzonych w wodzie o masie m_w . Podczas podgrzewania temperatura wody i stali rosną jednakowo (stal ma duże przewodnictwo cieplne). Grzałka o mocy P dostarcza w czasie τ ciepło do obu substancji.

$$P\tau = Q_s + Q_w$$

Po podstawieniu $Q_s = c_s m_s \Delta t$ oraz $Q_w = c_w m_w \Delta t$ otrzymujemy równanie:

$$P\tau = c_s m_s \Delta t + c_w m_w \Delta t$$

Z tego równania wyznaczamy ciepło właściwe stali c_s :

$$c_s = \frac{P\tau - c_w m_w \Delta t}{m_s \Delta t}$$

Jeśli znamy moc grzałki, czas ogrzewania, masy ogrzewanych substancji, ciepło właściwe wody i przyrost temperatury, możemy wyznaczyć ciepło właściwe stali.

Przyrządy pomiarowe i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ czajnik elektryczny o znanej mocy
- ▶ waga kuchenna
- ▶ stalowe sztućce
- ▶ zegarek (stoper)
- ▶ naczynie o pojemności większej niż pojemność czajnika

Przebieg doświadczenia

1. Do czajnika elektrycznego włóż jak największą liczbę stalowych sztućców.
2. Wlej do czajnika wodę, tak aby ledwie zakryła sztućce.
3. Odczekaj chwilę, aż wyrówna się temperatura wody i sztućców.
4. Włącz czajnik i zmierz czas, po jakim woda się zagotuje.
5. Poczekać, aż czajnik i sztućce ostygną. Przelej wodę do przygotowanego wcześniej naczynia i wyznacz jej masę. Zmierz masę sztućców.
6. Zapisz odczytane i zmierzone wartości wielkości fizycznych.

Opracowanie wyników pomiarów

1. Ustal zmianę temperatury sztućców i wody w doświadczeniu. Możesz posłużyć się termometrem kuchennym lub wywnioskować tę zmianę z przebiegu eksperymentu. Uzasadnij przyjęte przez siebie wartości.
2. Oblicz ciepło właściwe stali nierdzewnej.

Omówienie wyniku doświadczenia

1. Porównaj uzyskany wynik ciepła właściwego stali z danymi tablicowymi.
2. Jakie czynniki mają największy wpływ na niepewność tego pomiaru?
3. Czy za pomocą tych samych przyrządów pomiarowych można wyznaczyć ciepło właściwe stali bez znajomości mocy czajnika? Uzasadnij odpowiedź.

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 5. Prędkość dźwięku w powietrzu

s. 86

Problem badawczy

Pomiar prędkości dźwięku w powietrzu

Wstęp

Jeśli odpowiednio dmuchamy w wylot jednostronnie zamkniętej rurki, wydaje ona dźwięk. Za dźwięk ten odpowiada fala powstająca w wyniku interferencji fali biegnącej w dół oraz fali odbitej od powierzchni wody. Fala, która powstaje w opisanym doświadczeniu, ma maksymalną amplitudę przy wylocie rurki, a równą zero – przy jej zamkniętym końcu. Z tego wynika, że w rurce „mieści się” $\frac{1}{4}$ całej długości fali. Wobec tego długość fali dźwiękowej powstającej w rurce jest 4 razy większa od wysokości słupa powietrza w tej rurce.

Prędkość dźwięku można obliczyć ze wzoru:

$$v = \lambda \cdot f$$

gdzie:

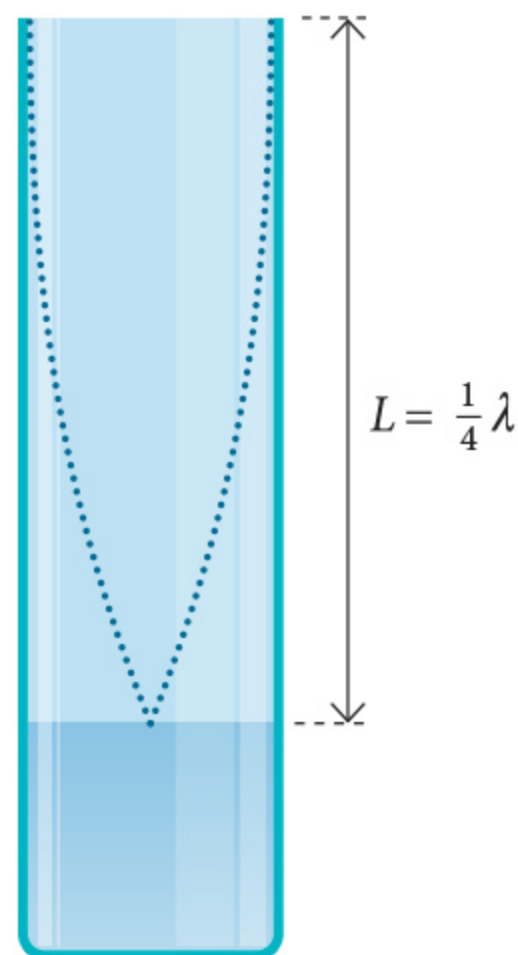
λ – długość fali dźwiękowej,

f – częstotliwość dźwięku.

Wobec tego częstotliwość dźwięku obliczymy ze wzoru:

$$f = v \cdot \frac{1}{\lambda}$$

Częstotliwość dźwięku jest liniową funkcją odwrotności długości fali. Współczynnik kierunkowy tej prostej jest równy prędkości dźwięku.



Przyrządy i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ smartfon z aplikacją Phyphox
- ▶ rurka otwarta z jednej strony

Przebieg doświadczenia

1. Uruchom aplikację Phyphox do mierzenia częstotliwości dźwięku.
2. Przyłóż otwarty wylot rurki do ust (rurka powinna być ustawiona pionowo) i tak wydychaj powietrze, aby rurka wydała dźwięk. Zmierz jego częstotliwość.
3. Zmierz wysokość słupa powietrza w rurce.
4. Zmień wysokość słupa powietrza w rurce (na przykład przez częściowe wypełnienie jej wodą) i powtórz czynności 1.–3.

5. Dokonaj co najmniej sześciu pomiarów częstotliwości dla różnych wysokości słupa powietrza w rurce. Wyniki pomiarów zapisz w tabeli.

Nr pomiaru	Częstotliwość f (Hz)	Wysokość słupa powietrza h (m)	Długość fali λ (m)	Odwrotność długości fali $\frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{\text{m}} \right)$
1				
2				
...				
6				

Opracowanie wyników pomiarów

1. Dla każdej wysokości słupa powietrza oblicz długość fali.
2. Przedstaw na wykresie częstotliwość dźwięku zmierzona przez smartfon w zależności od odwrotności długości fali.
3. Do punktów na wykresie dopasuj prostą i wyznacz jej współczynnik kierunkowy. Możesz posłużyć się arkuszem kalkulacyjnym.

Omówienie wyniku doświadczenia

1. Porównaj uzyskaną prędkość dźwięku z danymi tablicowymi.
2. Wskaż przyczyny ewentualnej rozbieżności wyniku z danymi tablicowymi.

NIEZBĘDNIK 1. Jednostki wielkości fizycznych.

s. 16

s. 92

s. 141

s. 156

Wielkości fizyczne to cechy zjawisk lub przedmiotów, które możemy zmierzyć i zapisać za pomocą liczby z odpowiednią jednostką. Prawa fizyki, które odkrywamy, ukazują nam zależności między wielkościami fizycznymi. Te zależności zapisujemy w postaci równań matematycznych. Dzięki nim możliwe jest obliczenie nieznanymi wielkościami fizycznymi za pomocą tych, których wartość znamy.

Operacje obliczania wielkości fizycznych wykonujemy zarówno na liczbach, jak i na jednostkach. Działania na jednostkach są podobne do działań na liczbach, jednak są między nimi pewne różnice.

Dodawać lub odejmować możemy tylko te same wielkości fizyczne wyrażone w tych samych jednostkach. Na przykład nie można do 5 kilogramów dodać 30 sekund ani od 40 metrów odjąć 10 stopni Celsjusza. Jeśli chcemy dowiedzieć się, ile ważą dwie paczki cukierków, obie masy muszą być wyrażone w tych samych jednostkach, np. w kilogramach. Jeśli mamy paczkę cukierków o masie 300 g i drugą o masie 0,2 kg, ich mas nie można dodać bezpośrednio. Trzeba zamienić 300 g na 0,3 kg i dodać do 0,2 kg. Wówczas wynik też będzie wyrażony w kilogramach (kg). Działanie zapiszemy:

$$m = m_1 + m_2 = 0,3 \text{ kg} + 0,2 \text{ kg} = 0,5 \text{ kg}$$

Inny przykład: chcemy wyznaczyć różnicę temperatur w południe i rano. Obie temperatury muszą być wyrażone w tych samych jednostkach np. w stopniach Celsjusza ($^{\circ}\text{C}$). Wtedy wynik też otrzymamy w stopniach Celsjusza.

$$\Delta t = t_p - t_r = 12 \text{ }^{\circ}\text{C} - 5 \text{ }^{\circ}\text{C} = 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Podstawowe wielkości fizyczne tworzą tzw. układ SI. Podstawową jednostką odległości w tym układzie jest metr (m), czasu – sekunda (s), a masy – kilogram (kg).

Wiele wielkości fizycznych uzyskujemy przez mnożenie lub dzielenie wielkości podstawowych. Takie same działania wykonujemy na jednostkach. Na przykład aby otrzymać prędkość, trzeba podzielić przebytą drogę przez czas obserwacji. Jednostką prędkości zapisywaną jako $[v]$ jest metr podzielony przez sekundę:

$$[v] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

To jednostka prędkości w układzie SI. Prędkość można również wyrażać w km/h lub na przykład w cm/rok.

Przyspieszenie to zmiana prędkości podzielona przez czas:

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

Ustalmy jednostkę przyspieszenia w układzie SI:

$$[a] = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{s}} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\text{s}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Jednostkę siły można wyrazić przez jednostki podstawowe, korzystając ze wzoru, jaki wiąże siłę z przyspieszeniem:

$$F = ma$$

$$[F] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{N}$$

Ponieważ wyrażenie na jednostkę siły jest dość skomplikowane, nadajemy jej nazwę „niuton” (symbol N).

Jednostką energii jest dżul (J). Możemy ją wyrazić przez jednostki podstawowe, korzystając z dowolnego wzoru na energię, np. na energię kinetyczną:

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

Wobec tego jednostka energii:

$$[E] = \text{J} = \text{kg} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Współczynniki liczbowe (jak $\frac{1}{2}$ w powyższym wzorze) są bezwymiarowe, czyli nie mają jednostki. Dlatego nie uwzględniamy ich w analizie jednostek.

Rozwiązywanie zadań często wymaga układania równań z wykorzystaniem podstawowych praw i zauważonych zależności. Na przykład zasada zachowania energii pozwala porównywać różne jej rodzaje, opisywane różnymi wzorami. Działania na jednostkach pozwalają upewnić się, że przekształcenia wzorów doprowadziły do poprawnej postaci końcowej.

Przeanalizujmy przemianę energii wody w wodospadzie. Porcja wody o masie m na górze wodospadu ma energię grawitacji mgh , zaś na dole już tej energii nie ma. Została ona przekształcona w energię wewnętrzną właśnie tej porcji wody:

$$mgh = \Delta E_w$$

Z tego równania można obliczyć, o ile wyższa jest temperatura wody u podstawy wodospadu w porównaniu z temperaturą na górze. Zmiana energii wewnętrznej wiąże się ze zmianą temperatury Δt :

$$\Delta E_w = cm\Delta t$$

Uzyskujemy równanie:

$$mgh = cm\Delta t$$

Po przekształceniu otrzymujemy:

$$\Delta t = \frac{mgh}{cm} = \frac{gh}{c}$$

Sprawdźmy jednostkę. Przypomnijmy, że jednostką ciepła właściwego c jest $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

$$[\Delta t] = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{J}}$$

Wiemy, że $\text{J} = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$, zatem:

$$[\Delta t] = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = ^\circ\text{C}$$

Uzyskaliśmy jednostkę temperatury, czyli taką, jakiej się spodziewaliśmy. Gdybyśmy otrzymali inną jednostkę, znaczyłoby to, że gdzieś przy przekształceniu wzorów albo przy analizie jednostek popełniliśmy błąd.

NIEZBĘDNIK 2. Przekształcanie równań.

s. 16

s. 28

s. 72

s. 160

s. 178

Prawa fizyki często zapisujemy w postaci równań matematycznych nazywanych **wzorami**. Dzięki wzorom możliwe jest wyznaczenie nieznanymi wielkości fizycznych poprzez te, które znamy. Aby to osiągnąć, trzeba często wzór przekształcić. Celem przekształcenia jest uzyskanie takiej postaci równania, w której wielkość szukana występuje jako jedyna po jednej z jego stron. Żeby taką postać uzyskać, można równanie mnożyć lub dzielić przez dowolną liczbę (zmienną) różną od zera, a także do obu stron dodawać lub od nich odejmować tę samą liczbę (zmienną). Można też obie strony równania podnieść do dowolnej potęgi lub wyciągnąć pierwiastek. Prześledźmy to na przykładach.

s. 67

W rozdziale 9 jest podany wzór na zmianę częstotliwości w zjawisku Dopplera:

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v}{u} \right) \quad (1)$$

Jak obliczyć prędkość v , gdy mamy dane wszystkie pozostałe wielkości? Szukana wielkość występuje po prawej stronie równania, spróbujemy zatem „usunąć” z tej strony wszystkie inne wielkości. Najpierw dzielimy równanie stronami przez f_0 .

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v}{u} \right) \quad | : f_0$$

Otrzymujemy:

$$\frac{f}{f_0} = \frac{f_0}{f_0} \left(1 + \frac{v}{u} \right), \quad \text{czyli} \quad \frac{f}{f_0} = 1 + \frac{v}{u}$$

Następnie od obu stron równania odejmujemy liczbę 1:

$$\frac{f}{f_0} = 1 + \frac{v}{u} \quad | - 1$$

Równanie (1) sprowadza się teraz do postaci:

$$\frac{f}{f_0} - 1 = 1 + \frac{v}{u} - 1, \quad \text{czyli} \quad \frac{f}{f_0} - 1 = \frac{v}{u}$$

Żeby się pozbyć u po lewej stronie, trzeba równanie pomnożyć stronami właśnie przez u :

$$\frac{f}{f_0} - 1 = \frac{v}{u} \quad | \cdot u$$

Wtedy otrzymujemy:

$$\left(\frac{f}{f_0} - 1 \right) u = \frac{v}{u} u = v$$

Cel został osiągnięty. Dla wygody przestawiamy strony otrzymanego równania. Nasz końcowy wzór przyjmuje postać:

$$v = \left(\frac{f}{f_0} - 1 \right) u \quad (2)$$

A skoro znamy już wielkości występujące z prawej strony, można je podstawić i obliczyć prędkość v .

Czy można od razu wstawić dane do wzoru (1) i dopiero wtedy go przekształcić? Oczywiście, że można to zrobić, jednak w ten sposób pozbawiamy się możliwości

wyciągnięcia ważnych wniosków. Gdybyśmy np. postawili pytanie: „Jaka musi być prędkość, żeby częstotliwość f była o 10 % większa od f_0 ?”, ze wzoru (1) bez przekształcania trudno byłoby nam odczytać odpowiedź. O wiele łatwiej zrobić to na podstawie przekształconej formy (2), przez wstawienie do niej $\frac{f}{f_0} = 1,1$. Wtedy:

$$v = (1,1 - 1)u = 0,1u$$

Żeby tak było, prędkość v musi stanowić 10 % prędkości fali.

Teraz przekształcimy wzór na okres drgań ciężarka na sprężynie z rozdziału 2:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3)$$

Chcemy z niego obliczyć współczynnik sprężystości k . Niestety, występuje on pod pierwiastkiem, którego trzeba się „pozbyć”. Robimy to przez podniesienie obu stron wzoru (3) do kwadratu:

$$T^2 = \left(2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}\right)^2 \text{ czyli } T^2 = 4\pi^2 \frac{m}{k}$$

Chcemy, żeby k występowało w liczniku, nie w mianowniku. Dlatego teraz mnożymy równanie stronami przez k :

$$T^2 k = 4\pi^2 \frac{m}{k} k \quad \text{czyli} \quad T^2 k = 4\pi^2 m$$

Następnie trzeba się „pozbyć” członu T^2 występującego po lewej stronie równania. W tym celu dzielimy równanie stronami właśnie przez ten człon:

$$T^2 k = 4\pi^2 m \quad | : T^2$$

Ponieważ T^2 dzielone przez T^2 daje 1, możemy od razu zapisać równanie w końcowej postaci:

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$$

W tym momencie możemy wstawić dane i obliczyć współczynnik sprężystości.

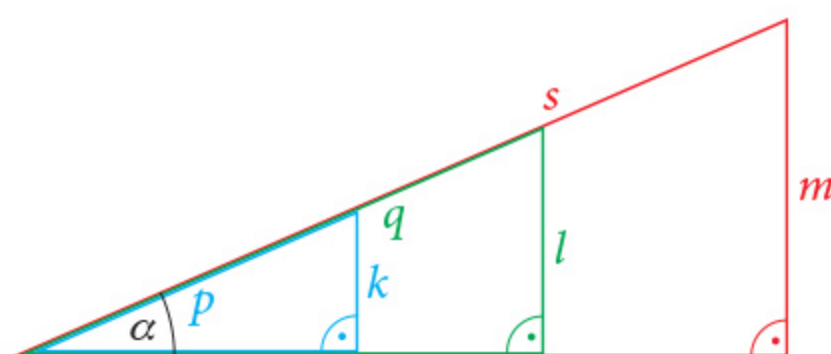
NIEZBĘDNIK 3. Sinus kąta ostrego.

s. 130

Figury podobne mają taki sam kształt i takie same proporcje, ale różnią się wielkością.

s. 108

W przypadku trójkątów o ich podobieństwie świadczą kąty: dwa trójkąty o jednakowych kątach to trójkąty podobne. Wynika z tego, że wszystkie trójkąty prostokątne, w których jeden z kątów ostrych jest taki sam, są do siebie podobne (rzc. 1).



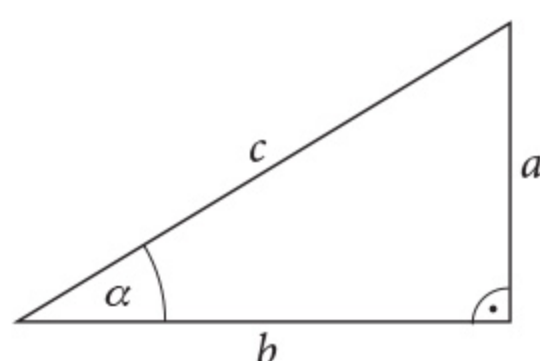
Rzc. 1.

W figurach podobnych stosunki odpowiednich boków są równe. Wobec tego, gdy podzielimy długość przyprostokątnej leżącej naprzeciw kąta α (na ryc. 1 bok oznaczony literami k, l, m) przez długość przeciwprostokątnej (bok p, q, s) dla dowolnego trójkąta z ryciny 1, to otrzymamy taki sam wynik.

$$\frac{k}{p} = \frac{l}{q} = \frac{m}{s}$$

Dla wszystkich trójkątów prostokątnych o kącie ostrym α stosunek przyprostokątnej naprzeciw kąta do przeciwprostokątnej jest taki sam i zależy tylko od kąta.

Sinusem kąta α nazywamy liczbę, którą uzyskamy w wyniku podzielenia długości przyprostokątnej leżącej naprzeciw kąta α przez długość przeciwprostokątnej (ryc. 2).



$$\sin \alpha = \frac{a}{c}$$

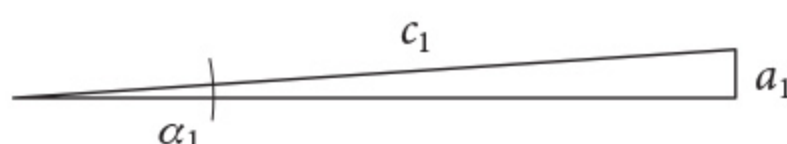
Ryc. 2.

W tabeli poniżej podano wartości $\sin \alpha$ dla wybranych kątów (Wartości sinusa podano z dokładnością do trzech cyfr po przecinku).

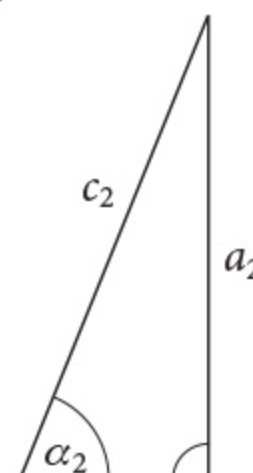
α	1°	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	85°
$\sin \alpha = \frac{a}{c}$	0,017	0,087	0,174	0,342	0,500	0,643	0,766	0,866	0,940	0,985	0,996

Dla małych kątów α przyprostokątna jest bardzo krótka w stosunku do przeciwprostokątnej, zatem $\sin \alpha$ jest bardzo małą liczbą (ryc. 3a). Jeśli zmniejszymy kąt α tak, aż będzie bliski zera, również $\sin \alpha$ będzie bliski zera. Dlatego przyjmuje się, że: $\sin 0^\circ = 0$

a)



b)



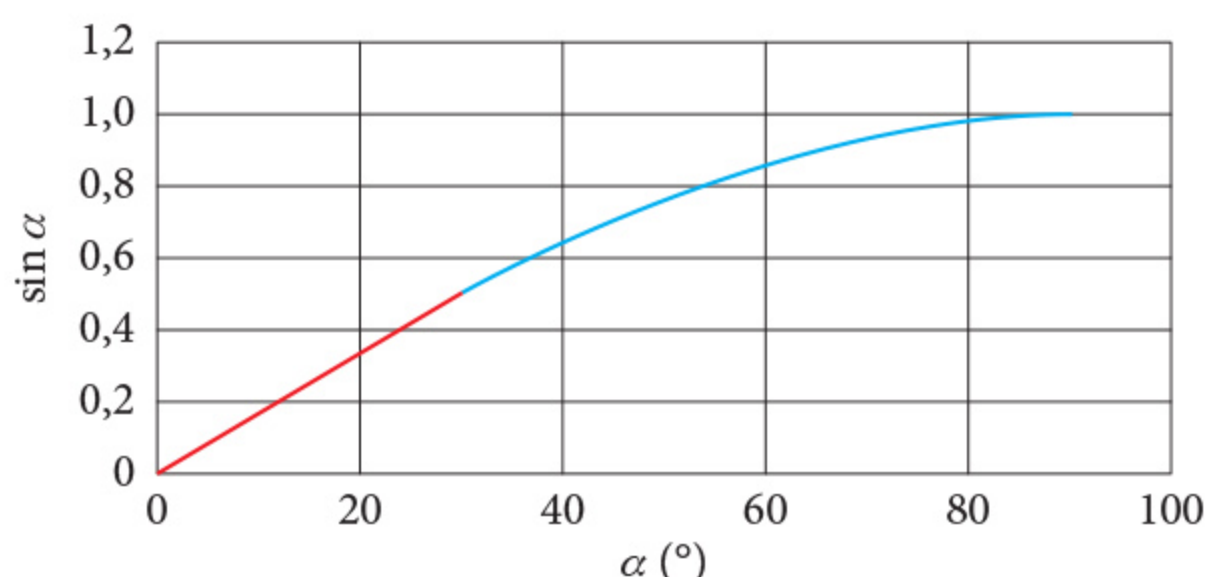
Ryc. 3.

Z kolei gdy miara kąta α jest bliska 90° , to odpowiednia przyprostokątna ma prawie taką samą długość jak przeciwprostokątna (ryc. 3b). Wtedy $\sin \alpha$ jest bliski 1. Dlatego przyjmuje się, że:

$$\sin 90^\circ = 1$$

Wiele kalkulatorów (także w smartfonie) umożliwia obliczenie sinusa dowolnego kąta. Przed obliczeniem trzeba się upewnić, że miara kąta, którą wczytuje kalkulator, podana jest w stopniach (napis: deg).

Na rycinie 4 przedstawiono wykres zależności $\sin \alpha$ od kąta α .



Ryc. 4.

Widzimy, że dla kątów mniejszych od 30° zależność jest prawie liniowa (na czerwono). To znaczy, że z dobrym przybliżeniem $\sin \alpha$ jest proporcjonalny do miary kąta α . Sinus kąta możemy wtedy w przybliżeniu obliczyć ze wzoru:

$$\sin \alpha \approx \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \alpha$$

gdzie $\pi \approx 3,14$.

Wobec tego, gdy ograniczymy się do małych kątów, możemy zapisać:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \approx \frac{\frac{\pi}{180^\circ} \cdot \alpha}{\frac{\pi}{180^\circ} \cdot \beta} = \frac{\alpha}{\beta}$$

Wiele zjawisk w przyrodzie opisujemy za pomocą kątów. Dla małych kątów powyższa zależność pozwala uprościć analizę tych zjawisk.

Poniższa tabela ilustruje, na ile dobre jest takie przybliżenie.

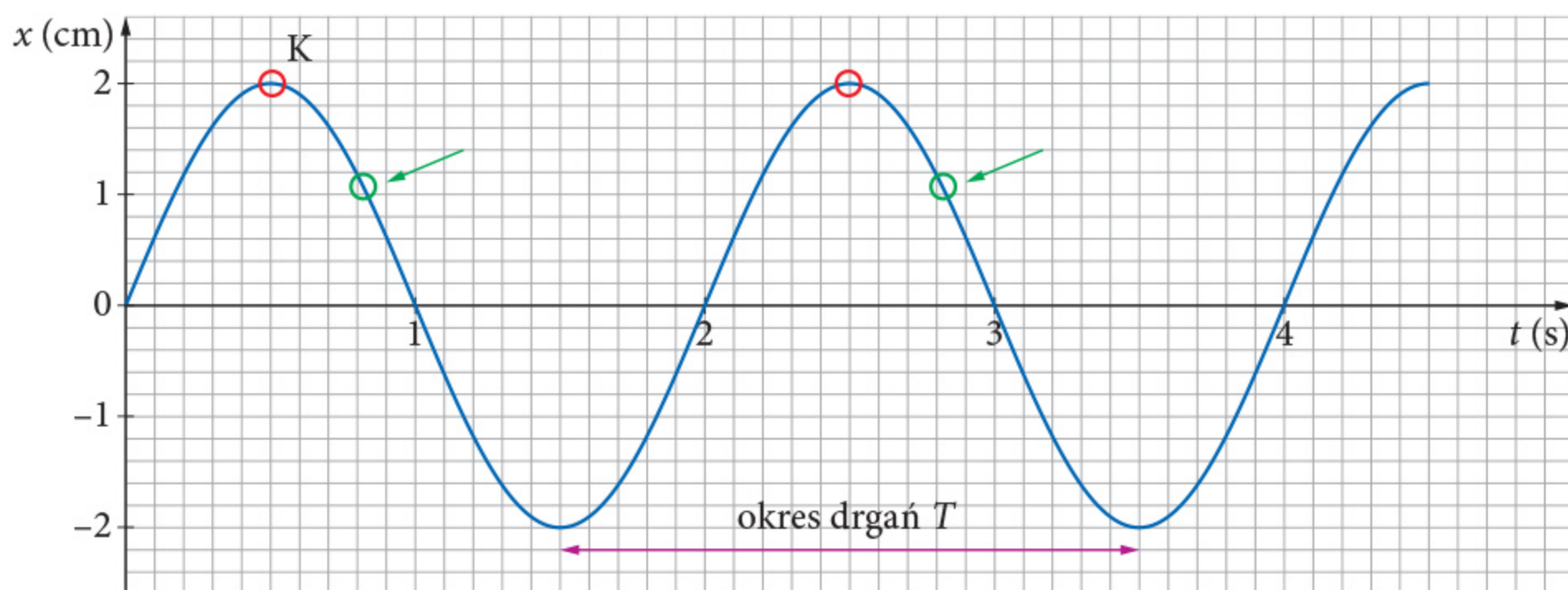
α	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
β	0°	3°	7°	10°	13°	16°	19°	22°	25°	28°	30°
$\frac{\alpha}{\beta}$	–	1,667	1,429	1,500	1,538	1,563	1,579	1,591	1,600	1,607	1,667
$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	–	1,665	1,425	1,490	1,520	1,533	1,536	1,531	1,521	1,506	1,532

NIEZBĘDNIK 4. Analiza wykresu zależności położenia ciała od czasu.

s. 6 Podczas badania ruchu drgającego ciężarka zawieszonego na sprężynie można otrzymać wykres zależności położenia ciężarka od czasu, taki jak w rozdziale 1. Położenie to miejsce, w którym w danym momencie znajduje się ciężarek. Możemy je zapisać jako współrzędną na pionowej osi liczbowej, wyskalowanej w jednostkach długości.

Wykresy zależności od czasu najwygodniej analizować od strony lewej do prawej, tak jak czytamy tekst.

Popatrzmy w ten sposób na ryc. 1. Najpierw kierujemy wzrok na punkt $(0,0)$. Gdy przesuwamy się w prawo, linia wykresu pnie się do góry. Oznacza to, że ciężarek poruszał się w górę.

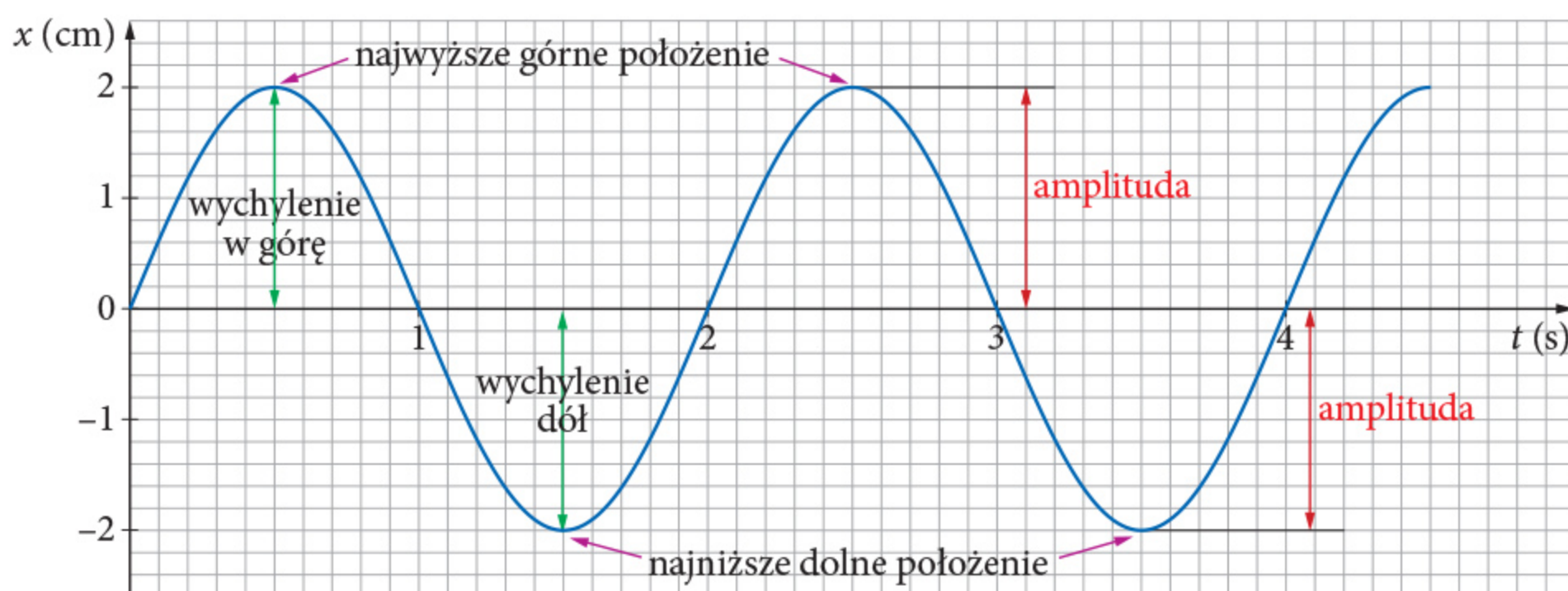


Ryc. 1.

W chwili 0,5 s dotarł do górnego skrajnego położenia (punkt K na wykresie).

Gdy znów przesuniemy wzrok w prawo, zauważymy, że linia wykresu schodzi w dół – w tym czasie ciężarek poruszał się w dół (zielony punkt).

Po dwóch sekundach od momentu, w którym ciężarek był w najwyższym punkcie, czyli w chwili 2,5 s, ciężarek ponownie znalazł się w górnym skrajnym położeniu. Oznacza to, że okres drgań tego ciężarka jest równy 2 s. Co 2 s powtarza się pełny cykl ruchu drgającego. Analogicznie sytuacja, w której ciężarek jest w połowie maksymalnego wychylenia i porusza się w dół (zielone punkty na ryc. 1), także powtarza się co 2 s.



Ryc. 2.

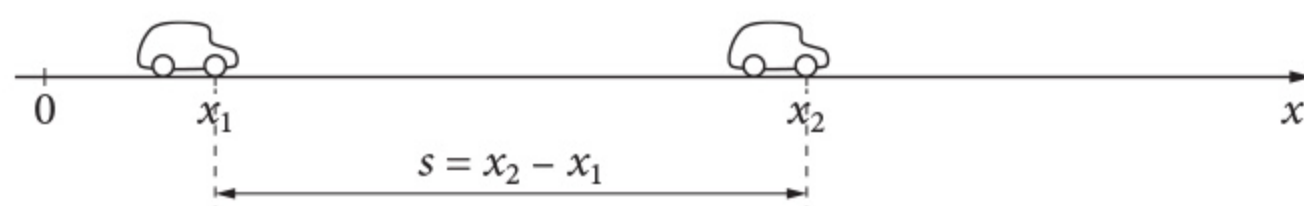
W ruchu drgającym amplitudę definiujemy jako odległość między skrajnym wychyleniem a położeniem równowagi. (Inaczej pojęcie to funkcjonuje w języku potocznym

– powszechnie mówi się np., że amplituda temperatury w jakiejś miejscowości to różnica między najwyższym a najniższym jej odczytem).

Z wykresu odczytujemy, że położenie ciała poruszającego się ruchem drgającym zmienia się w zakresie od -2 cm do $+2\text{ cm}$. Wobec tego maksymalne wychylenie wynosi 2 cm w górę oraz 2 cm w dół. Amplituda drgań w przedstawionej sytuacji jest równa 2 cm . Odległość między położeniem najniższym a najwyższym jest równa natomiast 4 cm .

Z nauki fizyki w klasie pierwszej wiemy, że drogę przebytą przez ciało możemy wyznaczyć, jeśli znamy zmianę położenia ciała.

$$s = |x_2 - x_1|$$



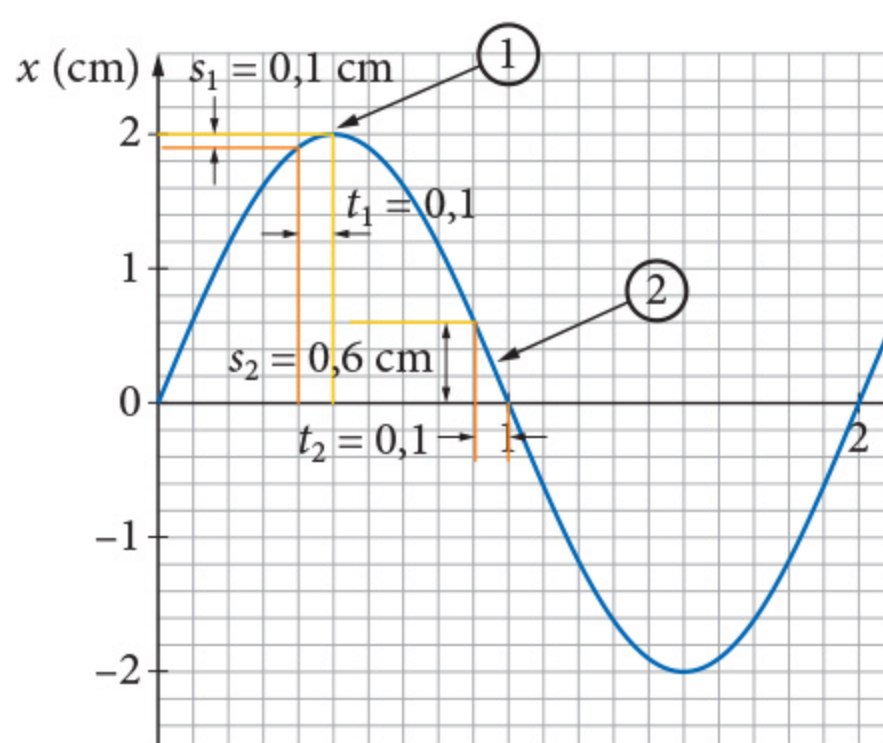
Aby obliczyć prędkość, podzielimy drogę przebytą przez ciało przez czas, w którym ta droga została przebyta.

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

Jeśli czas t jest krótki, uzyskamy prędkość chwilową.

Wyznamy teraz prędkość ciała w pobliżu dwóch charakterystycznych punktów ruchu drgającego (ryc. 3):

1. Gdy ciało zbliża się do górnego skrajnego położenia.
2. Gdy ciało zbliża się do położenia równowagi.



Ryc. 3.

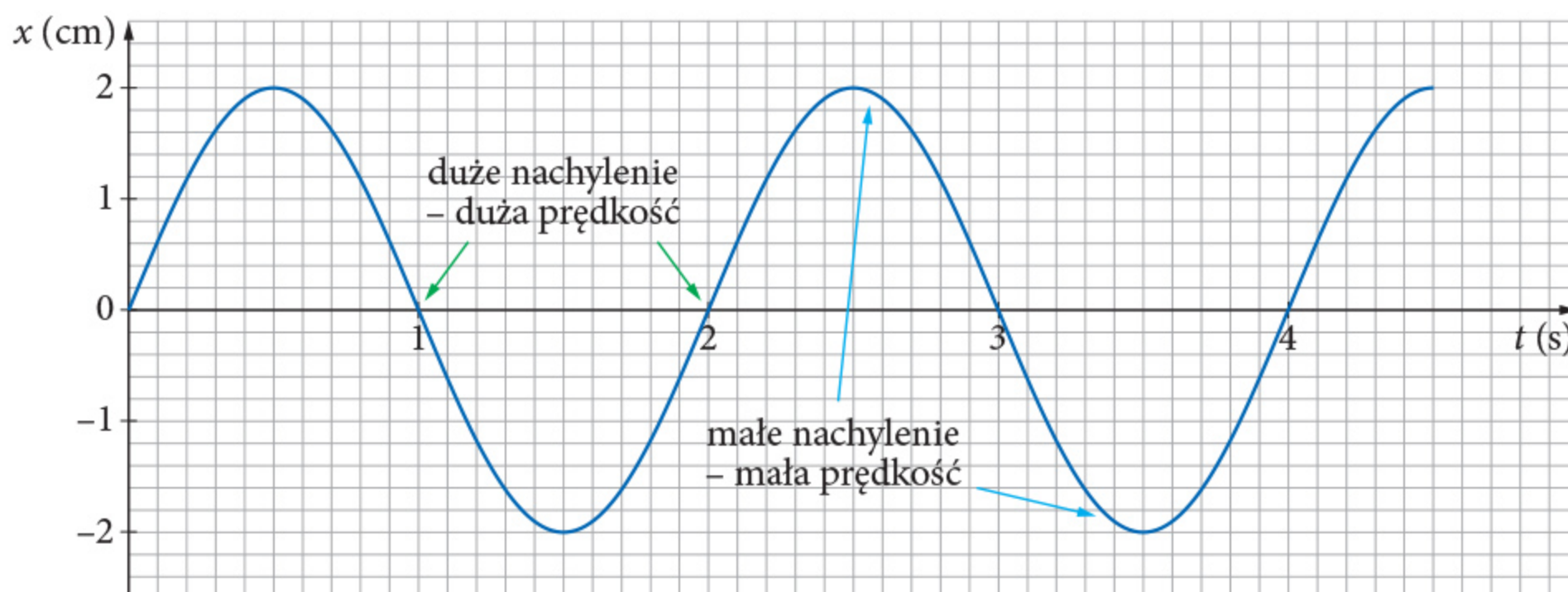
Pierwszy przypadek (1 na ryc. 3): w czasie $0,1\text{ s}$ ciało przebyło drogę około $0,1\text{ cm}$. Wobec tego prędkość średnia na tym etapie ruchu jest równa:

$$v_1 = \frac{0,1\text{ cm}}{0,1\text{ s}} = 1\frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

W drugim przypadku (2 na ryc. 3) w czasie 0,1 s przebywa drogę 0,6 cm. Wobec tego prędkość jest w tym przypadku równa:

$$v_2 = \frac{0,6 \text{ cm}}{0,1 \text{ s}} = 6 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Fragment wykresu odpowiadający sytuacji drugiej, kiedy prędkość jest większa, jest wyraźnie bardziej stromy niż dla przypadku 1. To ogólna prawidłowość: im nachylenie wykresu jest większe, tym prędkość ciała jest większa. Z kolei im mniejsze jest nachylenie wykresu, tym prędkość ciała jest mniejsza (ryc. 4).



Ryc. 4.

Wnioski wynikające z analizy wykresu ruchu drgającego są słuszne dla innych zależności przedstawianych na wykresach. Linia wykresu idąca w górę oznacza wzrost danej wielkości – im większe jest jej nachylenie, tym szybciej zachodzą zmiany.

TEKST 1. Widzenie barw**Oko**

Oko ludzkie jest urządzeniem podobnym do aparatu fotograficznego. Jego układ optyczny wytwarza w tylnej części oka rzeczywisty, pomniejszony i odwrócony obraz widzianych przedmiotów. Ta część oka wyścielona jest błoną, zwaną siatkówką, w której znajdują się komórki światłoczułe. Są dwa rodzaje takich komórek:

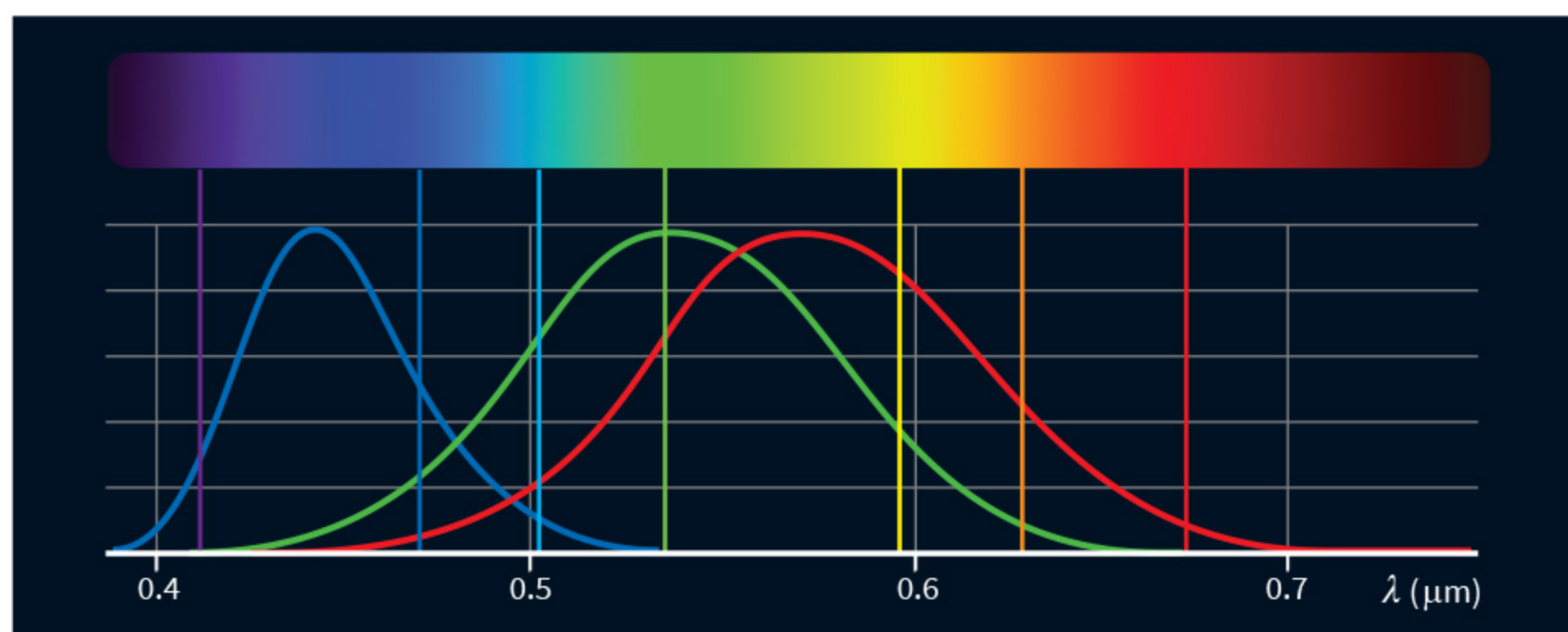
- pręciki, przeznaczone do widzenia o zmroku, kiedy natężenie światła jest małe; za pomocą pręcików nie można rozróżniać barw.
- czopki, przeznaczone do widzenia dziennego, kiedy natężenie światła jest duże; te komórki odpowiedzialne są za widzenie barw [...].

Trzy rodzaje czopków

Przypomnijmy najpierw, jakie barwy występują w widmie światła tradycyjnej żarówki z włóknem wolframowym.



Ryc. 1. Ciągłe widmo żarówki tradycyjnej (wolframowej)



Ryc. 2. Zależność czułości czopków od długości fali świetlnej

Jak to się dzieje, że oko ludzkie rozróżnia barwy? Żeby to zrozumieć, trzeba wiedzieć, że w normalnym oku ludzkim są trzy rodzaje czopków. Rysunek 2. przedstawia zależność czułości tych komórek od długości fali światła (jednobarwnego):

1. Pierwszy rodzaj komórek najsilniej reaguje na światło niebiesko-fioletowe (krzywa niebieska). Światła żółtego, pomarańczowego i czerwonego „nie widzi” niemal zupełnie.
2. Drugi rodzaj komórek najsilniej reaguje na światło zielone (krzywa zielona). Nie reaguje na światło fioletowe i czerwone.

3. Trzeci rodzaj komórek najsilniej reaguje na światło żółte (krzywa czerwona). Nie widzi światła fioletowego.

Hipoteza, że widzenie barwne jest wynikiem istnienia trzech rodzajów detektorów w oku, pochodzi od Thomasa Younga. Przez bardzo wiele lat nie była jednak znana dokładna zależność ich czułości od długości fali. Ostateczne rozwiązanie tego problemu przyniosły badania w połowie ubiegłego wieku. Polegały one na pomiarze napięć elektrycznych, powstających pod wpływem oświetlenia, na pojedynczych żywych czopkach wypreparowanych z oka.

Widzenie barw widmowych

Zastanówmy się najpierw, jak reaguje oko, kiedy pada na nie światło o ściśle określonej długości fali (ryc. 2).

1. Jeżeli jest to światło **fioletowe**, pobudza tylko komórki pierwszego rodzaju. Wskazuje to pionowa linia fioletowa. Tylko te komórki wysyłają sygnały do mózgu, co ostatecznie interpretowane jest jako barwa fioletowa.

2. Światło **czerwone** pobudza tylko komórki trzeciego rodzaju. Odczuwamy to jako barwę czerwoną.

Wszystkie inne barwy widmowe pobudzają jednocześnie więcej niż jeden rodzaj komórek:

1. Światło **pomarańczowe** pobudza silnie komórki trzeciego rodzaju, słabo – komórki drugiego rodzaju, a komórek pierwszego rodzaju – wcale.

2. Światło **żółte** pobudza bardzo silnie komórki trzeciego rodzaju i silnie, choć nieco słabiej – komórki drugiego rodzaju.

3. Światło **zielone** pobudza bardzo silnie komórki drugiego rodzaju, silnie, choć nieco słabiej – komórki trzeciego rodzaju i słabo komórki pierwszego rodzaju.

4. Światło **niebieskie** pobudza silnie komórki pierwszego rodzaju i znacznie słabiej – komórki drugiego i trzeciego rodzaju.

Za każdym razem mózg porównuje sygnały docierające do niego od różnych rodzajów komórek i wytwarza wrażenie określonej barwy światła.

Czarne i białe

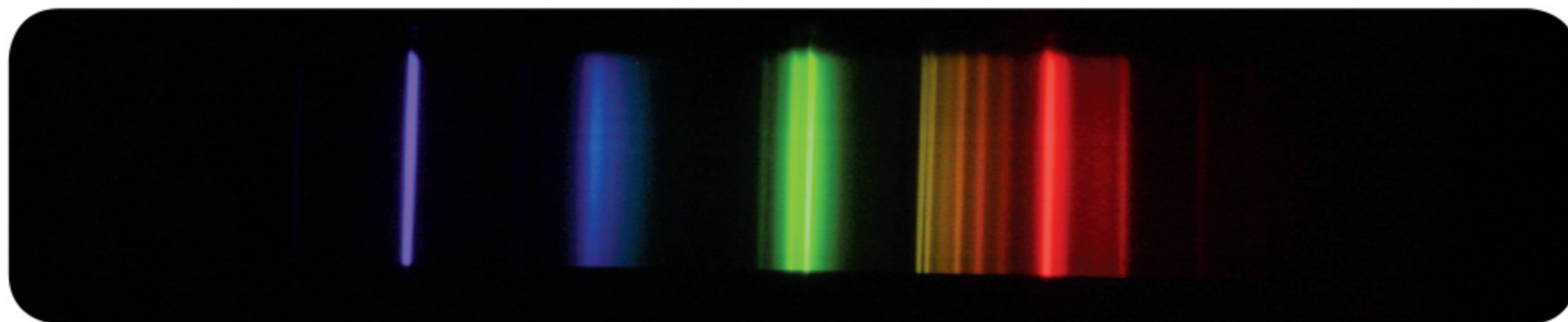
1. Wrażenie **czerni** (ciemności) mamy wtedy, gdy do komórek nie dobiega żadne światło i żaden rodzaj komórek nie jest pobudzony.

2. Widzimy światło **białe**, jeżeli wszystkie trzy rodzaje komórek pobudzane są jednakowo silnie. Może to zachodzić pod wpływem światła o widmie ciągłym.

Kiedy widzimy światło białe?

Stwierdziliśmy, że mamy odczucie światła białego, jeżeli oświetlimy oko światłem o widmie ciągłym, takim jakie wysyłają ciała rozgrzane do wysokiej temperatury – jak włókno wolframowe żarówki czy Słońce. Odczucie światła białego może jednak powstawać i w innych przypadkach [...].

Przykładem może być biała żarówka energooszczędna^{*}. Widmo takiej żarówki wcale nie jest ciągłe, składa się z oddzielnych wąskich pasm i linii (ryc. 3). Pomiedzy nimi istnieją całkiem ciemne obszary. Światło to jest złożone – ale ma zupełnie inny charakter niż widmo żarówki tradycyjnej.



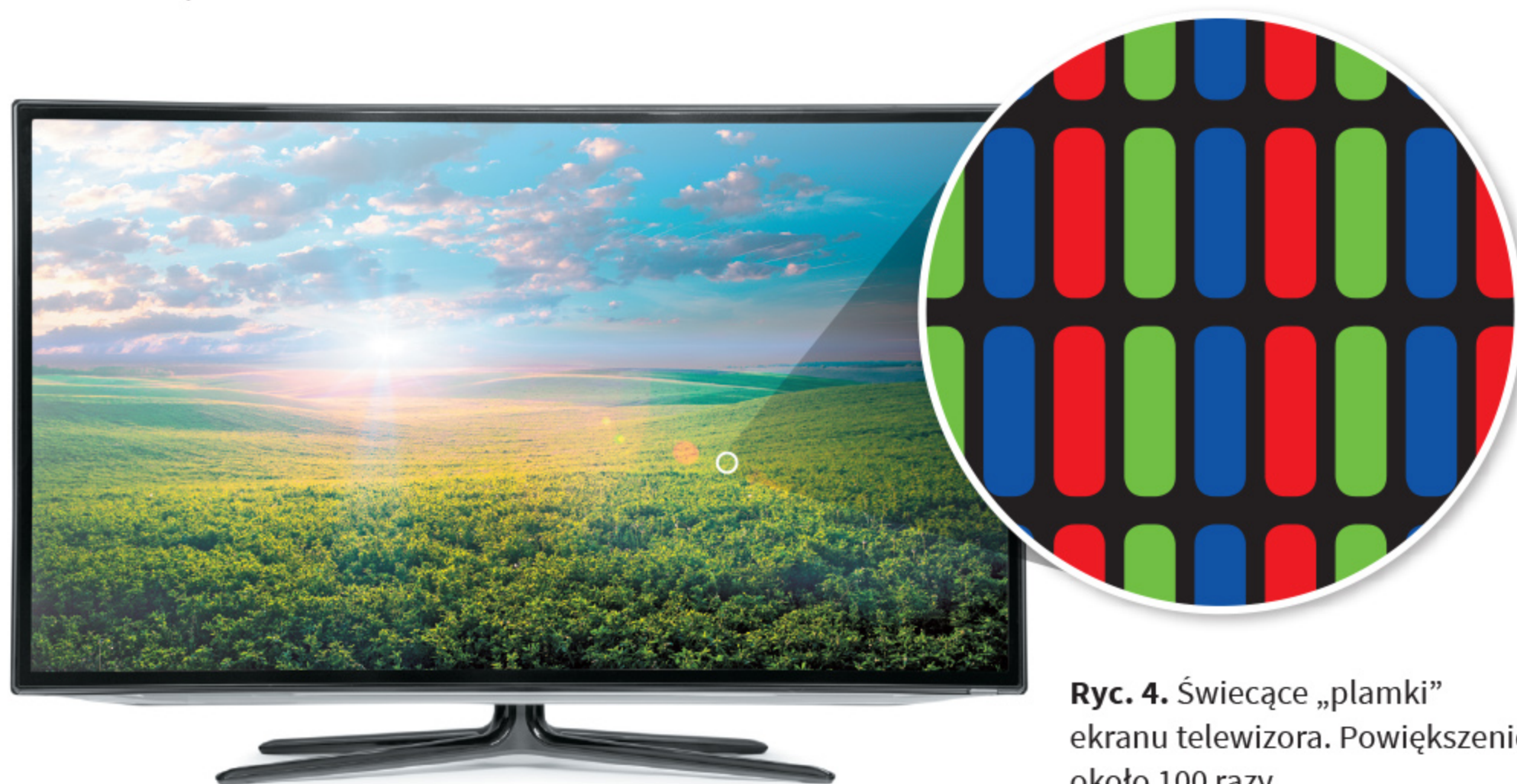
Ryc. 3. Widmo żarówki energooszczędnej

[...] Również ekran LCD, gdy wyświetla obiekty o białej barwie, nie wysyła światła o szerokim widmie ciągłym. Obserwuje się przede wszystkim wąskie linie – czerwoną i zieloną oraz niezbyt szerokie pasmo niebieskie. Oprócz tego występuje jeszcze słabe świecenie pomarańczowe.

Podsumujmy: odczucie światła białego powstaje wtedy, gdy równomiernie pobudzimy trzy rodzaje czopków. Można tego dokonać na przeróżne sposoby.

Składanie barw, system RGB

Kiedy patrzymy na kolorowy telewizor czy monitor komputerowy, mamy odczucie pełnej gamy barw – od fioletu do czerwieni. Będziemy zakładać dla uproszczenia, że ekran telewizora wysyła tylko trzy rodzaje światła monochromatycznego: czerwone, zielone i niebieskie. Na ekranie świecą rzeczywiście małe barwne punkciki tylko tych trzech kolorów (ryc. 4).

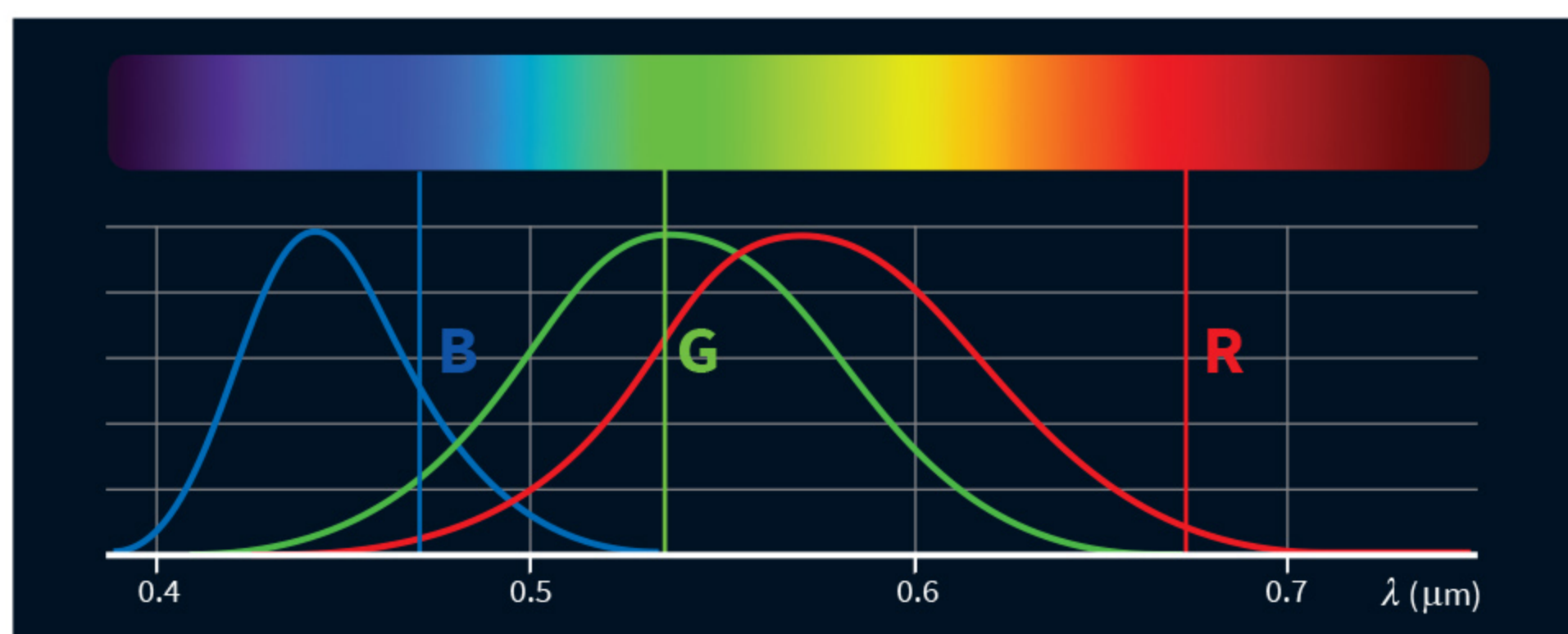


Ryc. 4. Świejące „plamki” ekranu telewizora. Powiększenie około 100 razy

^{*} świetlówka kompaktowa – *przyp. red.*

[...] Obserwujemy na przykład, że w miejscach niebieskich, zielonych i czerwonych ekranu świecą tylko odpowiednie plamki jednego rodzaju. W miejscach żółtych świecą jednocześnie plamki zielone i czerwone. W miejscach białych świecą równomiernie trzy rodzaje plamek itp. Działanie barwnego telewizora polega na swojego rodzaju „oszukiwaniu” oka. Na przykład:

1. Widmowe światło żółte pobudzało jednocześnie komórki drugiego i trzeciego rodzaju (ryc. 2). Taki sam efekt można uzyskać, oświetlając równocześnie oko światłem zielonym i czerwonym (G i R na ryc. 5). A więc zmieszanie światła zielonego i czerwonego daje odczucie barwy żółtej.



Ryc. 5. Barwy systemu RGB

2. Światło białe pobudzało jednako komórki wszystkich trzech rodzajów. Taki sam efekt można uzyskać przez zmieszanie światła niebieskiego, zielonego i czerwonego w odpowiednich proporcjach.

3. Odcienie „pastelowe”, jak kremowy, różowy czy seledynowy, także są wywołane pobudzeniem wszystkich trzech rodzajów komórek jednocześnie – ale w nieco różnych proporcjach.

4. Pobudzając komórki oka jednocześnie światłem czerwonym i niebieskim, uzyskujemy wrażenie fioletu. Możemy jednak otrzymać także



Ryc. 6. Składanie barw RGB

barwę pośrednią pomiędzy czerwienią a fioletem, czyli **purpurę** (ryc. 6). Taka barwa nie występuje w widmie światła białego.

Sposób uzyskiwania wrażenia różnych barw za pomocą trzech rodzajów światła jednobarwnego – czerwonego, zielonego i niebieskiego, po angielsku **Red**, **Green** i **Blue** – nazywamy **systemem RGB** [...].

Daltonizm

Około 5 % chłopców i 0,5 % dziewcząt nie rozróżnia prawidłowo barw. Wiąże się to z wrodzonym brakiem któregoś z rodzajów komórek do widzenia dziennego. Najczęściej brakuje u takich ludzi komórek trzeciego rodzaju. Nie widzą oni światła czerwonego, a poza tym nie odróżniają czerwieni od zieleni. Nazwa zaburzenia tego rodzaju – **daltonizm** – **pochodzi od nazwiska Daltona**, który rozpoznał je u siebie.

Jerzy Ginter

(fragmenty artykułu opublikowanego w czasopiśmie „Neutrino”, Wiosna 2014), nr 24

Pytania i zadania

1. Dlaczego podczas zmierzchu w zasadzie nie widzimy kolorów (wszystko jest w różnych odcieniach szarości)?
2. Co to jest światło monochromatyczne?
3. Czy możemy widzieć inne barwy niż te, które występują w widmie ciągłym światła białego?
4. Co to jest daltonizm?
5. Wyobraź sobie, że przymierzasz koszulę w sklepie oświetlonym świetłówkami kompaktowymi o widmie takim jak na rycinie 3. Czy kolor każdej przymierzanej koszuli będzie taki sam w świetle dziennym jak w sklepie? Uzasadnij odpowiedź. Wskazówka: koszula może odbić tylko takie światło, jakie na nią pada.

TEKST 2. Jak przechowywać lody?

Głupie pytanie! To przecież oczywiste, że w temperaturze poniżej zera, najlepiej w zamrażarce, gdzie spokojnie mogą poczekać, aż ktoś je zje. Problem polega jednak na tym, że nie zawsze to czekanie im służy. O smaku lodów decyduje bowiem nie tylko skład chemiczny, ale również niewidoczna gołym okiem wewnętrzna budowa, która w zamrażarce może ulegać zmianom. Zmiany te dopiero niedawno zostały wytropione przez fizyków, a wnioski, do jakich doszli w swoich badaniach, są pouczające i mogą zmienić nasze podejście do popularnego mrożonego deseru. Zanim jednak zaznajomimy się z rezultatami eksperymentów, przyjrzyjmy się, z czego składają się najzwyklejsze lody śmietankowe.

1. Kryształki lodu. Oczywista oczywistość. Są lody, musi być lód. Występuje on w postaci niezwykle drobnych kryształków o rozmiarach pomiędzy 10 a 75 mikrometrów, czyli kilka razy mniejszych niż średnica ludzkiego włosa. Im mniejsze kryształki lodu, tym przyjemniejsze odczucia na języku.

2. Bąbelki powietrza. To one nadają „lekkości” całej mieszance. Ich rozmiar jest nieco większy od kryształków lodu i wynosi od 20 do 150 mikrometrów. To wciąż jednak na tyle mało, że tylko największe z nich jesteśmy w stanie dostrzec gołym okiem. Podobnie jak w przypadku kryształków lodu – im mniejsze bąbelki, tym smaczniejsze lody.

3. Krople tłuszczu. Są najmniejsze w całej mieszance. Tworzą skupiska o średnicach od 1 do 10 mikrometrów. Odgrywają ważną rolę w stabilizacji struktury, czyli utrzymują cały układ w ryzach.



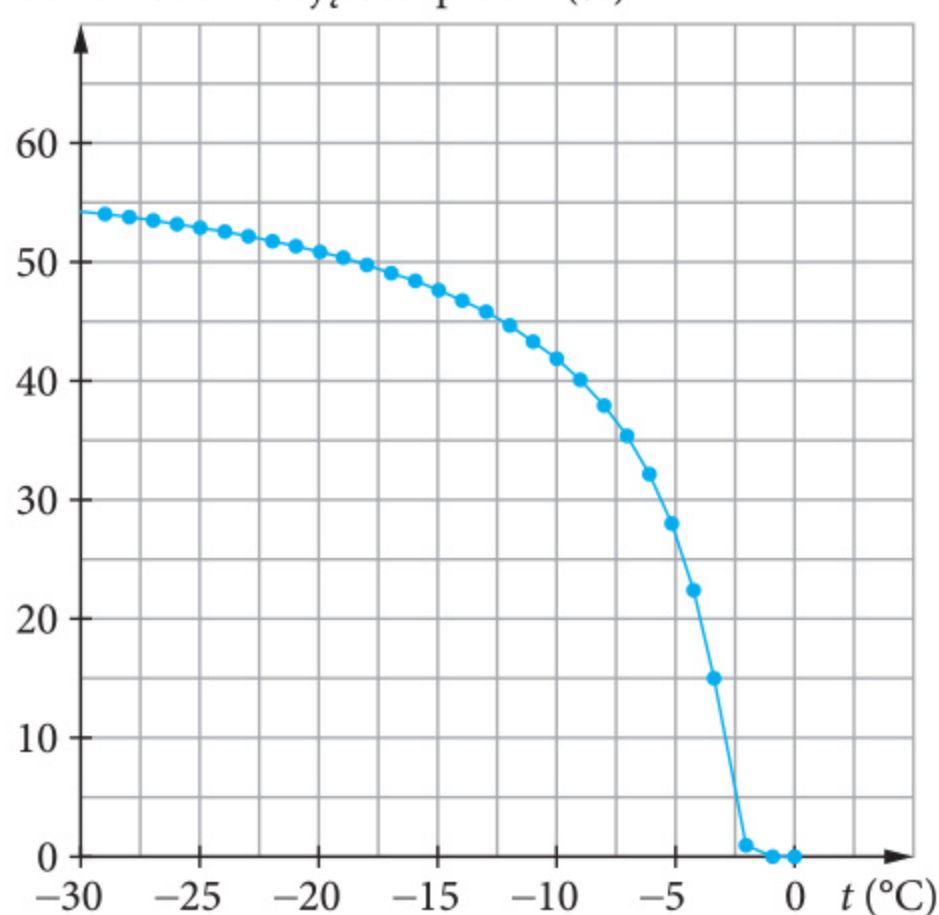
4. Niezamrożona papka. Składa się z wody, cukrów, białek oraz domieszki substancji smakowych i stabilizatorów. Nie zamarza całkowicie nawet w bardzo niskich temperaturach, co sprawia, że lody zachowują plastyczność i nie tworzą twardej, zmrożonej skorupy.

Ta niezamrożona papka potrzebuje naprawdę bardzo niskich temperatur, aby całkowicie zamarznąć. Obrazuje to poniższy wykres, z którego odczytać możemy, jaką objętość lodów stanowi lód. Jeżeli schłodzimy lody do temperatury $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, tylko 40 % ich objętości stanowić będzie lód. Reszta to niezamrożona „breja” wraz z powietrzem i domieszką tłuszczu. Nazwa „lody” może być zatem z tej perspektywy nieco myląca.

Z wykresu widać też, że lody zaczynają zamarzać nie w $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, jak to zwykła robić czysta woda, ale w około $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stąd już wylania się pierwszy ważny wniosek. Aby lody przetrwały w zamrażarce, nie wystarczy ich trzymać w byle jakiej temperaturze poniżej zera. Trzeba je schłodzić do temperatur niższych niż $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. A tak naprawdę i to nie wystarcza. Badania dowiodły bowiem, że najlepszą temperaturą do przechowywania lodów mlecznych są okolice $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wyższa temperatura sprawia, że tracą one swoją „kremowość” i aksamitną konsystencję. A razem z nimi spadają ich walory smakowe.

Skąd jednak wiemy, że temperatura $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ jest najlepsza? Z profesjonalnych badań naukowych! Kilka lat temu firma Nestlé zwróciła się do szwajcarskich fizyków z prośbą

udział lodu w objętości próbki (%)



Ryc. 1. Wykres obrazujący, jaką część deseru stanowi lód w zależności od temperatury. Dopiero poniżej $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lód zaczyna przeważać nad pozostałymi składnikami mieszaniny*

* źródło: B.R. Pinzer i in. *3D-characterization of three-phase systems using X-ray tomography: Tracking the microstructural evolution in ice cream* „Soft Matter”, sierpień 2012, s. 4584–4594.

o wyjaśnienie, jak to z tą temperaturą i lodami jest. Do pracy została zaprzęgnięta tomografia promieniowania X, nowoczesna technika pomiarowa, za pomocą której fizycy uzyskują trójwymiarowe „prześwietlenia” badanego przedmiotu i to na dodatek ze znakomitą rozdzielczością, pozwalającą dostrzec obiekty o wielkościach pojedynczych mikrometrów. W 2012 roku po raz pierwszy ta metoda została użyta do obserwacji gałki lodów, którą systematycznie prześwietlano w różnych temperaturach.

Eksperyment ten pozwolił stwierdzić, że poniżej $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ bąble powietrza i kryształki lodu mają bardzo nieregularne kształty, chropowate powierzchnie i kanciaste krawędzie. Całość układu jest na tyle dobrze zmrożona, że nawet po kilku miesiącach kształty oraz rozmiary kryształków i bąbli nie ulegają zmianie – czyli lody pozostają

tak samo smaczne. W temperaturze $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ bądź niższej mogą więc spokojnie przeleżeć cały sezon. Nie wszystkie domowe zamrażarki potrafią jednak tak mocno mrozić, co skutkuje powoli postępującymi niekorzystnymi przemianami przechowywanych w nich lodów. Już w temperaturach wyższych niż $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bąble powietrza zaczynają stawać się okrągłe. Spowodowane jest to wzrostem udziału niezamrożonej „brei”, przez co powietrze ma więcej swobody i może uformować okrągłe kształty. Takie bąbelki powoli przemieszczają się i łączą ze sobą w większe bąbliszczą. Tempo ich wzrostu jest bardzo powolne i w temperaturze $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ wynosi około 4 mikrometrów na godzinę. Niby niedużo, ale już jedna doba przechowywania lodów w takich warunkach powoduje wyraźną zmianę ich konsystencji.

Warunki przechowywania mają też wpływ na wielkość kryształków lodu. Podwyższając temperaturę, sprawiamy, że zaczynają się one częściowo topić, zmniejszają się i rozpadają na kawałki. Ale uwaga, gdy znów schłodzimy całość do bardzo niskiej temperatury, kryształki lodu nie powrócą do swojej pierwotnej wielkości. Będą większe i równocześnie będzie ich trochę mniej. Ten proces znany jest fizykom jako dojrzewanie Ostwalda i może spowodować, że lody stracą swoją kremową konsystencję, a pod językiem pocujemy grudki lub wrażenie piasku. Stąd wniosek, że im więcej wahań temperatury, tym szybszy wzrost wielkości kryształków lodu i tym więcej piasku na języku, czego raczej nikt nie lubi. Zatem, lodożerco, pamiętaj! Najlepiej przechowuj lody w zamrażarce trzymającej cały czas temperaturę około $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ lub niższą. Nie otwieraj jej zbyt często. Złym pomysłem jest również trzymanie lodów za oknem, nawet podczas bardzo silnych mrozów. Każda, nawet lekka, zmiana temperatury działa bowiem na ich niekorzyść. Podgrzewanie i ochładzanie lodów to największa zbrodnia, jaką możemy im wyrządzić, nawet jeżeli ma to miejsce grubo poniżej $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Michał Krupiński

(fragment artykułu opublikowanego w czasopiśmie „Neutrino”, Jesień 2018), nr 42

Pytania i zadania

1. Wymień cztery podstawowe składniki lodów śmietankowych.
2. Czy lody zamarzną w temperaturze $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$?
3. Jaką część lodów stanowi lód w temperaturze $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$?
4. O czym świadczy ziarnista struktura jedzonych lodów?
5. Amerykańska stacja naukowo-badawcza Amundsen-Scott znajduje się na Antarktydzie. Wyobraźmy sobie, że jeden z pracowników tej stacji twierdził, że można przechowywać lody na zewnątrz, w nasłonecznionym miejscu, gdyż temperatura i tak nie będzie większa od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Czy ten sposób przechowywania nie wpłynie na ich walory smakowe? Uzasadnij odpowiedź.

Drgania

ROZDZIAŁ 1. (s. 12)

1. a) $A = 1,5 \text{ cm}$, $T \approx 1,5 \text{ s}$
b) $f \approx 0,67 \text{ Hz}$
2. $t \approx 7,8 \text{ ms}$
3. a) $s = 3 \text{ cm}$
b) $t = 0,8 \text{ s}$
4. $f = 0,9 \text{ Hz}$
5. $v \approx 5 \text{ cm/s}$

ROZDZIAŁ 2. (s. 17)

1. a) $A = 1,6 \text{ cm}$, $F_{\text{max}} = 0,24 \text{ N}$
b) $a_{\text{max}} = 6 \text{ m/s}^2$
c) $k = 15 \text{ N/m}$
2. $1,8 \text{ s}$
3. Maksymalna wartość siły wzrośnie dwukrotnie.
4. A, C – największe, B – zero
5. Nie.

ROZDZIAŁ 3. (s. 24)

1. a) $A = 1,5 \text{ cm}$
b) $v \approx 0,24 \text{ m/s}$
c) $E_p \approx 0,2 \text{ mJ}$
2. a) $A = 2 \text{ cm}$
b) $E_k \approx 1,3 \text{ J}$
3. $E_p = 20 \text{ mJ}$
4. $v = 5 \text{ m/s}$
5. Wskazówka: zachodzą przemiany trzech rodzajów energii: sprężystości, grawitacji i kinetycznej.

ROZDZIAŁ 4. (s. 29)

1. $T = 1,2 \text{ s}$, nie zmieni się
2. Okres drgań Zosi będzie większy, bo odległość jej środka masy od punktu zaczepienia huśtawki jest większa.
3. $T \approx 13,7 \text{ s}$
4. Około 4 uderzenia na sekundę.
5. $v \approx 4,6 \text{ m/s}$, $W = E_{k\text{max}} \approx 212 \text{ J}$

ROZDZIAŁ 5. (s. 38)

2. Podczas postoju drgania były przekazywane od silnika do maskotki w wyniku zjawiska rezonansu.
3. Wcześniej zatrzyma się piłeczka do tenisa stołowego. Początkowo na oba przedmioty działają takie same siły oporu powietrza. Pod wpływem takiej samej siły obiekt o mniejszej masie zatrzyma się szybciej.
4. Kulka zawieszona na nici o długości 4,1 m.
5. około 0,13 Hz.

POWTÓRZENIE DZIAŁU DRGANIA (s. 42)

1. C
2. $f \approx 0,13 \text{ Hz}$
3. Zwrot w kierunku położenia równowagi, wartość wprost proporcjonalna do wychylenia.
4. a) $F_{\text{max}} = 0,3 \text{ N}$
b) $a_{\text{max}} \approx 2,1 \text{ m/s}^2$
5. B
6. A 2
7. 1 F, 2 P, 3 P
8. $f \approx 1,25 \text{ Hz}$
9. $T \approx 12 \text{ s}$
10. 1 F, 2 P, 3 P

Fale i optyka

ROZDZIAŁ 6. (s. 53)

1. a) Fala poprzeczna.
b) W dół.
2. a) Fala podłużna.
b) Wzdłuż sprężyny.
4. Nie, gdyż fale dźwiękowe rozchodzą się tylko w ośrodkach materialnych.
5. Nie, cząsteczki ośrodka poruszają się ruchem drgającym.

ROZDZIAŁ 7. (s. 58)

1. Daleko od brzegu.
2. W ołowiu.
3. a) $A \approx 1,6 \text{ cm}$, $\lambda \approx 8 \text{ cm}$
b) $v \approx 0,064 \text{ m/s}$
4. $t \approx 1,3 \text{ s}$
5. $v \approx 6,3 \text{ cm/s}$

ROZDZIAŁ 8. (s. 64)

1. Tysiące herców.
2. Od 0,017 m do 17 m.
3. Około 140 Hz.
5. Na przykład 330 Hz, 660 Hz, 550 Hz.

ROZDZIAŁ 9. (s. 72)

1. Nie, wysokość dźwięku w trakcie zbliżania oraz oddalania jest stała, bo zależy od obrotów silnika samochodu, a nie od jego odległości.
2. $f \approx 644 \text{ Hz}$
3. Nie, łódź płynąca pod wiatr kołysze się z większą częstotliwością.
4. Oddala się. $v \approx 1080 \text{ km/s}$
5. a) wskazania będą różne
b) 0 km/h, 60 km/h, 120 km/h,

ROZDZIAŁ 10. (s. 81)

2. Fale rozchodzą się niezależnie od siebie, każda z nakładających się fal zachowuje swoje własności.
3. $x = 4 \text{ mm}$
4. Nie.
5. Nie, bo powierzchnie falowe poniżej widocznej na rysunku linii są nadal liniami prostymi, czyli nie zmieniły kształtu.

ROZDZIAŁ 11. (s. 87)

3. Wzmacniają się w punktach A, C i D, wygaszają się w punktach B i E.
4. Wskazówka: muzyka składa się z dźwięków o wielu różnych częstotliwościach.
5. ok. 0,4 cm i 2 cm

ROZDZIAŁ 12. (s. 95)

1. Nie.
3. Na przykład dla światła żółtego o długości fali 600 nm odległość ta będzie wynosiła 300 nm.
4. Dla $\lambda = 400 \text{ nm}$, $f = 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, dla $\lambda = 700 \text{ nm}$, $f \approx 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$.
5. Z faktu, że można je spolaryzować.

ROZDZIAŁ 13. (s. 101)

1. Prostopadle.
2. 65°
5. $h \approx 4,6 \text{ m}$

ROZDZIAŁ 14. (s. 109)

3. Około 40° . Promień okręgu wykreślonego z punktu A jest tyle razy mniejszy od odległości CB, ile razy mniejsza jest prędkość światła w szkle od prędkości światła w powietrzu.

ROZDZIAŁ 15. (s. 114)

1. W całości: C i F, pozostałe częściowo.
4. Rybka będzie widziała dno (kąt jest większy od granicznego), a wędkarza zobaczy, gdy skieruje wzrok bardziej w górę.
5. B

ROZDZIAŁ 16. (s. 123)

1. Światło rozprasza się na kryształkach.
2. Po wschodniej stronie.
3. Powstaje nocą, gdy niebo zasnuwane jest wysokimi chmurami.
4. Niebieski.

POWTÓRZENIE DZIAŁU FALA I OPTYKA (s. 126)

1. A
2. Punkt K – w górę, punkt L – w górę, punkt M – w dół.
3. $f \approx 89 \text{ Hz}$
4. Nie, w sytuacji a) głośność byłaby większa, ponieważ do ucznia docierała fala ugięta na otworze drzwiowym oraz odbita od ściany, a w sytuacji b) nie byłoby fali odbitej.

- 5. Obszar A – tu spotyka się grzbiet jednej fali z doliną drugiej fali; obszar B – tu spotyka się dolina jednej fali z doliną drugiej fali oraz grzbiet jednej fali z grzbietem drugiej.
- 6. Światło odbite od części słomki znajdującej się pod wodą na granicy woda–powietrze zmienia kierunek rozchodzenia się na skutek załamania.
- 8. A 1
- 9. C
- 10. 1 P, 2 F, 3 P

Termodynamika

ROZDZIAŁ 17. (s. 137)

1. W gazach cząsteczki są daleko od siebie, więc nie oddziałują ze sobą. W cieczech są blisko siebie, więc się przyciągają lub odpychają, a jednocześnie wykonują drgania.
2. Wraz z temperaturą rośnie średnia wartość prędkości cząsteczek.
3. $t = -269\text{ }^{\circ}\text{C}$
4. Średnia energia kinetyczna jest taka sama, bo jest taka sama temperatura.
5. Średnia wartość prędkości cząsteczek azotu jest większa o 7 %, a różnica nie zależy od temperatury.

ROZDZIAŁ 18. (s. 143)

1. Nie, są większe. Filary nie są ogrzewane zimą, więc zmiany ich temperatury są większe.
2. Woda na krawędzi szyjki uszczelnia butelkę. Ogrzanie butelki powoduje wzrost objętości powietrza, które unosi monetę.
3. Pusta przestrzeń umożliwia bezpieczne rozszerzenie się paliwa.
4. $\Delta l \approx 16\text{ mm}$
5. Gdy temperatura przyrządu pomiarowego będzie znacznie odbiegać od podanej, odczyty będą obarczone większą niepewnością niż podana w świadectwie.

ROZDZIAŁ 19. (s. 150)

1. Izolatory, bo ciepło odpływa przez nie z ciała dużo wolniej niż przez przewodniki.
2. Górne, gdyż z powodu konwekcji im wyżej, tym cieplejsze powietrze.
3. W ciałach stałych cząsteczki nie mogą przemieszczać się swobodnie, a to jest warunkiem zachodzenia konwekcji.
4. Karoseria w przeciwieństwie do powietrza pochłania promieniowanie słoneczne.

ROZDZIAŁ 20. (s. 157)

1. $\Delta E_w = 21\text{ J}$
2. Powoli. Z powietrza musi odpłynąć ciepło.
3. maleje.
4. $m \approx 2400\text{ t}$
5. $Q = 170\text{ kJ}$

ROZDZIAŁ 21. (s. 163)

1. Blaszany kubek ma małą pojemność cieplną w porównaniu z herbatą oraz blacha dobrze przewodzi ciepło.
2. $m = 1,5\text{ kg}$
3. $t \approx 20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
4. Grube mury mają dużą pojemność cieplną.
5. Ściana z betonu.

ROZDZIAŁ 22. (s. 170)

1. Lody to przede wszystkim woda, a woda ma duże ciepło topnienia. Potrzeba zatem sporo czasu, aby dostarczyć do lodów energię niezbędną do ich stopienia.

2. Ciepło oddane przez 1 kg wody podczas krzepnięcia jest około 8 razy większe od ciepła potrzebnego do ochłodzenia 1 kg wody od temperatury 10 °C do temperatury 0 °C.
3. Było 0 °C, gdyż mieszanina lodu i wody, która powstała w wyniku jego stopienia, ma zawsze taką temperaturę.
4. Energia pobrana podczas ogrzewania wody do temperatury wrzenia jest około 1,3 razy większa niż energia potrzebna do stopienia takiej samej masy lodu.
5. Nie stopią się. Podczas kontaktu z ciekłą cyną ołów nie ogrzeje się do temperatury topnienia.

ROZDZIAŁ 23. (s. 177)

1. W wilgotnym powietrzu woda znajdująca się na powierzchni skóry wolniej paruje.
2. Woda parująca z powierzchni skóry pobiera energię i powoduje uczucie chłodu.
3. Około 6,8 razy.
4. Odparuje część wody.
5. $m_p \approx 0,48 \text{ kg}$

ROZDZIAŁ 24. (s. 185)

1. Dach uniemożliwia oddawanie ciepła przez konwekcję.
2. Bardziej skuteczne są żaluzje zewnętrzne. Wewnętrzne również pochłaniają promieniowanie słoneczne, ale oddają ciepło głównie do wewnątrz.
3. Słabsze, bo nie będzie efektu cieplarnianego.
4. $m_p \approx 3 \text{ g}$
5. $t \approx 64,7 \text{ °C}$

ROZDZIAŁ 25. (s. 193)

1. $d \approx 0,998 \text{ kg/dm}^3$
2. Około 80 %.
3. Około 2000 hPa.
4. Mont Blanc – ok. 84 °C, Mount Everest – ok. 72 °C.
5. Wysoka wilgotność uniemożliwia odparowanie potu i może nastąpić przegrzanie organizmu.

POWTÓRZENIE DZIAŁU TERMODYNAMIKA (s. 196)

1. C
2. Wyżej podniesie się poziom wody w rurce butelki B. Jednakowa zmiana objętości wody w obu butelkach spowoduje większy wzrost poziomu wody w rurce o mniejszym polu powierzchni przekroju poprzecznego.
3. B 2
4. Człowiek pochłania promieniowanie.
5. A
6. Około 35 ml.
7. 1 F, 2 P, 3 P
8. $m_p \approx 4 \text{ g}$
9. $m_1 \approx 30 \text{ g}$
10. D

Tabela 1. Stałe fizyczne i astronomiczne

prędkość światła w próżni	$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
przyspieszenie ziemskie	$g \approx 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Tabela 2. Przedrostki do wielokrotności i podwielokrotności jednostek

Przedrostek	Skrót	Mnożnik
peta	P	$10^{15} = 1\,000\,000\,000\,000\,000$
tera	T	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$
giga	G	$10^9 = 1\,000\,000\,000$
mega	M	$10^6 = 1\,000\,000$
kilo	k	$10^3 = 1000$
hekto	h	$10^2 = 100$
deka	da	$10^1 = 10$
–	–	$10^0 = 1$
decy	d	$10^{-1} = 0,1$
centy	c	$10^{-2} = 0,01$
mili	m	$10^{-3} = 0,001$
mikro	μ	$10^{-6} = 0,000\,001$
nano	n	$10^{-9} = 0,000\,000\,001$
piko	p	$10^{-12} = 0,000\,000\,000\,001$
femto	f	$10^{-15} = 0,000\,000\,000\,000\,001$

Tabela 3. Własności fizyczne substancji w warunkach normalnych
(gęstości i temperatura wrzenia podane są dla ciśnienia atmosferycznego)

Substancja	Gęstość $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	Ciepło właściwe $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$	Temperatura topnienia ($^\circ\text{C}$)	Ciepło topnienia $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right)$	Temperatura wrzenia ($^\circ\text{C}$)	Ciepło parowania $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right)$	Prędkość dźwięku $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$	Współczynnik załamania światła
aluminium	2700	900	660	400 000	2270		5100	
alkohol etylowy	800	2400	-114	105 000	78,4	844 000	1160	1,36
benzyna	700	2100	-150		60-120		1160	
beton	1800-2400	840					3800	
cyna	7300	220	232	59000	2430			
drewno	500-800	1500-2400					3700-4800	
dwutlenek węgla	1,98	840					260	
lód	900	2100	0	340 000	100		3230	1,31
miedź	8900	380	1080	210 000	2350		3900	
oliwa	920	2200						1,47
ołów	11300	130	327	30 000	1750		1300	
parafina (ciało stałe)	900	1800	ok. 50	150 000	300			

Substancja	Gęstość $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	Ciepło właściwe $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$	Temperatura topnienia $(^\circ\text{C})$	Ciepło topnienia $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right)$	Temperatura wrzenia $(^\circ\text{C})$	Ciepło parowania $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right)$	Prędkość dźwięku $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$	Współczynnik załamania światła
piasek suchy	1500	880	1200–1300					
powietrze	1,29	ok. 1020	ok. –210		ok. –190	200 000	340	1,0003
rteć	13 600	130	–39	11 000	357	290 000		
srebro	10 500	250	960	110 000	2200			
szkło	2500–2900	820					4000–5500	1,5–1,7
szkło akrylowe (pleksi)	1200	2400						1,5
woda	1000	4200	0	340 000	100	2 260 000	1460	1,33
złoto	19 300	130	1063	63 000	2700			
żelazo	7800	460	1530	270 000	3000		5020	

A

adiabatyczny proces [*adiabatic process*] 150
amortyzator [*shock-absorber*] 32
amplituda [*amplitude*] 7, 52

B

barwa dźwięku [*timbre*] 60
bilans cieplny [*heat balance*] 156, 174
bimetal [*bimetallic strip*] 138

C

całkowite wewnętrzne odbicie [*total internal reflection*] 108
ciepło [*heat*] 141, 143, 148
ciepło parowania [*specific heat of vaporization*] 170
ciepło topnienia [*specific heat of fusion*] 163
ciepło właściwe [*specific heat*] 154
ciśnienie [*pressure*] 150, 185
częstotliwość [*frequency*] 7, 53, 65
częstotliwość dźwięku [*sound wave frequency*] 59, 60
częstotliwość światła [*light wave frequency*] 90
częstotliwość własna [*natural frequency*] 33

D

decybel [*decibel*] 61
długość fali [*wavelength*] 52, 88, 90
doświadczenie Younga [*Young's double-slit experiment*] 87
drżania [*oscillations*] 6
drżania tłumione [*damped oscillations*] 30–31
drżania wymuszone [*forced oscillations*] 32
dyfrakcja [*diffraction*] 72, 73
dyfuzja [*diffusion*] 129

E

echolokacja [*echolocation*] 78
efekt cieplarniany [*greenhouse effect*] 176
energia grawitacji [*gravitational energy*] 21, 27
energia kinetyczna [*kinetic energy*] 19, 130
energia mechaniczna [*mechanical energy*] 20, 27
energia potencjalna [*potential energy*] 18, 21
energia sprężystości [*elastic energy*] 18
energia wewnętrzna [*internal energy*] 131, 147

F

fala dźwiękowa [*sound wave*] 46, 58
fala elektromagnetyczna [*electromagnetic wave*] 89
fala kulista [*spherical wave*] 46, 78, 92
fala płaska [*flat wave*] 47, 74
fala podłużna [*longitudinal wave*] 48

fala poprzeczna [*transverse wave*] 48
fala spolaryzowana [*polarized wave*] 91
fala stojąca [*standing/stationary wave*] 83
fale sejsmiczne [*seismic waves*] 55

G

gazy cieplarniane [*greenhouse gases*] 177
głośność dźwięku [*intensity of sound*] 59

H

halo [*halo*] 115

I

infradźwięki [*infrasounds*] 59
interferencja [*interference*] 81, 88
izolator cieplny [*thermal insulator*] 142

K

kąt graniczny [*critical angle*] 108
kąt odbicia [*angle of reflection*] 96
kąt padania [*angle of incidence*] 96
kąt załamania [*angle of refraction*] 102, 104
konwekcja [*convection*] 143
krzepnięcie [*freezing/solidification*] 160, 162

M

mikrofale [*microwaves*] 89
miraż [*mirage*] 117

N

nadfiolet [*ultraviolet*] 89, 90

O

obraz pozorny [*virtual image*] 96, 98
odbicie światła [*reflection of light*] 94, 96
odkształcenie [*deformation*] 13, 18
okres [*period*] 7, 16, 26, 54

P

para nasycona [*saturated vapor*] 184
para wodna [*water vapor*] 161, 183
parowanie [*vaporization*] 160, 167
podczerwień [*infrared*] 89, 145
pojemność cieplna [*heat capacity*] 157
polaryzacja [*polarization*] 90, 91
polaryzator [*polarizer*] 91
położenie równowagi [*equilibrium position*] 7
powierzchnia falowa [*wavefront*] 46, 52
poziom natężenia dźwięku [*sound intensity level*] 61
praca [*work*] 147, 151
prawo odbicia [*law of reflection*] 96
prawo załamania [*law of refraction*] 104

prędkość [*velocity*] 52
 prędkość dźwięku [*speed of sound*] 56, 58
 prędkość fali [*wave speed*] 52, 65, 100
 prędkość światła [*light speed*] 88, 89
 promieniowanie [*radiation*] 88, 144
 promieniowanie gamma [*gamma rays*] 88
 promieniowanie rentgenowskie [*X-rays*] 88
 promień światła [*a ray of light*] 90, 96
 próg bólu [*threshold of pain*] 61
 próg słyszalności [*threshold of audibility*] 61
 pryzmat [*prism*] 106, 109, 110
 przewodnictwo cieplne [*conduction of heat*] 140
 przewodnik cieplny [*thermal conductor*] 142

R

radar [*radar*] 67
 radioteleskop [*radiotelescope*] 89
 reflektor [*reflector*] 97
 refrakcja astronomiczna [*astronomical refraction*] 118
 resublimacja [*resublimation*] 160
 rezonans [*resonance*] 33
 rozpraszanie fal [*scattering of waves*] 78
 rozpraszanie światła [*scattering of light*] 92, 114
 rozszerzalność cieplna [*thermal expansion*] 134
 ruch drgający [*oscillation*] 6
 ruch harmoniczny [*harmonic motion*] 9, 14

S

siatka dyfrakcyjna [*diffraction grating*] 89
 siła wypadkowa [*net force*] 14
 skala Celsjusza [*Celsius temperature scale*] 130
 skala Kelvina [*Kelvin temperature scale*] 130
 skraplanie [*condensation*] 160, 172
 sprężystość [*elasticity*] 13
 stan równowagi termodynamicznej [*thermal equilibrium*] 141
 stany skupienia materii [*phases of matter*] 160
 sublimacja [*sublimation*] 160
 substancje bezpostaciowe (amorficzne) [*amorphous solids*] 166
 substancje krystaliczne [*crystalline solids*] 162

Ś

światło [*light*] 87, 114
 światło spolaryzowane [*polarized light*] 91
 światłowód [*optical fiber*] 110

T

temperatura [*temperature*] 130
 temperatura topnienia [*melting point*] 161
 temperatura wrzenia [*boiling point*] 169, 185
 termodynamika [*thermodynamics*] 126
 tęczą [*rainbow*] 115
 topnienie [*melting*] 160, 163

U

układ izolowany [*isolated system*] 149
 ultradźwięki [*ultrasound*] 59
 ultrasonograf [*ultrasound scanner*] 67

W

wahadło [*pendulum*] 25
 wahadło Foucaulta [*Foucault pendulum*] 27
 wahadło torsyjne [*torsion pendulum*] 23
 wartość energetyczna paliwa [*energy content of fuel*] 152
 wilgotność powietrza [*humidity*] 184
 wrzenie [*boiling*] 169
 współczynnik rozszerzalności liniowej [*coefficient of linear expansion*] 136
 współczynnik sprężystości [*spring constant*] 13, 16, 18
 współczynnik załamania światła [*index of refraction*] 104
 wychylenie [*displacement*] 7, 14
 wysokość dźwięku [*pitch of sound*] 60

Z

załamanie światła [*refraction of light*] 100
 zasada dynamiki [*law of motion*] 13, 15
 zasada superpozycji [*superposition principle*] 75
 zasada termodynamiki [*law of thermodynamics*] 148
 zasada zachowania energii [*the principle of conservation of energy*] 22, 147, 156
 zero bezwzględne [*absolute zero*] 130
 zjawisko Dopplera [*Doppler effect*] 64
 zwierciadło [*mirror*] 94, 96

Ź

źródło dźwięku [*source of sound*] 59
 źródło fali [*source of the wave*] 44, 63

Źródła ilustracji i fotografii

Okladka: (niebo) ml1413/Shutterstock.com, (samochód) Tony Vingerhoets/Alamy Stock Photo/BE&W

Tekst główny: s. 13 (kulka na sprężynie); s. 14 (plastelina na linijce); s. 16 (kulka na sprężynie); s. 19 (kulki na sprężynach); s. 20 (wózek na sprężynie); s. 21 (ciężarek na sprężynie); s. 23 (działanie wahadła torsyjnego); s. 25 (wahadło); s. 32 (amortyzator); s. 33 (wahadła); s. 34 (ciężarek w wodzie na sprężynie); s. 36–37 (zbiorniki z wodą), (infografika); s. 41 (ciężarek na sprężynie); s. 45 (fala na sznurze); s. 46 (fala rozchodząca się w prawo), (rozchodzenie się fali kołowej); s. 47 (mechanizm powstawania fali płaskiej); s. 48 (fala poprzeczna), (fala podłużna na sprężynie); s. 49 (fale na wodzie); s. 50 (fala dźwiękowa); s. 51 (sznur z koralikami), (fala na sprężynie); s. 52 (fala poprzeczna); s. 53 (fala dźwiękowa); s. 54 (przemieszczanie fali); s. 55 (fale Love'a), (fale Rayleigha), (fale sejsmiczne objętościowe); s. 57 (koraliki na sznurze); s. 58 (fala dźwiękowa); s. 63 (fala od nieruchomego źródła); s. 64 (fala od poruszającego się źródła); s. 65 (fala dźwiękowa ze statku); s. 66 (fala dźwiękowa odbita od góry); s. 68–69 (powstawanie fali uderzeniowej), (obserwacja fali uderzeniowej), (infografika); s. 71 (radar policyjny); s. 74 (dyfrakcja na szczelinie); s. 76 (wzmocnienie fali); s. 77 (wygaszenie fali); s. 78 (echolokacja); s. 79 (fala paska); s. 81 (mechanizm nakładania się fal); s. 83 (fala stojąca); s. 87 (doświadczenie Younga); s. 88–89 (infografika fale elektromagnetyczne); s. 90 (barwy światła); s. 91 (mechanizm polaryzacji); s. 92 (rozpraszanie światła); s. 95 (odbicie światła laserowego); s. 96 (prawo odbicia); s. 97 (reflektor); s. 98 (powstawanie obrazu w zwierciadle), (mechanizm odbicia); s. 99 (nurek pod wodą); s. 101 (załamanie fali); s. 102 (załamanie w zależności od kąta padania), (światło lasera w akwarium); s. 103 (ołów w wodzie); s. 104 (prawo załamania); s. 105 (bieg promieni przy przejściu woda-powietrze), (załamanie w szklanym prostokącie); s. 106 (pryzmat); s. 107 (akwarium); s. 108 (odbicie i załamanie); s. 109 (promienie w pryzmacie); s. 110 (lornetka), (bieg promieni w światłowodzie); s. 112 (promienie na granicy ośrodków), (światłowód), (pryzmat); s. 114 (rozpraszanie w atmosferze); s. 116 (powstawanie tęczy); s. 117 (powstawanie mirażu); s. 123 (uczeń na korytarzu); s. 124 (litera F przed lustrem); s. 126 (siły międzycząsteczkowe); s. 127 (budowa cząsteczkowa) (infografika); s. 128 (infografika); s. 129 (mechanizm dyfuzji); s. 138 (bimetal); s. 140 (przekaz ciepła); s. 144 (konwekcja na plaży); s. 149 (sprężanie i rozprężanie gazu); s. 151 (przepływ energii w lodowce), (tłok silnika); s. 160 (zmiany stanów skupienia); s. 162 (mechanizm topnienia); s. 167 (cząsteczki przy powierzchni cieczy); s. 176 (efekt cieplarniany); s. 177 (efekt cieplarniany Ziemi); s. 178–179 (wykres temperatury), (infografika); s. 186 (szybkowar); s. 187 (przekrój gejzera); s. 197 (akwarium); s. 198 (fala w zbiorniku z wodą); s. 202 (fala w rurce); s. 204 (barwy światła), (czułość czopków); s. 207 (system RGB), (składanie barw)

Autor: Stefan Drewiczewski

s. 5 (perkusista) PV productions/Shutterstock.com; s. 6 (bęben) FreeProd33/Shutterstock.com, (dziecko na koniku sprężynowym) Pavel Kobyshev/Shutterstock.com, (zrzut ekranu programu Tracker) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 7 (spławik) Sashkin/Shutterstock.com; s. 9 (huśtawka ekstremalna) IrkuIrku/iStockphoto/Getty Images; s. 10 (drgająca struna) Joshua David Treisner/Shutterstock.com; s. 13 (ręka ze sprężyną) Neliubov/Shutterstock.com, (kulka) 123dartist/Shutterstock.com; s. 14 (plastelina) Ekaterina Minaeva/Shutterstock.com; s. 16 (kulka) 123dartist/Shutterstock.com; s. 17 (drgające struny gitary) DK Media/iStockphoto/Getty Images; s. 18 (matka z córką) fizkes/Shutterstock.com; s. 19 (kulka) 123dartist/Shutterstock.com; s. 21 (plastelina na linijce) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 22 (kulki) 123dartist/Shutterstock.com, (zegar z wahadłem torsyjnym) Photographer/Shutterstock.com; s. 24 (chłopiec na drążku pogo) RubberBall/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 25 (dziewczynka na huśtawce) MorganStudio/Shutterstock.com, (kulka) 123dartist/Shutterstock.com; s. 26 (zegar wahadłowy) Anton Starikov/Shutterstock.com, (bombka na gałęzi) dekede/Shutterstock.com; s. 27 (wahadło Foucaulta) ELEPHOTOS/Shutterstock.com; s. 28 (kobieta na huśtawce) Ljupco Smokovski/Shutterstock.com; s. 29 (kołyska Newtona) Digital Genetics/Shutterstock.com; s. 30 (kobieta z liniami) Jacob Lund/Shutterstock.com, (zrzut ekranu programu Tracker) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 32–33 (One Wall Centre) Gunter Marx/Alamy Stock Photo/BE&W, (Tajpej 101) cooleo/Shutterstock.com, (kula w Tajpej 101) John Henshall/Alamy Stock Photo/BE&W, (najwyższe budynki świata) Jozsef Bagota/Shutterstock.com, (ludzie na Grand Canyon Skywalk) National Geographic Image Collection/Alamy Stock Photo/BE&W, (Grand Canyon Skywalk) Stanislav Beloglazov/Shutterstock.com, (Millenium Bridge – detal) Stuart Robertson/Alamy Stock Photo/BE&W, (Millenium Bridge – całość) Rebus/Shutterstock.com, (linie wysokiego napięcia) Roger Bamber/Alamy Stock Photo/BE&W, (absorber drgań na liniach) Chirachai Phitayachamrat/Shutterstock.com; s. 34 (rower) Gena73/Shutterstock.com; s. 35 (kulki) Africa Studio/Shutterstock.com; s. 36 (kulka), (spray) Africa Studio/Shutterstock.com; s. 37 (Jaime Vendera) Imaginichina Limited/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 43 (fala) EpicStockMedia/Shutterstock.com; s. 44 (fala) EpicStockMedia/Shutterstock.com; s. 46 (fala kołowa na wodzie) MSVIVIENNE/Shutterstock.com; s. 47 (grzebień na wodzie) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP, (fala na morzu) kwest/Shutterstock.com; s. 48 (sprężynka slinky) shiva3d/Shutterstock.com; s. 58 (fale) K303/Shutterstock.com; s. 59 (spławik) JUMBORUSHI/Shutterstock.com; s. 50 (głośniki) Yellow Cat/Shutterstock.com; s. 51 (fala na powierzchni wody) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 52 (brzeg morza) RandomLightsPhotography/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 53 (głośnik) Yellow Cat/Shutterstock.com, (fala na powierzchni wody); s. 55 (kula ziemiska) Lightspring/Shutterstock.com; s. 58 (ludzie grający na instrumentach) Stokkete/Shutterstock.com, (głośnik) Erik Svoboda/Shutterstock.com; s. 60 (obrazy oscyloskopowe) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 63 (karetka) OgnjenO/Shutterstock.com, (motocyklista) AAR Studio/Shutterstock.com, (wskazujący mężczyzna) Viorel Sima/Shutterstock.com; s. 64 (dziewczynka) mimagephotography/Shutterstock.com, (motocyklista) AAR Studio/Shutterstock.com, (wskazujący mężczyzna) Viorel Sima/Shutterstock.com; s. 65 (statek) Starkoff/Shutterstock.com, (góra lodowa) Macrovector/Shutterstock.com; s. 66 (statek) Starkoff/Shutterstock.com, (góra lodowa) Macrovector/Shutterstock.com; s. 67 (policjant z radarem) bibiphot/Shutterstock.com, (radar wojskowy) Aigars Reinholds/Shutterstock.com, (laptop) Chuenmanuse/Shutterstock.com, (zdjęcie USG) Flowersandtraveling/Shutterstock.com; s. 68–69 (motorówka na wodzie) tsarevv/Shutterstock.com, (łabędzie) PAN Michal/Shutterstock.com, (wskazujący mężczyzna) Viorel Sima/Shutterstock.com, (concorde) John Selway/Shutterstock.com, (idący mężczyzna) Ljupco Smokovski/Shutterstock.com, (dziewczynka) mimagephotography/Shutterstock.com, (samolot ponaddźwiękowy) ENS John Gay/U.S. Department of Defense, (lejący pocisk) SDL/Science Photo Library/East News; s. 71 (galaktyka M104) NASA/ESA and The Hubble Heritage Team; s. 72 (kamienie na rzece) BBA Photography/Shutterstock.com, (okręgi na wodzie) luckypic/Shutterstock.com; s. 73 (dyfrakcja w warunkach naturalnych) Roberto Lo Savio/iStock/GettyImages Plus, (doświadczenie szkolne) ALM/Science Photo Library/East News; s. 75 (dyfrakcja na przeszkodzie)

Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 77 (rozpraszanie w wanie z wodą) Wojciech Wójtowicz/WSiP, (kamień w jeziorze) Kayla's Creations/Shutterstock.com; s. 78 (nietoperz) Nuwat Phansuwan/Shutterstock.com, (ćma) Paweł Kielpiński/Shutterstock.com; s. 79 (fala na wodzie) Piotr Kubat/WSiP; s. 80 (trójkąt na wodzie) Stefan Kaben/Alamy Stock Photo/BE&W, (fale od dwóch źródeł), (fale po przejściu przez szczeliny) Grzegorz Wojewoda/WSiP; s. 81 (interferencja fal o różnych długościach) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 82 (fala stojąca) ALM/Science Photo Library/East News; s. 87 (figury Chladniego) Ted Kinsman/Science Source/BE&W; s. 88 (interferencja fal na wodzie) Grzegorz Wojewoda/WSiP, (nagłośnienie na koncercie) Arthur Matsuo/Shutterstock.com; s. 89 (kobieta w okularach) Diana Grytsku/Shutterstock.com, (prążki na ekranie) Aleksandr Berdnikov/MIT; s. 90 (prążki na ekranie); s. 90–91 (beczka) Dirk Ercken/Shutterstock.com, (RTG czaszki) itsmejst/Shutterstock.com, (solarium) Piotr Latacha/Shutterstock.com, (pilot) rangizzz/Shutterstock.com, (obiektyw) igorlale/Shutterstock.com, (ogień) LianeM/Shutterstock.com, (radar policyjny) John Roman Images/Shutterstock.com, (kobieta rozmawiająca przez telefon) Yuri Shevtsov/Shutterstock.com, (telewizor) Franck Boston/Shutterstock.com, (radioteleskop) cbpix/Shutterstock.com; s. 93 (okulary polaryzacyjne) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 94 (ekran kalkulatora widziany przez okulary polaryzacyjne) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP, (bańki mydlane) Maheshdethliya/Shutterstock.com; s. 96 (wieżowce) Baturina Yuliya/Shutterstock.com, (szklanka) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 97 (łódka na wodzie) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 99 (kobieta w lustrze) David Pereiras/Shutterstock.com; s. 101 (płetwonurek) ostill/Shutterstock.com; s. 102 (zachód słońca w kuli) Pat_Hastings/Shutterstock.com, (szklanka z ołówkiem) Pat_Hastings/Shutterstock.com; s. 104 (laser w akwarium) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 105 (mężczyzna w okularach) Samborskyi/Shutterstock.com, (ludzie w basenie) Nomad_Soul/Shutterstock.com; s. 106 (ryba) Nosyrevy/Shutterstock.com, (mężczyzna) spaxiax/Shutterstock.com, (łowiący niedźwiedź) Wirestock Creators/Shutterstock.com; s. 110 (rafa koralowa) Vlad61/Shutterstock.com; s. 109 (laser) GIPhotoStock/SCIENCE SOURCE/BE&W, (kobieta) mimagephotography/Shutterstock.com; s. 112 (przekrój lornetki) Dimedrol68/Shutterstock.com, (szklane światłowodów) Steve Collender/Shutterstock.com, (przekrój przewodu) Sashkin/Shutterstock.com; s. 113 (operacja laparoskopowa) ROMSVETNIK/Shutterstock.com; s. 115 (biedronka) irin-k/Shutterstock.com, (mężczyzna) spaxiax/Shutterstock.com; s. 116 (podwójna tęcza) Jeff Stamer/Shutterstock.com, (mężczyzna w okularach) Roman Samborskyi/Shutterstock.com, (mężczyzna patrzący w górę) Carbonell/Shutterstock.com; s. 117 (białe chmury) Pakhnyushchy/Shutterstock.com, (pomarańczowe chmury) Jakub Barzycki/Shutterstock.com, s. 118 (tęcza) bogdanionescu/Shutterstock.com, (halo) Sanatana/Shutterstock.com; s. 119 (dziewczyna) mimagephotography/Shutterstock.com; 120 (miraż) Kent Wood/Science Source/BE&W, (niebieski samochód) Leonidas/Shutterstock.com, (pomarańczowy samochód) Rawpixel.com/Shutterstock.com; s. 121 (Ziemia) ixpert/Shutterstock.com, (palma) n_eri/Shutterstock.com, (wskazujący mężczyzna) Viorel Sima/Shutterstock.com; s. 122 (zachodzące słońce) Vahan Abrahamyan/Shutterstock.com, (Ziemia) Lightspring/Shutterstock.com; s. 123 (halo) Roman Mikhailiuk/Shutterstock.com; s. 126 (głośnik) Yellow Cat/Shutterstock.com; s. 129 (ognisko na śniegu) DMITRII STARTCEV/Shutterstock.com; s. 130 (nawilżacz powietrza) Falon Koontz/Shutterstock.com; s. 131 (gotująca się woda) Roman Sigaev/Shutterstock.com, (łyżeczka z solą) rocharibeiro/Shutterstock.com, (balon) Chris Gorgio/iStock/Getty Images Plus, (krople wody) aodaodaodaod/Shutterstock.com; s. 132 (Ziemia) Lightspring/Shutterstock.com, (ziarnka piasku) Bildagentur Zoonar GmbH/Shutterstock.com, (pojedyncze ziarnko) Bildagentur Zoonar GmbH/Shutterstock.com; s. 133 (dyfuzja etap I i etap II) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 136 (miska z wodą) stopabox/Shutterstock.com, (szklanka z wodą) Sergii Tverdokhlibov/Shutterstock.com; s. 138 (tory) designbydx/Shutterstock.com, (termometr) Jiri Hera/Shutterstock.com; s. 139 (zbiornik na gaz) Henk Hulshof/iStockphoto/Getty Images; s. 140 (szczelina dylatacyjna) marekulasz/Shutterstock.com, (łożyska pod mostem) Grażyna Bryk/WSiP; s. 141 (tory tramwajowe) Piotr Januszewski; s. 142 (koła zębate) Stanislav Makhalov/Shutterstock.com, (termometr) Olga Popova/Shutterstock.com; s. 143 (zbiornik paliwa) bjdlsx/iStockphoto/Getty Images; s. 144 (balon latający) Sergii Petruk/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 145 (palnik z drutem) JMA/Science Photo Library/East News; s. 146 (aerożel) NASA Image Collection/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 147 (lampa lawa) Jakub Wierzbicki/Shutterstock.com; s. 148 (bałtycka plaża) Eselena/Shutterstock.com; s. 149 (promiennik) Maxx-Studio/Shutterstock.com, (ludzie przy ognisku) EZ-Stock Studio/Shutterstock.com; s. 151 (elektrownia) Rudmer Zwerver/Shutterstock.com; s. 152 (samochód wyścigowy) Alfio Finocchiaro/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 154 (góra) Pierluigi.Palazzi/Shutterstock.com; s. 155 (łodówka) Nitesh kumar Verma/Shutterstock.com; s. 158 (czajnik) B.A.E. Inc./Alamy Stock Photo/BE&W; s. 158 (droga) Checubus/Shutterstock.com; s. 162 (kubek papierowy) Andrey Zhar/Shutterstock.com, (świeczka) cosma/Shutterstock.com, (wykresy) źródło danych: ICM; s. 164 (lodowe rożki) Foxys Forest Manufacture/Shutterstock.com, (lód) penguini/Shutterstock.com, (woda) penguini/Shutterstock.com, (para) Trifonenko Ivan/Shutterstock.com; s. 165 (oszlone liście) Maslov Dmitry/Shutterstock.com, (szadź) kardosildistock/Shutterstock.com, (szklanka) penguini/Shutterstock.com, (termometr) Aleksandra Budzinskaia/Shutterstock.com; s. 168 (odlewanie metalu) PAP/Maciej Kulczyński; s. 169 (powierzchnia wulkanu) Ray Wise/Moment RF/Getty Images; s. 171 (parujący kubek) AlexMaster/Shutterstock.com, (szklanka z wodą) horiyan/Shutterstock.com; s. 172 (termometry) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 173 (tenisista) Robert J. Gatto/Shutterstock.com, (kot) Alena Haurlyk/Shutterstock.com, (gotująca się woda) Roman Sigaev/Shutterstock.com; s. 176 (namiot na polanie) acarapi/Shutterstock.com; s. 178 (szklarnia) CreativeMedia.org.uk/Shutterstock.com; s. 181 (Ziemia) Lightspring/Shutterstock.com; s. 182–183 (mamuty) Warpaint/Shutterstock.com, (lawa) Wead/Shutterstock.com, (dinozaur) mehta1819/Shutterstock.com, (Ziemia) Lightspring/Shutterstock.com; s. 184 (powierzchnia Wenus) Prihodko/Sputnik/East News; s. 186 (góra lodowa) TRphotos/Shutterstock.com; s. 187 (kra na wodzie) Danita Delmont/Shutterstock.com, (mgła) Efimenko Alexander/Shutterstock.com; s. 191 (gejzer) Edward Fielding/Shutterstock.com, (wskazujący mężczyzna) Viorel Sima/Shutterstock.com; s. 192 (szron na trawie) Sergey Chervakov/Shutterstock.com; s. 195 (szalka z wodą) Anton Stariakov/Shutterstock.com; s. 196 (butelka) ampFotoStudio/Shutterstock.com, (szklana rurka) gloverk/Shutterstock.com; s. 220 (widmo świetłówki) Ariel Majchel, (telewizor) Ruslan Ivantsov/Shutterstock.com; s. 223 (lody w misce) stockcreations/Shutterstock.com, (płatki śniegu) KENNETH LIBBRECHT/SCIENCE PHOTO LIBRARY

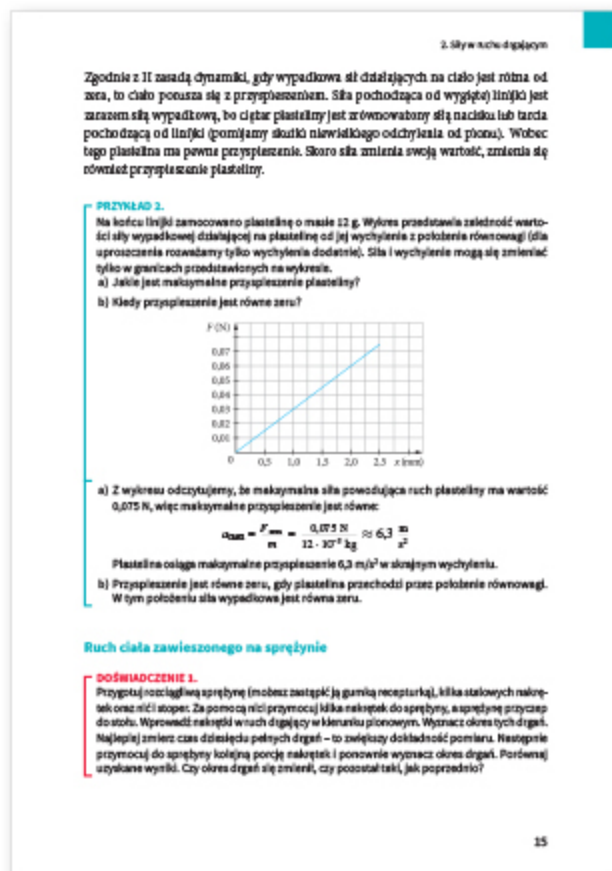
Pozostałe ilustracje: TomMaster Studio

Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne oświadczają, że podjęły starania, mające na celu dotarcie do właścicieli i dysponentów praw autorskich wszystkich zamieszczonych utworów. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, przytaczając w celach dydaktycznych utwory lub fragmenty, postępują zgodnie z art. 27¹ ustawy o prawie autorskim. Jednocześnie Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne oświadczają, że są jedynym podmiotem właściwym do kontaktu autorów tych utworów lub innych podmiotów uprawnionych w wypadkach, w których twórcy przysługuje prawo do wynagrodzenia.

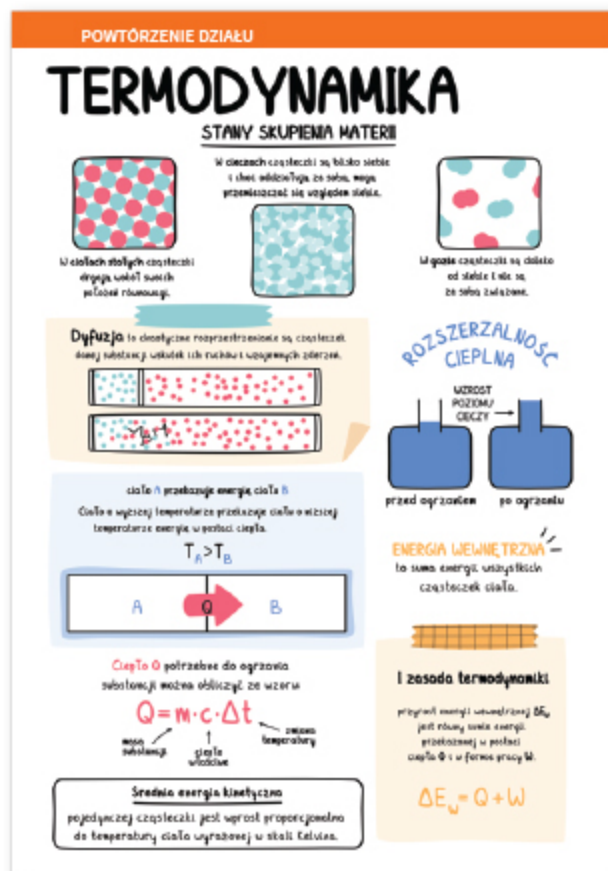
FIZYKA

ZAKRES PODSTAWOWY

NOWA EDYCJA PODRĘCZNIK • LICEUM I TECHNIKUM



Proste **doświadczenia** i rozwiązane **przykłady** pomagają w samodzielnej nauce.



Powtórzenia działów w formie skecznotek wspierają utrwalanie wiadomości.



Pytania i zadania pomagają wyćwiczyć umiejętności wymagane przez podstawę programową.

Aktywuj E-book
(cyfrowe odzwierciedlenie podręcznika) na

EDURANGA



Zeskanuj kod

