WYDANIE
**AKTUALNE**

# FIZYKA

**PODRĘCZNIK • LICEUM I TECHNIKUM • ZAKRES PODSTAWOWY**

**NOWA**
**EDYCJA**

WSiP

**3**

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 Barbary Pukowskiej**, **mgr Teresy Kutajczyk**, **prof. zw. dr. hab. Jerzego Podrackiego.**

Etap edukacyjny: III
Typ szkoły: szkoła ponadpodstawowa (liceum ogólnokształcące i technikum)
Zakres kształcenia: podstawowy
Rok dopuszczenia: 2024
Numer ewidencyjny w wykazie: **999/3/2024/z1**

Podręcznik wpisany do wykazu podręczników MEN 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).

© Copyright by Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne
Warszawa 2021, 2024

Wydanie II, 1/2025

ISBN 978-83-02-21927-6 podręcznik w wersji elektronicznej (flipbook)
ISBN 978-83-02-21964-1 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**, **Grażyna Gawryłow**
Redakcja techniczna: **Agnieszka Przystańska**
Projekt okładki: **Ewa Pawińska**
Projekt graficzny: **Ewa Pawińska**, **Hanna Michalska-Baran**
Opracowanie graficzne: **Stefan Drewiczewski**, **Katarzyna Wojewoda-Celińska** (skecznotki)
Fotoedycja: **Ignacy Składowski**
Skład i łamanie: **MathMaster 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 ... 5

**Elektrostatyka** ... 7
1. Ładunek elektryczny, przewodniki ... 8
2. Izolatory ... 15
3. Siły elektryczne ... 20
4. Pole elektryczne ... 26
5. Napięcie elektryczne ... 32
6. Przewodnik w polu elektrycznym ... 38
7. Kondensator ... 45
8. Zjawiska elektryczne w atmosferze ... 51

**Powtórzenie działu** ... 60

**Prąd elektryczny** ... 65
9. Obwód prądu elektrycznego ... 66
10. Opór elektryczny ... 74
11. Prąd jako nośnik energii elektrycznej ... 82
12. Obwody elektryczne rozgałęzione ... 88
13. Domowa sieć elektryczna ... 93

**Powtórzenie działu** ... 100

**Elektromagnetyzm** ... 105
14. Pole magnetyczne ... 106
15. Pole magnetyczne prądu elektrycznego ... 112
16. Przewód z prądem w polu magnetycznym ... 118
17. Ładunek elektryczny w polu magnetycznym ... 126
18. Pole magnetyczne Ziemi ... 132
19. Indukcja elektromagnetyczna. Część 1. ... 140
20. Indukcja elektromagnetyczna. Część 2. ... 145
21. Prądnica ... 151
22. Prąd przemienny ... 157
23. Transformator, sieci energetyczne ... 163

**Powtórzenie działu** ... 170

**Fizyka atomowa** ... 175
24. Promieniowanie elektromagnetyczne ... 176
25. Widmo promieniowania ... 187
26. Korpuskularna natura promieniowania ... 196
27. Budowa i promieniowanie atomów ... 203
28. Przewodniki, izolatory i półprzewodniki ... 212
29. Dioda ... 219
30. Tranzystor ... 225
31. Fotoefekty ... 232

**Powtórzenie działu** ... 240

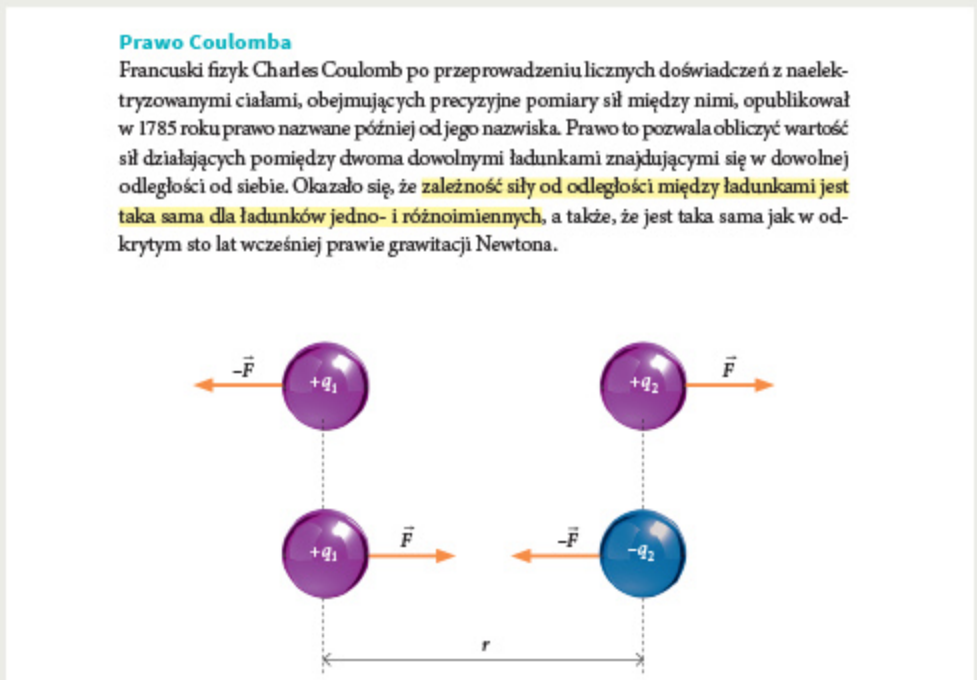
**Fizyka jądrowa** ... 245
32. Budowa jądra atomowego ... 246
33. Promieniowanie jądrowe ... 251
34. Prawo rozpadu promieniotwórczego ... 259
35. Wpływ promieniowania jądrowego na organizmy ... 266
36. Zastosowanie izotopów promieniotwórczych ... 272 F
37. Energia wiązania ... 281
38. Deficyt masy ... 285
39. Rozszczepienie jąder ciężkich ... 290
40. Reaktor jądrowy ... 295 F
41. Energetyka jądrowa ... 300
42. Synteza jądrowa ... 306
43. Ewolucja gwiazd ... 313 F
44. Supernowe i czarne dziury ... 321
**Powtórzenie działu** ... 330

**Scenariusze doświadczeń** ... 335
**Niezbędnik matematyczny** ... 348
**Teksty popularnonaukowe** ... 355
**Odpowiedzi i wskazówki do zadań** ... 366
Stałe fizyczne i astronomiczne ... 377
Indeks rzeczowy polsko-angielski ... 378

# JAK KORZYSTAĆ Z PODRĘCZNIKA

Pamiętaj: odpowiedzi, rysunki i obliczenia do wszystkich zadań zamieszczonych w podręczniku zapisuj w zeszycie przedmiotowym.

## Przeczytaj, zrozum, dowiedz się więcej



**Prawo Coulomba**

Francuski fizyk Charles Coulomb po przeprowadzeniu licznych doświadczeń z naelektryzowanymi ciałami, obejmujących precyzyjne pomiary sił między nimi, opublikował w 1785 roku prawo nazwane później od jego nazwiska. Prawo to pozwala obliczyć wartość sił działających pomiędzy dwoma dowolnymi ładunkami znajdującymi się w dowolnej odległości od siebie. Okazało się, że zależność siły od odległości między ładunkami jest taka sama dla ładunków jedno- i różnoimiennych, a także, że jest taka sama jak w odkrytym sto lat wcześniej prawie grawitacji Newtona.



**Ryc. 3.1.** Oddziaływanie dwóch ładunków

*zasadnicza część wykładu*

**Prawo Coulomba**

Każde dwie cząstki naładowane działają na siebie siłami elektrycznymi o wartości wprost proporcjonalnej do iloczynu ich ładunków, a odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi.

$$F = k\frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2}$$

*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.**

Do węzła obwodu, w którym łączą się cztery przewody, dopływają prądy o natężeniach 2,3 A i 1,8 A, a wypływa prąd o natężeniu 0,9 A oraz prąd o nieznanym natężeniu. Obliczmy to natężenie.

Korzystamy z I prawa Kirchhoffa. W tym przypadku:

$$2{,}3\ \text{A} + 1{,}8\ \text{A} = 0{,}9\ \text{A} + I$$

Wobec tego szukane natężenie prądu jest równe $I = 3{,}2$ A.



*szczegółowo rozwiązane zadania*

**PODSUMOWANIE**

- Wokół zmiennego w czasie pola magnetycznego powstaje **wirowe pole elektryczne**.
- Wokół zmiennego w czasie pola elektrycznego powstaje **wirowe pole magnetyczne**.
- **Zjawisko indukcji elektromagnetycznej** może być wywołane zmianą natężenia prądu w elektromagnesie.
- **Fala elektromagnetyczna** to związane ze sobą pola magnetyczne i elektryczne, rozchodzące się w przestrzeni.

*pytania i zadania na zakończenie rozdziału*

## Uporządkuj swoją wiedzę i sprawdź umiejętności

**POWTÓRZENIE DZIAŁU**

*powtórzenie wiadomości – teoria*

**POWTÓRZENIE DZIAŁU**

*ćwiczenie umiejętności – pytania i zadania*

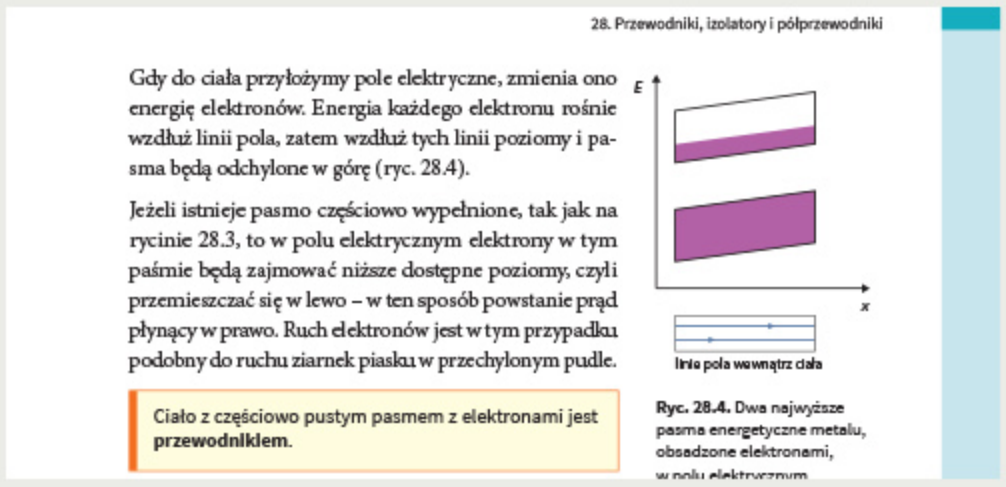
## Korzystaj z oznaczeń kolorystycznych

**SCENARIUSZE DOŚWIADCZEŃ**

**TEKSTY POPULARNONAUKOWE**

**NIEZBĘDNIK MATEMATYCZNY**

**ODPOWIEDZI I WSKAZÓWKI DO ZADAŃ**



28. Przewodniki, izolatory i półprzewodniki

Gdy do ciała przyłożymy pole elektryczne, zmienia ono energię elektronów. Energia każdego elektronu rośnie wzdłuż linii pola, zatem wzdłuż tych linii poziomy i pasma będą odchylone w górę (ryc. 28.4).

Jeżeli istnieje pasmo częściowo wypełnione, tak jak na rycinie 28.3, to w polu elektrycznym elektrony w tym paśmie będą zajmować niższe dostępne poziomy, czyli przemieszczać się w lewo – w ten sposób powstanie prąd płynący w prawo. Ruch elektronów jest w tym przypadku podobny do ruchu ziarnek piasku w przechylonym pudle.

Ciało z częściowo pustym pasmem z elektronami jest **przewodnikiem**.



**Ryc. 28.4.** Dwa najwyższe pasma energetyczne metalu, obsadzone elektronami, w polu elektrycznym

*materiał rozszerzający wiedzę*

s. 211 *odniesienia do stron ze Scenariuszami doświadczeń*

s. 216 *odniesienia do stron Niezbędnika matematycznego*

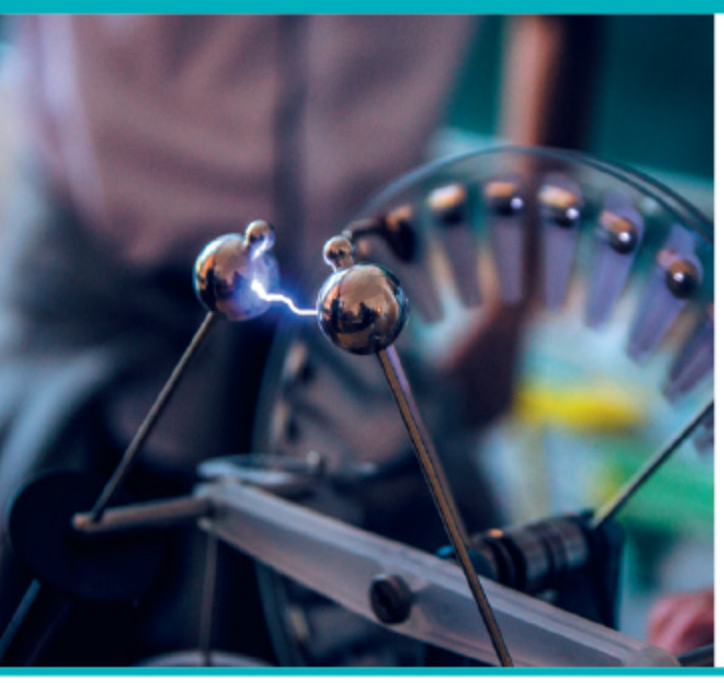
s. 77 s. 16 *odniesienia do stron rozdziału*

*treści usunięte wg podstawy programowej 2024*

*treści fakultatywne wg podstawy programowej 2024*

# ELEKTROSTATYKA

**Dlaczego łatwiej jest naelektryzować plastikowy długopis niż metalową rurkę? Czy powierzchnia Ziemi jest naelektryzowana? Czym jest piorun? Odpowiedź na te i inne pytania znajdziesz w dziale ELEKTROSTATYKA.**



# 1. Ładunek elektryczny, przewodniki

- Zasada zachowania ładunku
- Elektryzowanie przewodników
- Uziemienie

➔ **Przypomnij sobie** zasady dynamiki oraz to, jak oddziałują ładunki elektryczne.

Nikogo nie trzeba przekonywać o istnieniu zjawisk elektrycznych. Nie potrafimy sobie już wyobrazić życia bez elektryczności. Siły elektryczne decydują o prawie wszystkich właściwościach ciał dookoła nas. W tym dziale poznamy podstawowe prawa opisujące zjawiska elektryczne.

## Ładunek elektryczny

Na początek warto przypomnieć sobie kilka podstawowych faktów dotyczących ładunku elektrycznego*.

Niektóre cząstki mają ładunek elektryczny. Ładunek może być dodatni lub ujemny.

Ładunek elektryczny nie istnieje samodzielnie, jest cechą niektórych cząstek, podobnie jak masa. Można go zmierzyć, a jego podstawową jednostką jest kulomb (w skrócie C). Ładunek elektryczny ma naturę ziarnistą – to znaczy, że można wskazać pewną najmniejszą porcję ładunku, tzw. ładunek elementarny, oznaczany literą $e$.

$$e \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

Taki ładunek ma np. proton wchodzący w skład jąder atomowych. Elektron ma ładunek o tej samej wartości bezwzględnej, ale przeciwnego znaku, czyli $-e$. Ogólnie ładunek oznaczamy symbolem $q$. Każdy występujący w przyrodzie ładunek elektryczny jest zatem całkowitą wielokrotnością ładunku elementarnego:

$$q = \pm ne$$

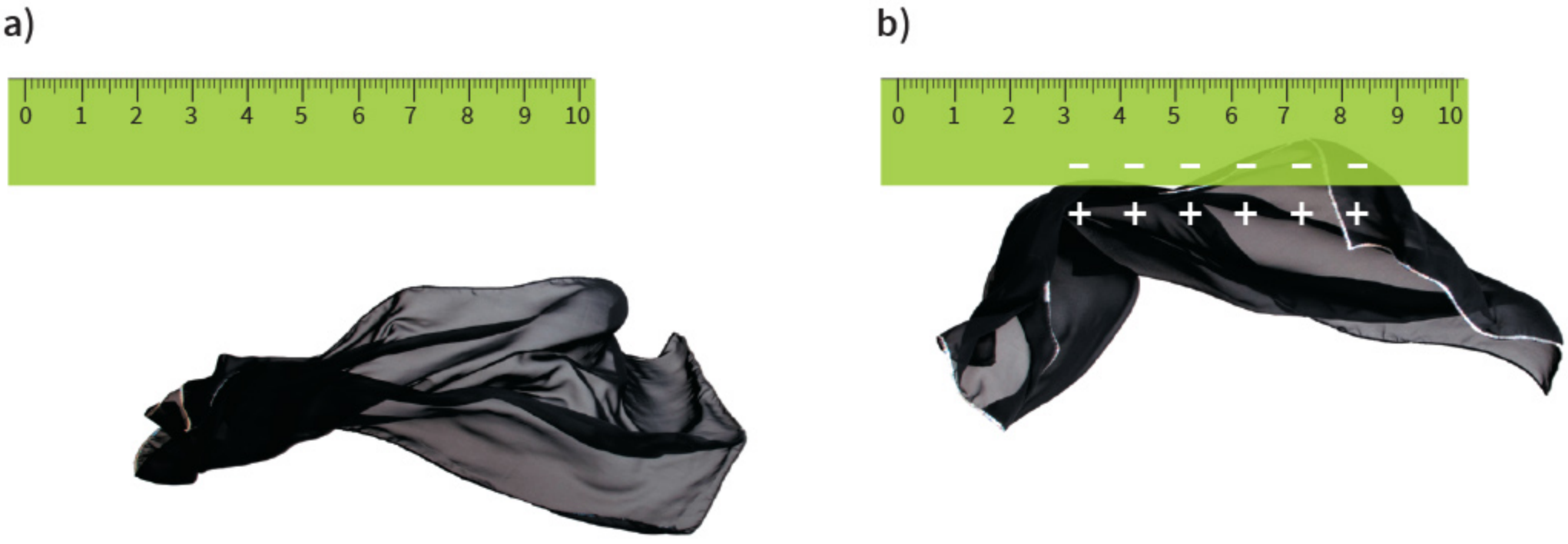
gdzie $n$ jest liczbą naturalną.

s. 352 Ładunki naelektryzowanych ciał w naszym otoczeniu są co najmniej miliardy razy większe od ładunku elementarnego, dlatego na co dzień nie zauważamy ziarnistej natury ładunku, podobnie jak nie dostrzegamy atomowej struktury otaczających nas ciał.

* Określenia „ładunek elektryczny” używa się w dwóch znaczeniach: może ono oznaczać wielkość fizyczną $q$ opisującą pewne cechy cząstek lub ciał naelektryzowanych oraz samą cząstkę naładowaną. Gdy używamy tego określenia w liczbie mnogiej („ładunki”), najczęściej mamy na myśli cząstki z ładunkiem.

Jednym z ważniejszych praw dotyczących elektryczności jest zasada zachowania ładunku.

**Zasada zachowania ładunku**
Całkowity ładunek elektryczny układu izolowanego się nie zmienia.




**Ryc. 1.1.** Całkowity ładunek układu izolowanego, np. linijki i materiału, jest równy zeru – zarówno przed potarciem (a), jak i po potarciu (b)

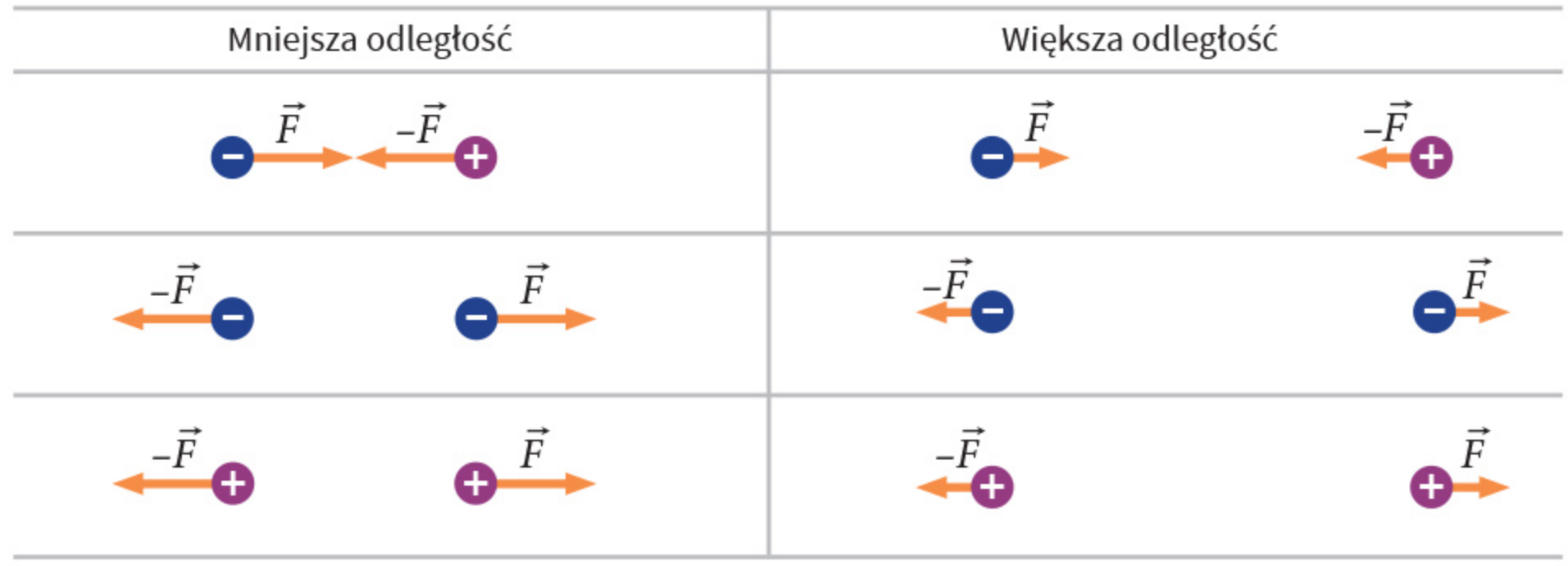
Całkowity ładunek elektryczny, czyli suma wszystkich ładunków elektrycznych znajdujących się w danym układzie ciał, jest zachowany we wszystkich procesach zachodzących w tym układzie, o ile nie dopływa z zewnątrz do układu lub z niego nie odpływa. Ładunek elektryczny nie może powstać z niczego. W każdym widocznym obiekcie są miliardy miliardów atomów, które składają się z elektronów o ładunku ujemnym oraz z jąder atomowych, mających ładunek dodatni. Jednak atomy, a zatem i zbudowane z nich ciała, mają na ogół ładunek całkowity równy zeru, czyli nie są naelektryzowane. W wyniku pewnych oddziaływań może dojść do przemieszczenia elektronów między ciałami (lub w obrębie jednego ciała). Ciało, które zyskało nadmiar elektronów jest naelektryzowane. Mówimy wówczas, że ma ujemny niezerowy ładunek całkowity. Analogicznie ciało z niedoborem elektronów ma nadmiarowe cząstki z ładunkiem dodatnim – jest naelektryzowane dodatnio. Liczba tych nadmiarowych cząstek naładowanych jest bardzo mała w stosunku do liczby elektronów lub jąder atomowych – nawet w silnie naelektryzowanych ciałach.

Pocierana flanelą linijka uzyskuje ładunek ujemny. Jeśli wcześniej oba przedmioty nie były naelektryzowane (ich ładunek był równy zeru), możemy być pewni, że flanela jednocześnie uzyskuje ładunek przeciwnego znaku o tej samej wartości bezwzględnej (ryc. 1.1).

Skąd w ogóle wiemy o istnieniu ładunków elektrycznych? Ponieważ działają one na siebie pewnymi siłami. Sam ładunek elektryczny jest nieobserwowalny, natomiast wywoływane przez ładunki siły elektryczne ujawniają się w postaci widocznych efektów.

Każde dwa ładunki działają na siebie siłami elektrycznymi malejącymi z odległością. Ładunki jednoimienne się odpychają, a różnoimienne – przyciągają.

Oddziaływanie ładunków jest wzajemne – zgodnie z III zasadą dynamiki (ryc. 1.2).




**Ryc. 1.2.** Ładunki przyciągają się lub odpychają siłami malejącymi z odległością

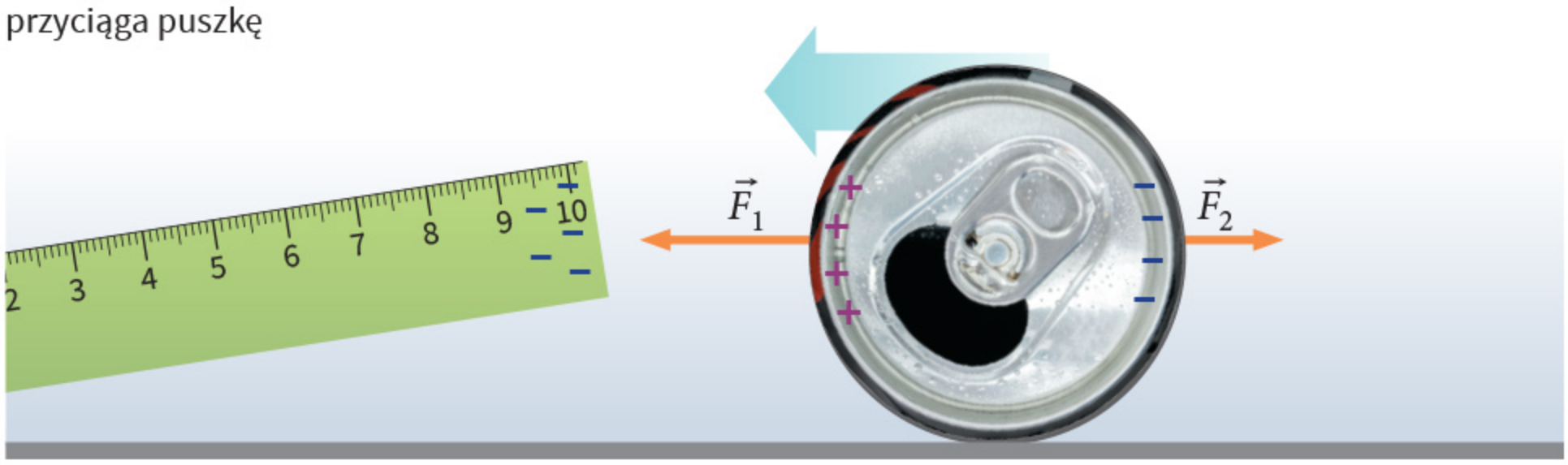
## Elektryzowanie przewodników

Wiele ciał wokół nas można naelektryzować, najłatwiej przez pocieranie ich o siebie. Możemy to zaobserwować np. podczas czesania suchych włosów, co niejednokrotnie wywołuje iskry elektryczne (ryc. 1.3). To przykład elektryzowania izolatorów – jego mechanizm działania wyjaśnimy w następnym rozdziale. W tym rozdziale przyjrzymy się bliżej przewodnikom, czyli ciałom, w których znajdują się naładowane cząstki mogące swobodnie przemieszczać się w całej objętości ciała. W metalach taką swobodę ruchu mają niektóre elektrony, nazywane **elektronami swobodnymi.** Przewodnikami są również roztwory wodne kwasów, zasad i soli. Gdy substancje te rozpuszczają się w wodzie, ulegają dysocjacji – inaczej mówiąc, ich cząsteczki dzielą się na dwa jony: dodatni i ujemny. Te jony, podobnie jak pozostałe cząsteczki cieczy, mogą swobodnie się przemieszczać. Bardzo dużo obiektów w naszym otoczeniu zawiera w sobie wodę z rozpuszczonymi związkami chemicznymi. Należą do nich np. gleba, żywność, wszystkie organizmy żywe. Te ciała (a także niedestylowaną wodę) można zatem traktować jako przewodniki.

**Ryc. 1.3.** Sterczące włosy to znak silnego ich naelektryzowania

Rzadko udaje się naelektryzować przewodniki w wyniku pocierania. Można jednak naładować je w inny sposób. Gdy naelektryzowaną plastikową linijkę (izolator) zbliżymy do pustej puszki aluminiowej (przewodnik), puszka zacznie się toczyć w stronę linijki (ryc. 1.4).

**Ryc. 1.4.** Naelektryzowana linijka przyciąga puszkę




Dlaczego naelektryzowana linijka przyciąga puszkę? Plastikowa linijka zwykle elektryzuje się ujemnie. Gdy w jej pobliżu znajdzie się metalowa puszka, elektrony swobodne w puszce są przez linijkę odpychane, a ponieważ mają swobodę ruchu, przemieszczają się na najdalszy kraniec puszki. Od strony linijki pozostają jony dodatnie (atomy pozbawione części elektronów), które w metalach nie mogą się przemieszczać (ryc. 1.4). Puszka nie uzyskuje nowego ładunku, ale jej ładunek rozdziela się pod wpływem naelektryzowanej linijki (następuje tzw. indukcja elektrostatyczna). W związku z tym bliższa część puszki jest przez linijkę przyciągana, a dalsza – odpychana. Czy te siły się równoważą? Ładunki dodatnie puszki są bliżej linijki niż ujemne, zatem siła przyciągająca jest większa niż odpychająca. W efekcie siła wypadkowa jest skierowana w stronę linijki. **Przewodniki o zerowym ładunku całkowitym są przyciągane przez ciała naelektryzowane.** Gdy puszki z doświadczenia dotkniemy palcem, niektóre elektrony odpłyną z niej do naszego ciała (ryc. 1.5). W ten sposób puszka uzyska ładunek dodatni.

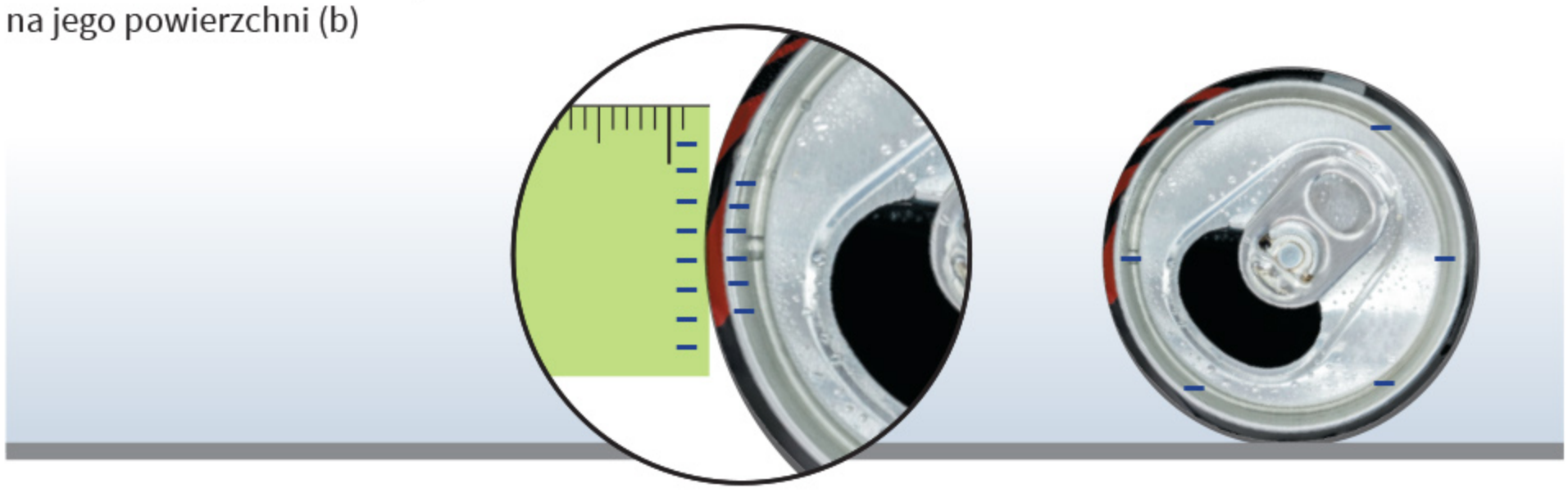
**Ryc. 1.5.** Puszka zyskuje ładunek dodatni po odpłynięciu ładunku ujemnego

**DOŚWIADCZENIE 1.**

Naelektryzuj przez pocieranie linijkę lub plastikową rurę od odkurzacza. Zbliż ją do strużki wody cieknącej z kranu. Jak zachowuje się woda?

Dotknięcie naelektryzowaną linijką metalowego przedmiotu powoduje, że w miejscu zetknięcia niektóre elektrony przechodzą na przewodnik. Powierzchnia styku jest zwykle bardzo mała, dlatego też przewodnik uzyska niewielki ładunek. Ponieważ elektrony

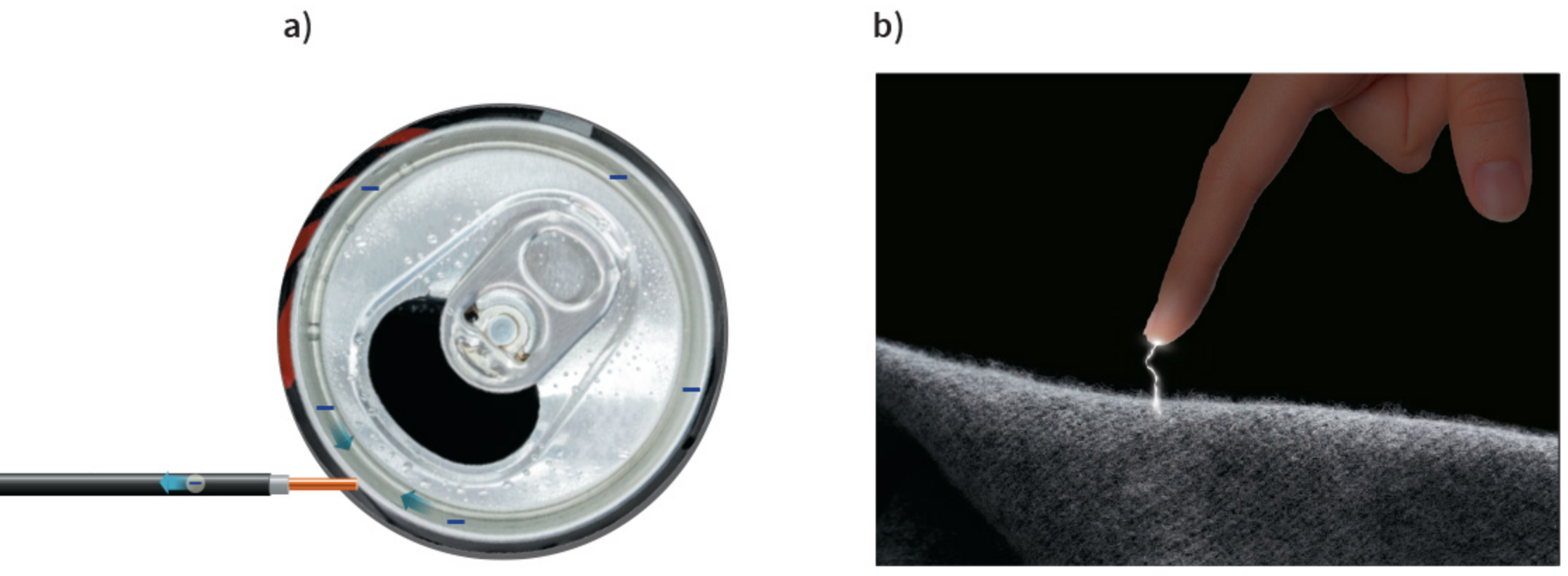
w metalach mają swobodę ruchu, to w wyniku wzajemnego odpychania zajmują miejsca jak najdalej od siebie (ryc. 1.6). **Nadmiarowe ładunki zawsze rozmieszczają się na powierzchni przewodnika**. Wnętrze przewodnika ma ładunek równy zeru.



**Ryc. 1.6.** Elektrony przepływają na przewodnik w miejscu zetknięcia (a) i rozmieszczają się na jego powierzchni (b)

## Uziemienie

Powierzchnia Ziemi jest przewodnikiem tak dużym, że wprowadzenie do niej (lub wyprowadzenie z niej) jakiegokolwiek ładunku elektrycznego nie spowoduje żadnych zauważalnych zmian. Gdy połączymy naelektryzowany przewodnik z Ziemią za pomocą metalowego przewodu lub naszego własnego ciała (o ile nie stoimy na grubej warstwie izolatora), nadmiarowy ładunek natychmiast odpłynie z tego przewodnika do Ziemi. Gdy przewodnik ma ładunek ujemny, odpłyną z niego nadmiarowe elektrony. Gdy ma ładunek dodatni, przyciągnie on z Ziemi elektrony. Takie połączenie nazywamy **uziemieniem**. Gdy uziemimy naelektryzowany przewodnik, pozbawimy go ładunku (ryc. 1.7a). Ładunek z silnie naelektryzowanego ciała może także „przeskoczyć" poprzez iskrę (ryc. 1.7b).



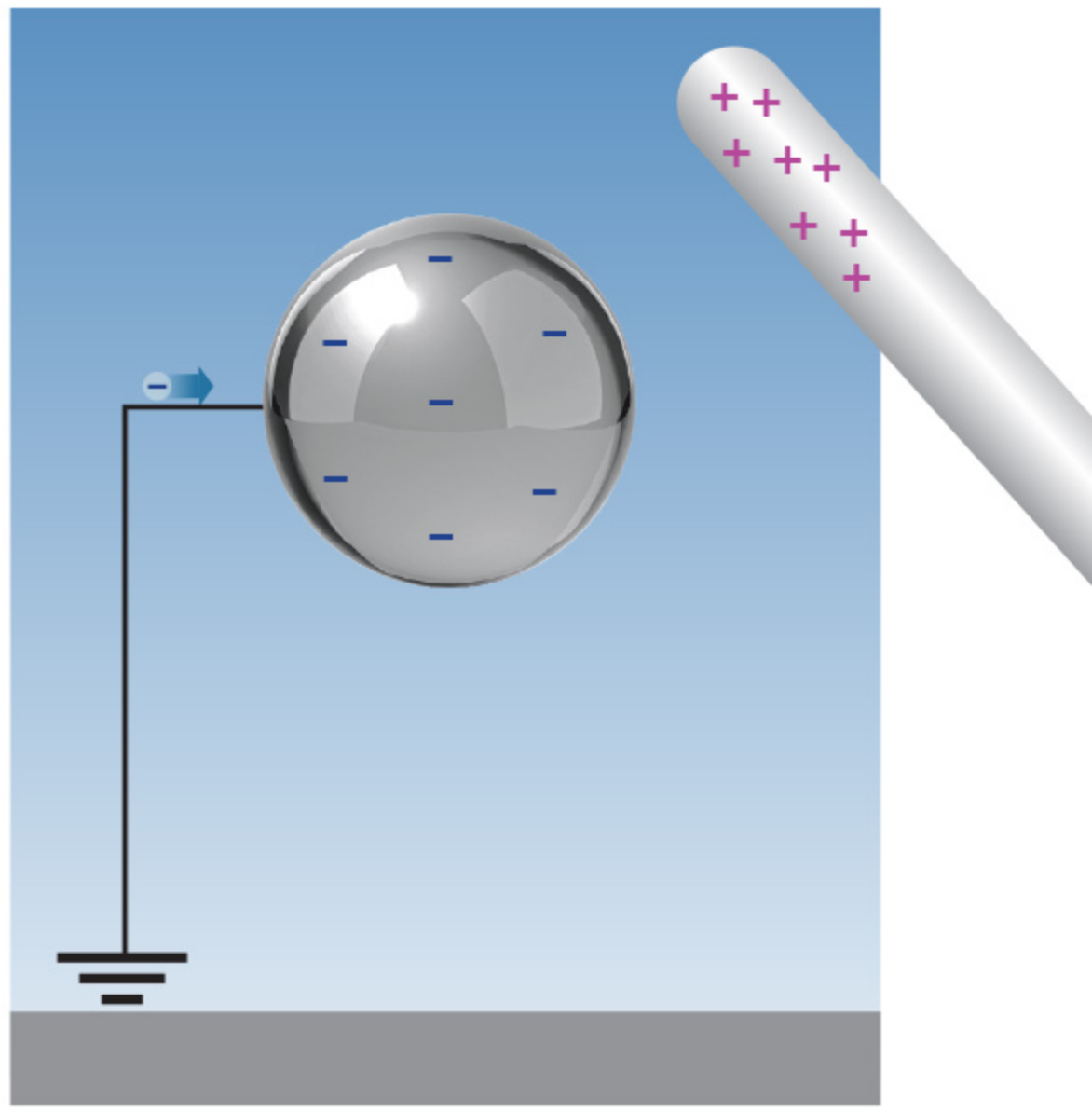

**Ryc. 1.7.** Odpłynięcie ładunku do Ziemi: przez uziemienie (a) oraz przez iskrę i nasze ciało (b)

Uziemienie stosuje się w sytuacjach, gdy naelektryzowanie ciała może być niebezpieczne. Na przykład cysterny do przewozu benzyny w trakcie przepompowywania paliwa do zbiorników powinny być uziemione (ryc. 1.8a), ponieważ przeskok ładunku elektrycznego (iskra) mógłby spowodować pożar. W przypadku urządzeń cyfrowych przeskok iskry może doprowadzić do poważnych uszkodzeń sprzętu, dlatego podczas naprawy czy montażu komputerów często stosuje się elastyczne przewody, którymi pracownik połączony jest z obudową komputera (ryc. 1.8b).

Gdy do uziemionego przewodnika zbliżymy naelektryzowany przedmiot, jego ładunek przyciągnie z Ziemi ładunek przeciwnego znaku. Przewodnik zostanie naelektryzowany (ryc. 1.9). Podczas jego elektryzowania przemieszczają się tylko elektrony.

Okazuje się, że powierzchnia Ziemi jest naelektryzowana ładunkiem ujemnym, jednak na każdym metrze kwadratowym powierzchni Ziemi zgromadzony jest przeciętnie ładunek wynoszący zaledwie $-10^{-9}$ C. Dlatego podczas uziemiania ciał można pomijać naelektryzowanie powierzchni Ziemi i traktować ją tylko jako ogromny pojemnik ładunków elektrycznych.

**Ryc. 1.8. a)** Podczas przepompowywania materiałów łatwopalnych zbiorniki muszą być uziemione. **b)** Pracownik naprawiający komputer połączony jest przewodem z jego obudową



**Ryc. 1.9.** Uziemione ciała w pobliżu ciał naelektryzowanych elektryzują się przez indukcję przeciwnym ładunkiem

## PODSUMOWANIE

- W przyrodzie występują dwa rodzaje ładunków: dodatnie i ujemne. Ładunki działają na siebie siłami, których wartość maleje z odległością. Ładunki jednoimienne się odpychają, różnoimienne – przyciągają.
- **Zasada zachowania ładunku**: całkowity ładunek elektryczny układu izolowanego się nie zmienia.
- Nadmiarowy ładunek gromadzi się zawsze na powierzchni przewodnika.
- Pod wpływem ładunku zewnętrznego ładunki ujemne i dodatnie przewodnika się rozdzielają.
- Przewodniki o zerowym ładunku całkowitym są przyciągane przez ciała naelektryzowane.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Czy po chwilowym uziemieniu puszki (ryc. 1.4 i 1.5) będzie ona silniej czy słabiej przyciągana przez linijkę? Uzasadnij odpowiedź.
2. Narysuj siły wypadkowe działające na każdy z nadmiarowych ładunków, równomiernie rozmieszczonych na powierzchni pewnej kuli. Jak są one skierowane? Wskazówka: narysuj dla uproszczenia sytuację, gdy na sferze są tylko cztery ładunki. Narysuj siły, którymi na jeden z nich działają pozostałe trzy.
3. Oszacuj, ile nadmiarowych elektronów ma boisko piłkarskie o wymiarach 60 m × 100 m. Skorzystaj z informacji podanych w tekście rozdziału.
4. Z folii aluminiowej, drutu i słoika można zrobić przyrząd do badania naelektryzowania ciał, czyli elektroskop (fot.). Czy paski folii odchylą się od siebie, gdy zbliżymy do kulki elektroskopu naelektryzowane ciało? Uzasadnij odpowiedź.
5. Neutron (cząstka o zerowym ładunku) rozpada się czasem – bez oddziaływania z zewnątrz – na proton i jeszcze jedną cząstkę z ładunkiem. Czy tą drugą cząstką może być elektron? Czy tą drugą cząstką może być pozyton (antyelektron, czyli cząstka o dodatnim ładunku elementarnym i masie równej masie elektronu)? Uzasadnij odpowiedź.

# 2. Izolatory

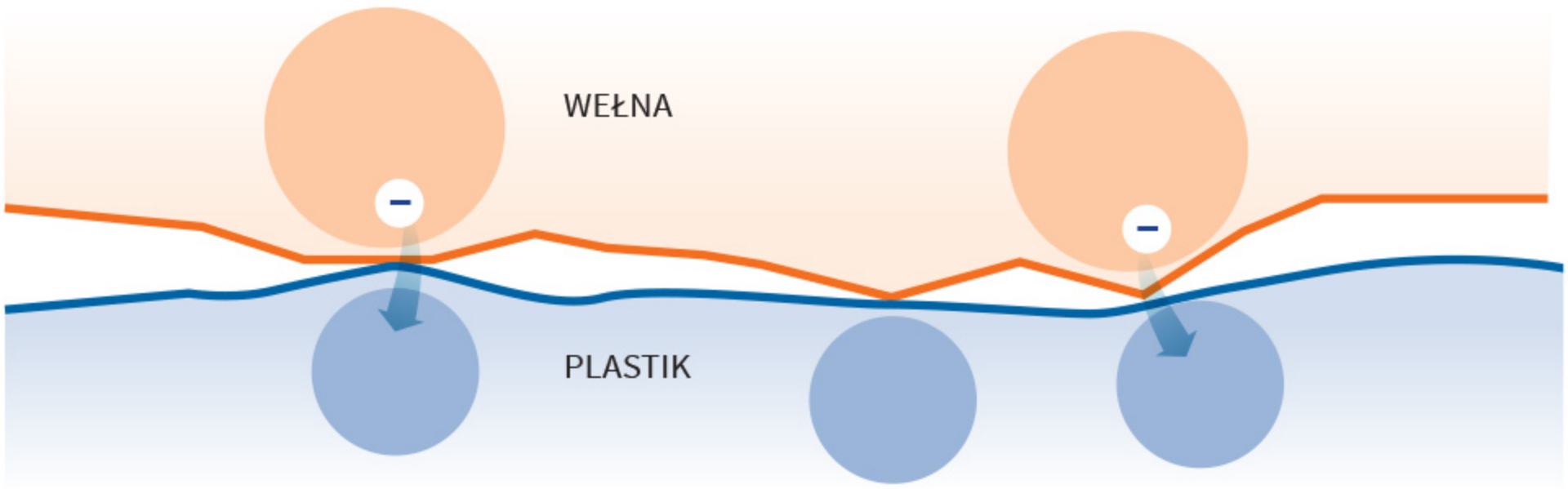
- Elektryzowanie izolatorów
- Dipol elektryczny

➔ **Przypomnij sobie** budowę atomu i właściwości elektryczne przewodników.

Izolatory, zwane też dielektrykami, to substancje nieprzewodzące prądu elektrycznego. Są nimi np. tworzywa sztuczne, szkło, guma, porcelana i gazy. W izolatorach nie ma cząstek naładowanych, które mogą się swobodnie przemieszczać. Mimo to bardzo łatwo jest naelektryzować plastikową linijkę, która potem przyciąga nienaelektryzowane skrawki papieru, też będącego izolatorem.

## Elektryzowanie izolatorów

Elektryzowanie ciał polega na przechodzeniu elektronów z jednego ciała na drugie. W izolatorach wszystkie elektrony są związane ze swoimi macierzystymi cząsteczkami siłami elektrycznymi. Jednak w niektórych substancjach, np. w tworzywach sztucznych, te siły są większe niż w innych. Przy bezpośrednim kontakcie między cząsteczkami różnych substancji elektrony mogą zostać przechwycone przez cząsteczki tej substancji, w której są silniej związane (ryc. 2.1). Gdy dwa obiekty są dociskane do siebie, zazwyczaj tylko niewielka część atomów znajdujących się na ich powierzchni bezpośrednio styka się ze sobą. W kontakcie przeszkadzają nierówności powierzchni oraz cząsteczki powietrza, które wcisnęły się między te dwie powierzchnie. Liczbę stykających się atomów można zwiększyć przez przesuwanie jednej powierzchni względem drugiej lub przez ich silniejszy docisk.




**Ryc. 2.1.** Elektrony we włóknach wełny są słabiej związane niż elektrony w plastiku. W miejscach bezpośredniego styku cząsteczki tworzące plastik przechwytują elektrony, zatem plastik elektryzuje się ujemnie, a wełna dodatnio

W izolatorze elektrony się nie przemieszczają – nawet te nadmiarowe, które przeszły z innego ciała. Wobec tego ładunek na izolatorach pozostaje w miejscach, które zostały naelektryzowane. Dzięki temu udaje się zgromadzić stosunkowo duży ładunek na małej powierzchni (ryc. 2.2).

**Ryc. 2.2.** Papierowe konfetti jest przyciągane tylko do tych fragmentów plastikowej rury, które mają nadmiarowy ładunek elektryczny

## WARTO WIEDZIEĆ

### Szereg tryboelektryczny

Skąd wiadomo, które z dwóch ciał w wyniku pocierania będzie elektryzować się dodatnio, a które ujemnie? Zależy to od siły wiążącej elektrony w cząsteczkach danego ciała. Przy bezpośrednim kontakcie ujemnie elektryzuje się ciało o silniej związanych elektronach. Uszeregowane według tego kryterium powszechnie występujące substancje przedstawiono na rysunku. Jest to tzw. szereg tryboelektryczny. Im niżej w szeregu znajduje się substancja, tym silniej związane są w niej elektrony. To znaczy, że przy pocieraniu ciał z dwóch różnych substancji ładunek ujemny uzyska ciało wykonane z substancji położonej niżej w tym szeregu.

Z rysunku odczytujemy, że najsłabiej związane są elektrony w cząsteczkach powietrza. Dlatego np. podczas odkurzania powietrze przelatujące wewnątrz plastikowej rury elektryzuje się dodatnio, a rura ujemnie. Gdy suchym papierem będziemy przecierać szybę, papier naelektryzuje się ujemnie, a szkło dodatnio. Jednak gdy papierem przetrzemy blat plastikowego stolika turystycznego, papier naelektryzuje się dodatnio, gdyż w szeregu tryboelektrycznym jest położony powyżej tworzyw sztucznych (poliester, polietylen).

**DOŚWIADCZENIE 1.**
Naelektryzuj przez pocieranie (najlepiej wełnianą tkaniną) nadmuchany balon. Zbliż balon do spodniej strony blatu biurka. Czy balon przylgnął do blatu? Jak to wyjaśnisz? Dlaczego ładunki z balonu nie uciekają przez podłogę do ziemi?

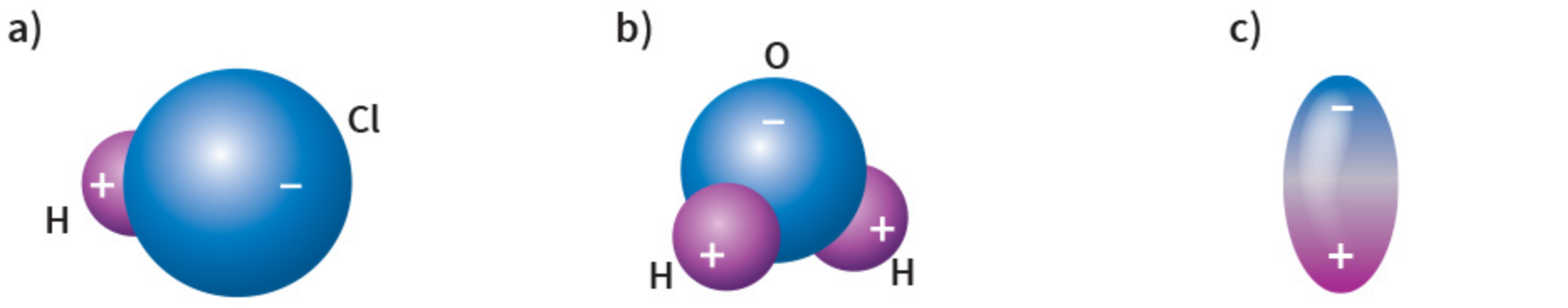
## Dipol elektryczny

Nienaelektryzowane izolatory (np. skrawki papieru) są przyciągane przez znajdujące się blisko nich ciała naładowane, choć elektrony w nich zawarte nie mogą się swobodnie przemieszczać, jak to było w przypadku przewodników. Dlaczego tak się dzieje?

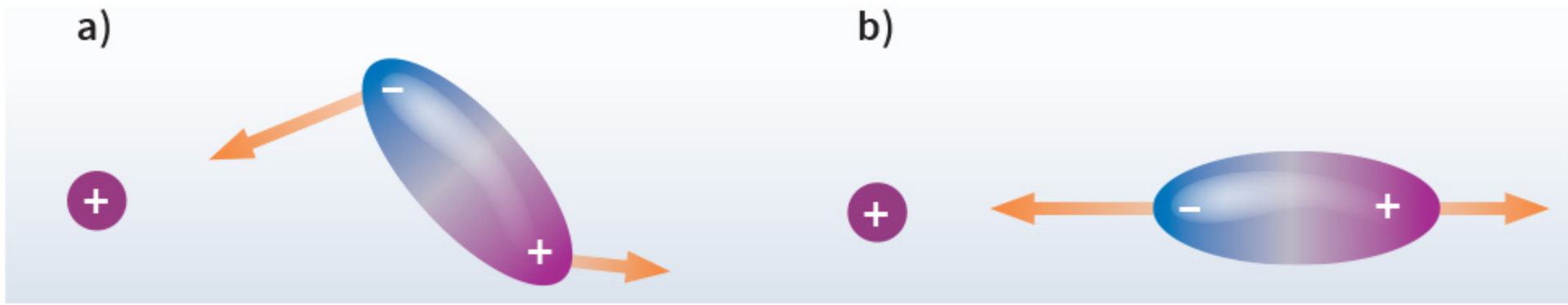
Każdy atom i każda cząsteczka składają się z cząstek o ładunku dodatnim (jądra atomów) i ujemnym (elektrony). W niektórych cząsteczkach związków chemicznych rozmieszczenie elektronów jest takie, że w obszarze samej cząsteczki ładunek dodatni i ujemny są odsunięte od siebie. Tak jest np. w cząsteczce wody czy chlorowodoru (ryc. 2.3). Takie cząsteczki nazywamy dipolami elektrycznymi.

**Dipol elektryczny** to układ dwóch przeciwnych ładunków znajdujących się w pewnej odległości od siebie.

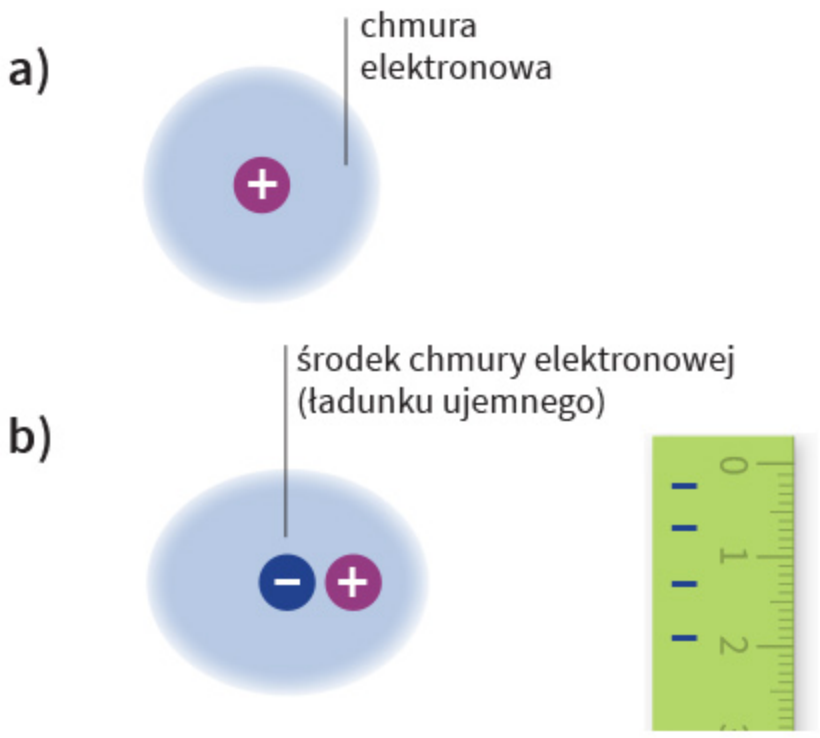
W obecności zewnętrznego ładunku na dipol działają dwie siły (ryc. 2.4). Powodują one obrót dipola i ustawienie się go w kierunku do zewnętrznego ładunku. Siła działająca na ładunek znajdujący się bliżej jest większa, zatem dipol będzie przyciągany do zewnętrznego ładunku.



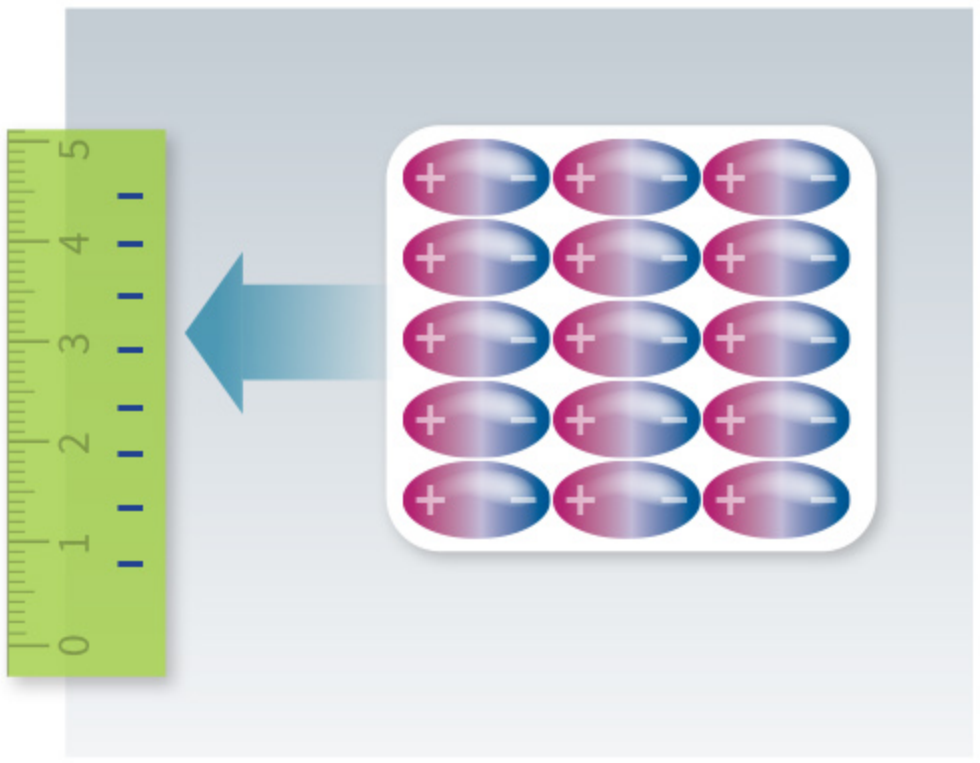

**Ryc. 2.3.** Cząsteczka chlorowodoru (a) jest dipolem, gdyż środek ładunku dodatniego nie pokrywa się ze środkiem ładunku ujemnego. Cząsteczka wody (b) zachowuje się elektrycznie jak złożenie dwóch dipoli. Można ją traktować w uproszczeniu jak jeden dipol (c)




**Ryc. 2.4. a)** Zewnętrzny ładunek działa siłami na ładunki dipola. **b)** Dipol obróci się i zwróci w stronę ładunku zewnętrznego ładunkiem o przeciwnym znaku




**Ryc. 2.5.** Rozmieszczenie ładunków w atomie z dala od innych ładunków (a) i w obecności ładunku zewnętrznego (b)



**Ryc. 2.6.** Izolatory są przyciągane przez ładunek zewnętrzny, gdyż ich cząsteczki stają się dipolami

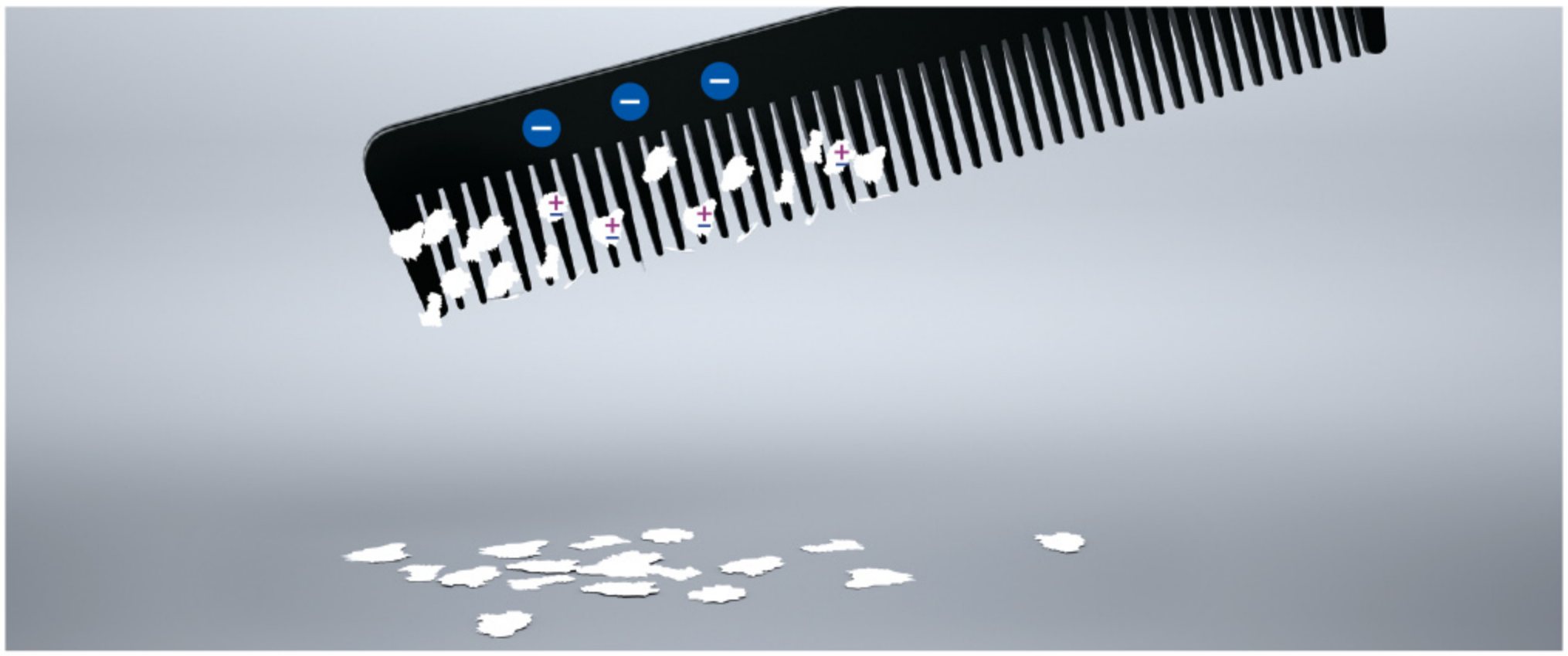
**Ryc. 2.7.** Naelektryzowany ujemnie plastikowy grzebień przyciąga kawałki papieru. Przy zetknięciu z grzebieniem papier nie uzyskuje ładunku

Nawet atomy niebędące dipolami stają się nimi pod wpływem ładunku zewnętrznego.

Elektrony w atomie tworzą tzw. chmurę elektronową. Załóżmy, że środek chmury elektronowej jest w tym samym miejscu co jądro (ryc. 2.5a). Jeśli z prawej strony atomu pojawi się ładunek ujemny, to przyciągnie on dodatnie jądro, a odepchnie ujemną chmurę elektronową. To spowoduje rozsunięcie się jądra atomu i środka chmury elektronowej. Atom stanie się dipolem (ryc. 2.5b)

W obecności ładunku zewnętrznego cząsteczki izolatora stają się dipolami i są przyciągane do ładunku zewnętrznego. Na przykład gdy zbliżamy naelektryzowaną linijkę do skrawka papieru, dipole utworzone przez cząsteczki papieru są przez nią przyciągane. Takie zachowanie obserwujemy niezależnie od znaku ładunku zewnętrznego (ryc. 2.6).

Zetknięcie izolatora z przedmiotem naelektryzowanym praktycznie nie powoduje przejścia ładunku na izolator ze względu na małą rzeczywistą powierzchnię styku. Dlatego izolator stykający się z ciałem naładowanym nadal jest przez nie przyciągany (ryc. 2.7). Z tego powodu często obserwujemy „przyklejanie" się kurzu do przecieranych na sucho powierzchni.

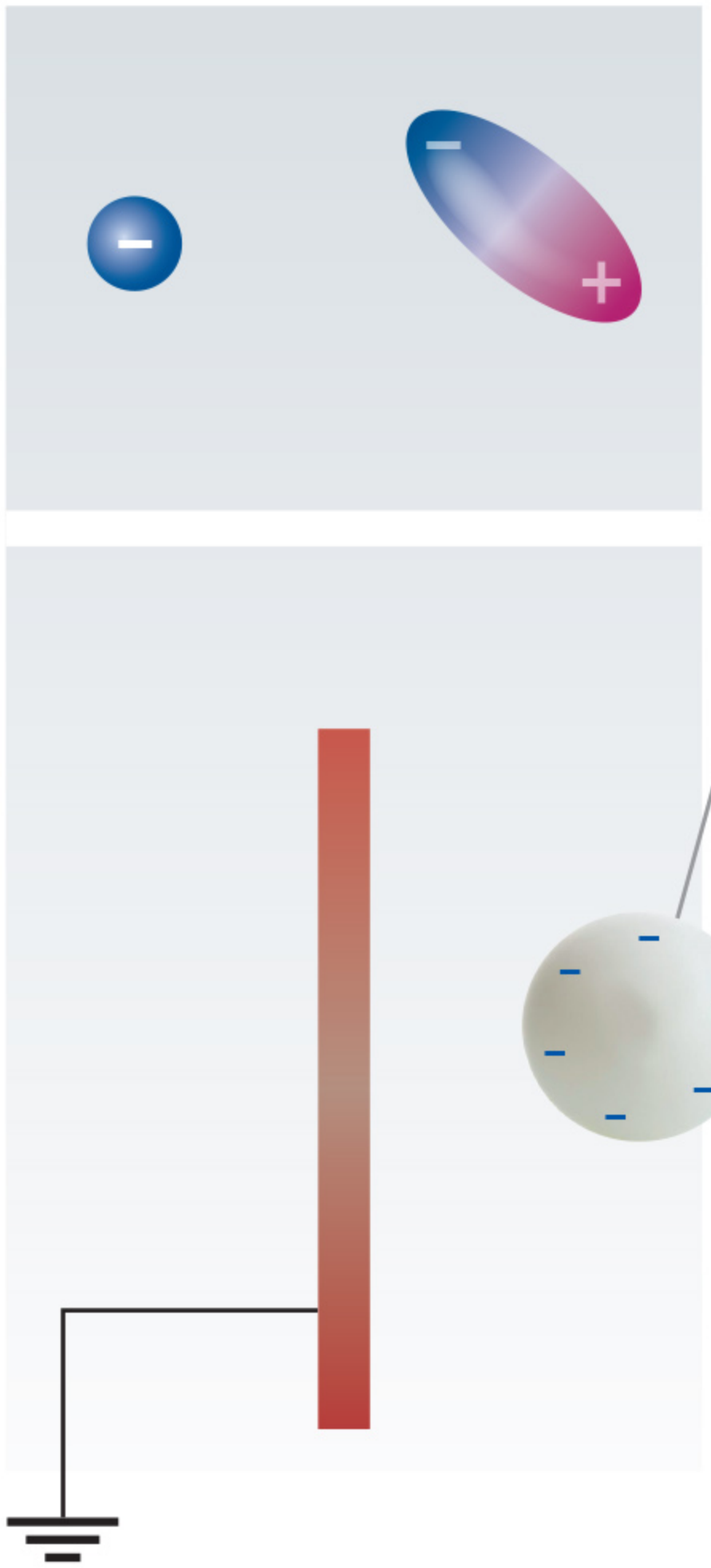


## PODSUMOWANIE

- Nadmiarowy ładunek w izolatorach się nie przemieszcza.
- **Dipol elektryczny** to układ dwóch przeciwnych ładunków położonych blisko siebie.
- W obecności ładunku zewnętrznego cząsteczki izolatora stają się dipolami elektrycznymi.
- Izolatory są przyciągane do naelektryzowanych ciał.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Narysuj końcowe ustawienie się przedstawionego obok dipola w obecności zewnętrznego ładunku ujemnego.
2. Czym należałoby potrzeć drewnianą figurkę, aby naelektryzować ją dodatnio, a czym – aby naładować ujemnie? Wskazówka: przeczytaj fragment *Warto wiedzieć* w tym rozdziale.
3. Powietrze w normalnych warunkach jest izolatorem. Czy zjonizowane (czyli zawierające jony) powietrze też jest izolatorem? Uzasadnij odpowiedź.
4. Gdy piłkę do koszykówki położymy na parkiecie sali gimnastycznej, nie naelektryzuje się. Gdy natomiast ktoś intensywnie kozłuje, piłka często elektryzuje się już po krótkim czasie. Wyjaśnij, dlaczego tak się dzieje.
5. Do uziemionej pionowej płytki wykonanej z przewodnika zbliżamy wiszącą na nitce piłeczkę pingpongową, naelektryzowaną ujemnie. Obserwujemy, że nitka z piłeczką odchyla się w stronę płytki (ryc.).
   a) Jak zachowa się piłeczka po zetknięciu z płytką?
   b) Jak w takiej sytuacji zachowałaby się naelektryzowana piłeczka owinięta folią aluminiową (przewodnik)? Uzasadnij odpowiedź.



# 3. Siły elektryczne

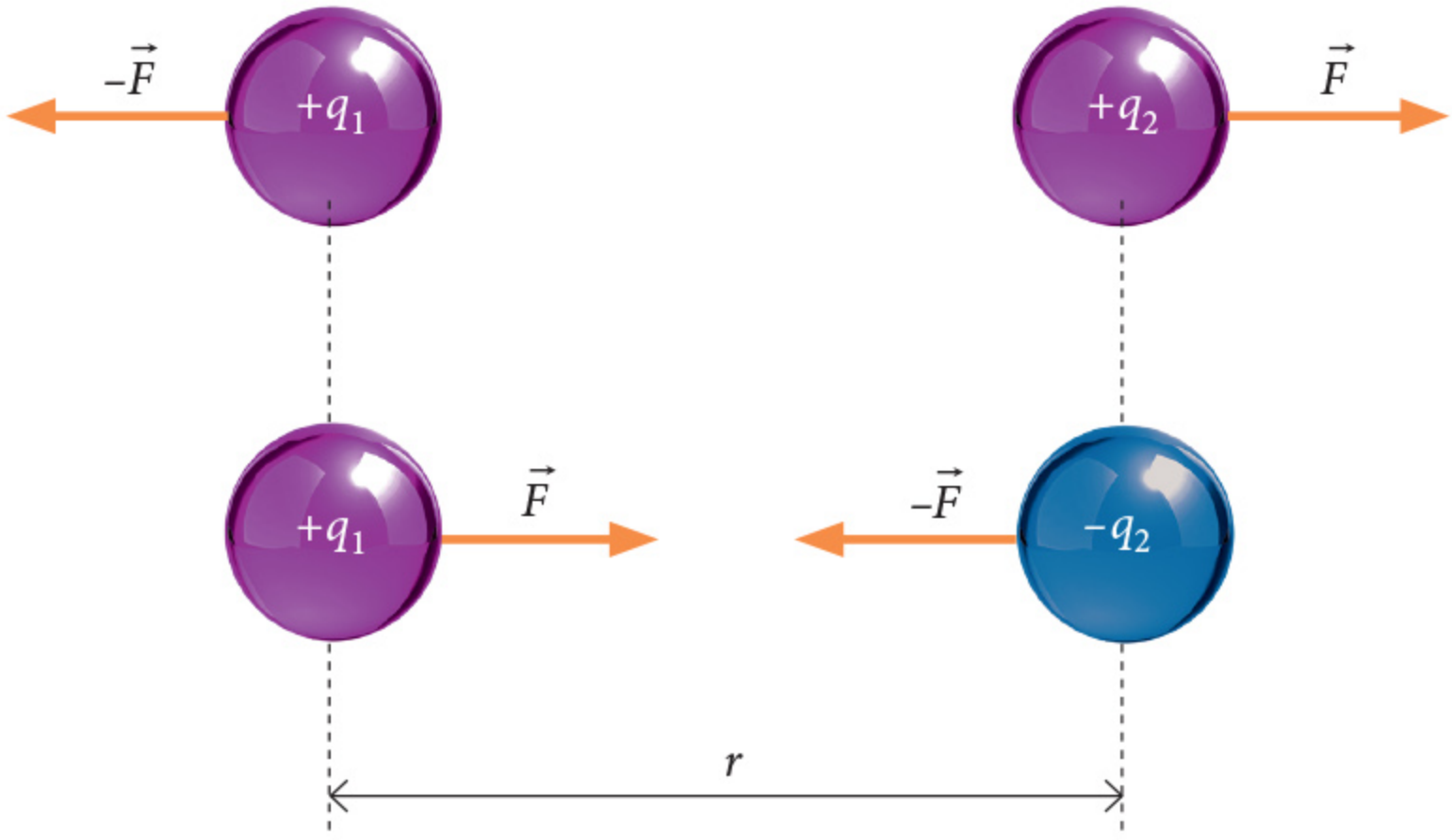
- Prawo Coulomba
- Oddziaływanie dipoli elektrycznych

➔ **Przypomnij sobie** pojęcie dipola elektrycznego.

Ciała naelektryzowane jednoimiennie się odpychają, a różnoimiennie – przyciągają. Oddziaływania między nimi mogą być silniejsze lub słabsze. A jak obliczyć wartości sił elektrycznych działających między takimi ciałami?

## Prawo Coulomba

Francuski fizyk Charles Coulomb po przeprowadzeniu licznych doświadczeń z naelektryzowanymi ciałami, obejmujących precyzyjne pomiary sił między nimi, opublikował w 1785 roku prawo nazwane później od jego nazwiska. Prawo to pozwala obliczyć wartość sił działających pomiędzy dwoma dowolnymi ładunkami znajdującymi się w dowolnej odległości od siebie. Okazało się, że zależność siły od odległości między ładunkami jest taka sama dla ładunków jedno- i różnoimiennych, a także, że jest taka sama jak w odkrytym sto lat wcześniej prawie grawitacji Newtona.




**Ryc. 3.1.** Oddziaływanie dwóch ładunków

**Prawo Coulomba**
Każde dwie cząstki naładowane działają na siebie siłami elektrycznymi o wartości wprost proporcjonalnej do iloczynu ich ładunków, a odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi.

Matematycznie tę zależność można wyrazić wzorem:

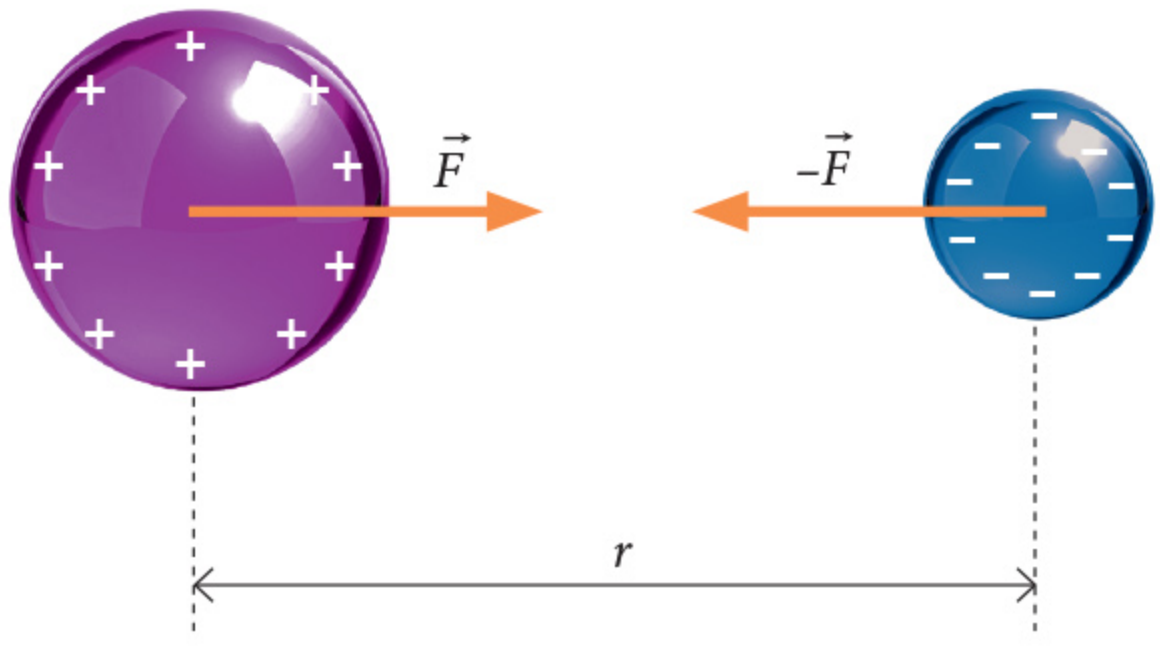
$$F = k\frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \qquad (1)$$

gdzie:
$q_1$, $q_2$ – ładunki oddziałujących ze sobą cząstek,
$r$ – odległość między cząstkami.

Współczynnik $k$ jest pewną stałą, którą można wyznaczyć tylko doświadczalnie. Dla ładunków znajdujących się w powietrzu lub w próżni jej wartość wynosi:

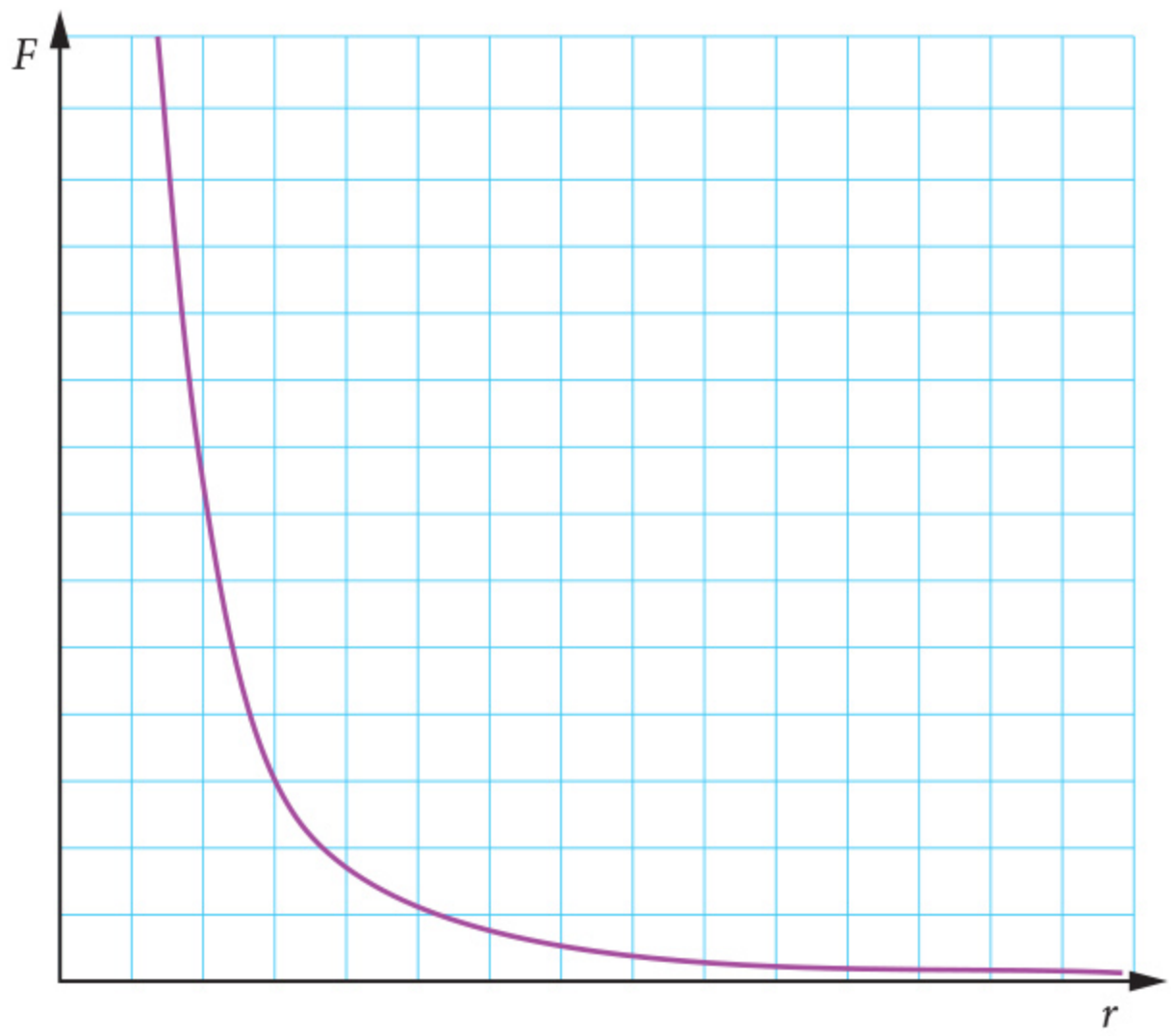
$$k \approx 9 \cdot 10^9 \ \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{C}^2}$$

Jednostka stałej $k$ jest dobrana tak, by siła była wyrażona w niutonach. Wzór (1) pozwala obliczyć siłę między dwiema naładowanymi cząstkami punktowymi. Można go stosować również do dwóch sfer lub kul z równomiernie rozłożonym ładunkiem; w tym przypadku $r$ to odległość między środkami tych sfer lub kul (ryc. 3.2). Ze względu na wielkość stałej $k$ nawet małe ładunki działają na siebie dużymi siłami, wywołującymi widoczne efekty.




**Ryc. 3.2.** Siły między dwiema równomiernie naelektryzowanymi kulami

Siły elektryczne między ładunkami szybko maleją wraz z odległością, co dobrze widać na wykresie przedstawionym na rycinie 3.3. Wynika to z prawa Coulomba. Zwróćmy uwagę, że dla niewielkich odległości między ładunkami krzywa jest bardzo stroma, co oznacza, że małe zmiany odległości powodują duże zmiany wartości siły.

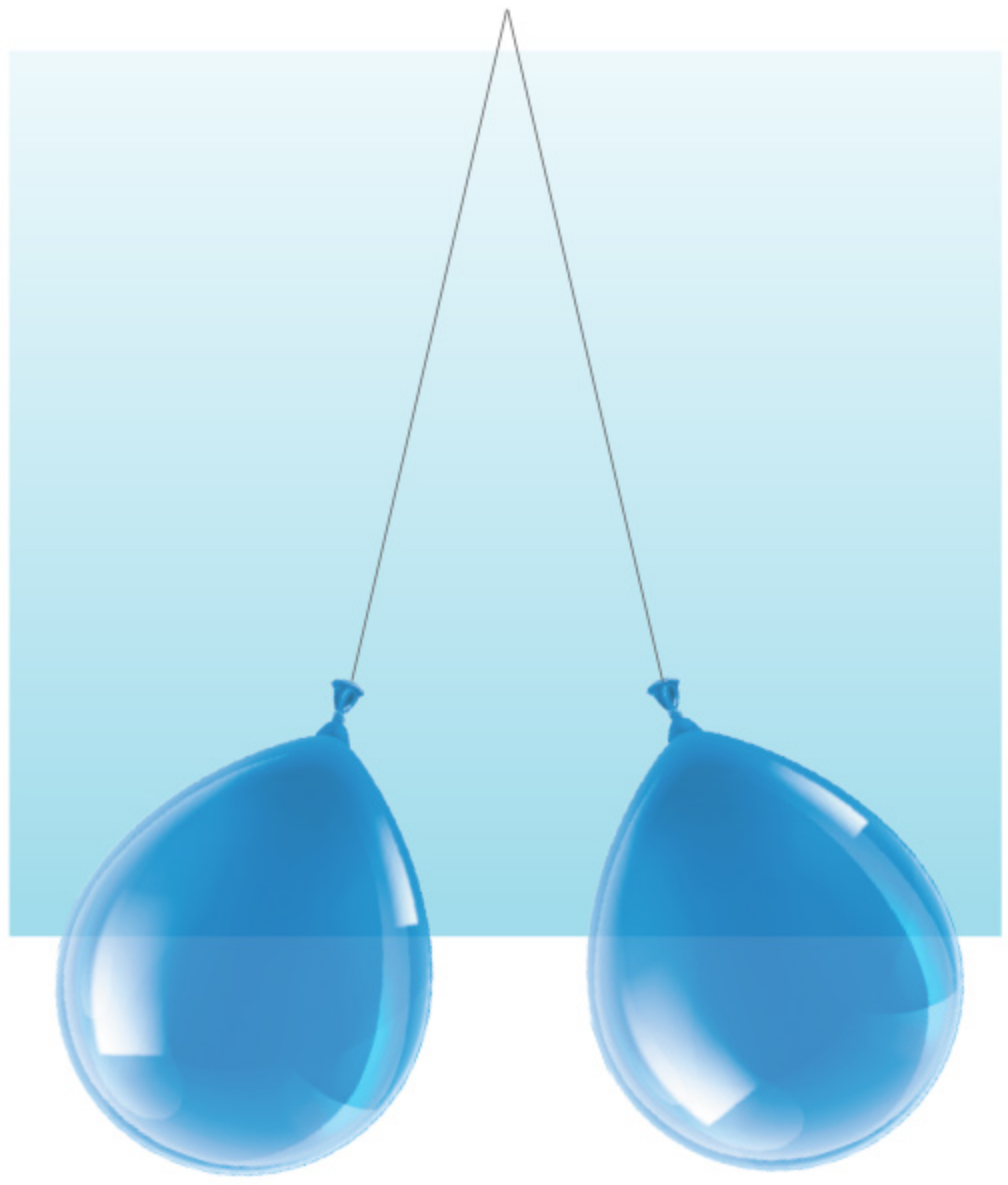



**Ryc. 3.3.** Wykres zależności wartości sił między dwoma ładunkami od ich wzajemnej odległości

F

**PRZYKŁAD 1.**

Oszacujmy, jaki ładunek uzyskują balony podczas elektryzowania. Przyjmijmy, że naelektryzowane balony odpychają się siłą 0,01 N, gdy znajdują się w odległości 0,5 m od siebie. Załóżmy, że ładunek na obu balonach jest taki sam oraz jest rozmieszczony równomiernie na ich powierzchni. Tak wcale nie musi być, dlatego wyniki uzyskane z prawa Coulomba potraktujemy tylko jako szacunkowe.



Do wzoru (1) podstawiamy $q_1 = q_2 = q$, a następnie przekształcamy go do postaci:

$$q^2 = \frac{Fr^2}{k}$$

$$q = r\sqrt{\frac{F}{k}} = 0{,}5\ \text{m} \cdot \sqrt{\frac{0{,}01\ \text{N}}{9 \cdot 10^9\ \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}}} \approx 0{,}5\ \text{m} \cdot \sqrt{10^{-12}\ \frac{\text{C}^2}{\text{m}^2}} = 5 \cdot 10^{-7}\ \text{C}$$

s. 335

Wynik obliczeń pozwala na stwierdzenie, że w typowych zjawiskach elektryzowania ciał mamy do czynienia z bardzo małymi ładunkami (scenariusz doświadczenia 1, s. 335).

**PRZYKŁAD 2.**

Atom wodoru istnieje dzięki elektrycznemu przyciąganiu elektronu i protonu, jednak te cząstki przyciągają się również siłą grawitacji. Która z tych sił jest większa i ile razy?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, najlepiej obliczyć stosunek siły elektrycznej do siły grawitacji. Ponieważ w tym przypadku $|q_1 \cdot q_2| = e^2$ (gdzie $e$ to ładunek elementarny), to:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k\frac{e^2}{r^2}}{G\frac{m_p \cdot m_e}{r^2}} = \frac{ke^2}{Gm_p m_e}$$

Okazuje się, że stosunek wartości tych sił nie zależy od odległości między cząstkami.

Podstawiamy wartości:

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

$$m_p = 1{,}7 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

$$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$$

$$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}}$$

i otrzymujemy:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{9 \cdot 10^9\ \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C})^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{kg^2}} \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}} \approx 2 \cdot 10^{39}$$

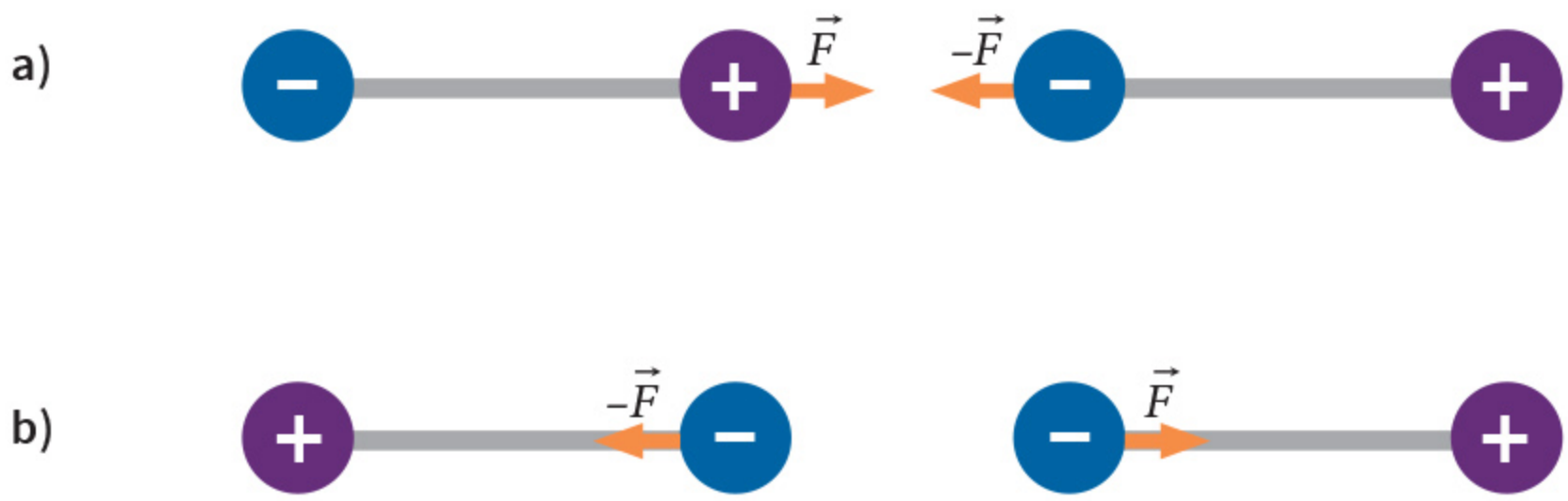
Otrzymany wynik oznacza, że w zjawiskach atomowych siła grawitacji jest pomijalnie mała.

## Oddziaływanie dwóch dipoli

Przeanalizujmy oddziaływanie dwóch takich samych dipoli, ustawionych wzdłuż jednej prostej.

Każda para ładunków działa na siebie siłami elektrycznymi zgodnie z prawem Coulomba. Spójrzmy na rycinę 3.4a. Na każdy z ładunków jednego dipola działają dwie siły pochodzące od ładunków drugiego dipola. Siły elektryczne szybko maleją z odległością, dlatego gdy dipole są blisko siebie, siły przyciągające między najbliższymi ładunkami są wyraźnie większe od pozostałych i to one wnoszą największy wkład w siłę wypadkową. Oznacza to, że w tej sytuacji dipole przyciągają się wzajemnie.

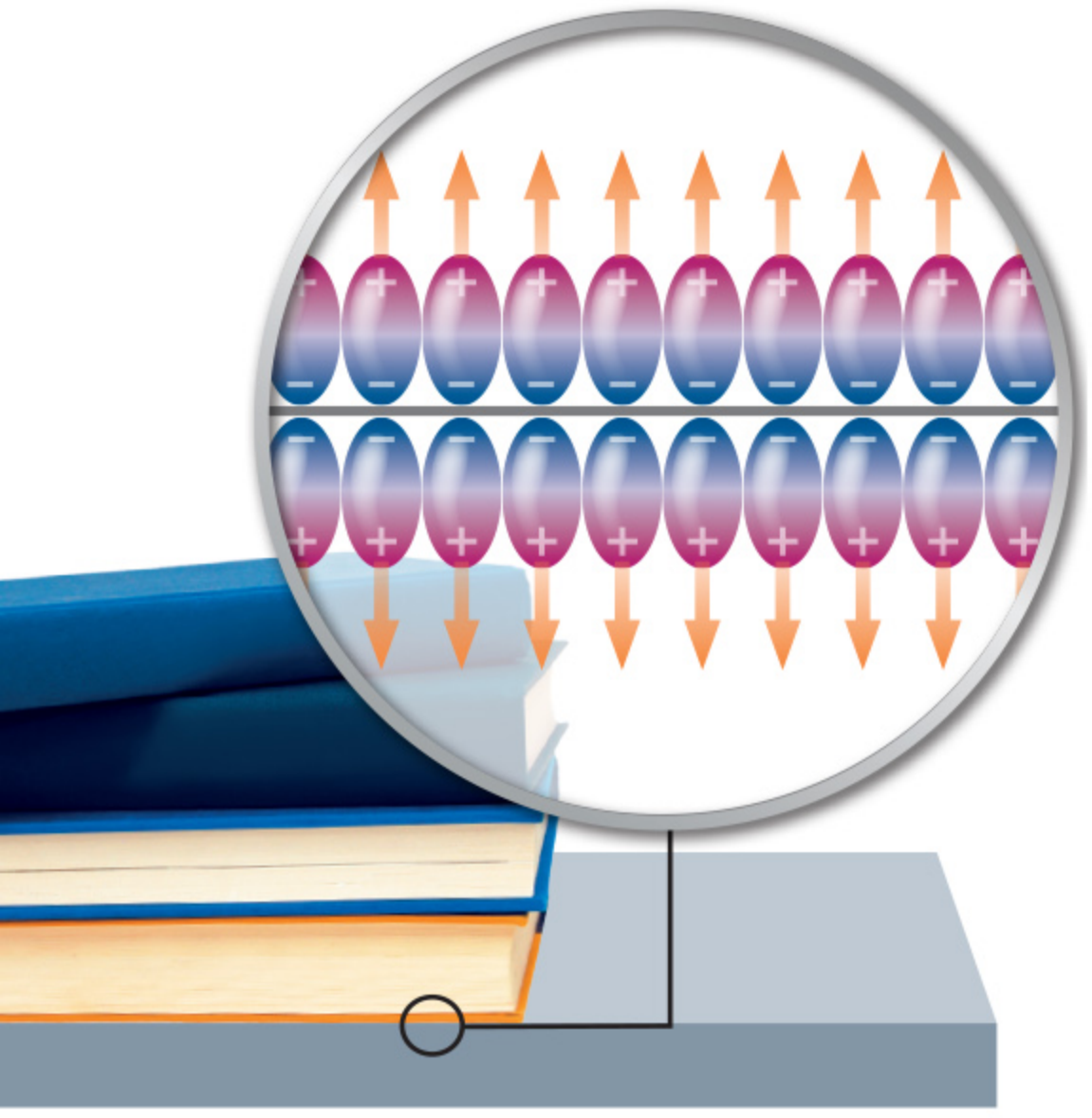
Dipole mogą się również odpychać. Popatrzmy na rycinę 3.4b. W tym przypadku najbliżej siebie są ładunki ujemne, które silnie się odpychają.




**Ryc. 3.4.** Dwa dipole przyciągają się (a) lub odpychają (b) w zależności od ich wzajemnego ustawienia

A jak oddziałują ze sobą dipole znajdujące się daleko od siebie? Praktycznie wcale nie oddziałują. Przy dużych odległościach między dipolami długość tych cząsteczek – w stosunku do ich wzajemnej odległości – jest bardzo mała, więc można ją pominąć. Wobec tego dipole zachowują się wówczas jak obiekty bez ładunku (całkowity ładunek dipola jest równy zeru).

W każdym atomie i w każdej cząsteczce są pary przeciwnych ładunków (proton i elektron), zatem wszystkie atomy w pobliżu siebie stają się dipolami. Nasz prosty model oddziaływania dwóch dipoli pozwala się domyślić, że siły międzycząsteczkowe mają naturę elektryczną.



**Ryc. 3.5.** Wszystkie obiekty na biurku leżą na nim dzięki elektrycznemu odpychaniu się atomów i cząsteczek

Duże siły odpychające działające między stykającymi się ze sobą cząsteczkami powodują nieściśliwość ciał stałych i cieczy. Z kolei przyciąganie oddalających się od siebie cząsteczek jest przyczyną spójności ciał stałych i cieczy, ale zmniejszanie się siły wraz z odległością umożliwia szybszym cząsteczkom ucieczkę (parowanie). Siły o takich właściwościach powodują nieustanne drgania cząsteczek ciał stałych i cieczy.

Prawie wszystkie cechy otaczających nas ciał mają swoje źródło w siłach elektrycznych między cząsteczkami, których wnętrza są niemal zupełnie puste. Odczuwalna twardość ciał wynika z elektrycznego odpychania się cząsteczek. Na krześle można siedzieć tylko z powodu silnego odpychania się cząsteczek ciała człowieka i cząsteczek krzesła.

## PODSUMOWANIE

- **Prawo Coulomba:** każde dwie cząstki naładowane działają na siebie siłami elektrycznymi o wartości wprost proporcjonalnej do iloczynu ich ładunków, a odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi.

$$F = k\frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2}$$

- Dwa dipole przyciągają się lub odpychają w zależności od ich wzajemnego ustawienia.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Oblicz siłę, jaką odpychają się dwie kulki o ładunku $-4 \cdot 10^{-7}$ C każda, znajdujące się w odległości 2 m od siebie. F

2. Przerysuj rysunek do zeszytu (zauważ, że ładunek ujemny nie jest pośrodku), zaznacz na nim siły działające na ładunek ujemny oraz siłę wypadkową. Wszystkie trzy ładunki mają tę samą wartość bezwzględną.

3. Dwie naelektryzowane kulki działały na siebie siłą 0,18 N. Potem zbliżono je do siebie na odległość trzykrotnie mniejszą od początkowej. Jaką siłą zaczęły działać wówczas na siebie kulki? Uzasadnij odpowiedź. F

4. Przerysuj rysunek do zeszytu. Narysuj siły, jakimi ładunki jednego dipola działają na ładunki drugiego. Jak ustawią się te dipole, jeśli mogą się obracać wokół swoich środków, które nie mogą się przemieszczać? Wskazówka: uwzględnij, że siły mają różną wartość.

5. Jaka siła musi działać na dwa ładunki o wartości +1 C i –1 C odległe od siebie o 1 m, żeby je utrzymać w spoczynku? Jaką masę ma ciało o ciężarze takim jak obliczona siła? F

# 4. Pole elektryczne

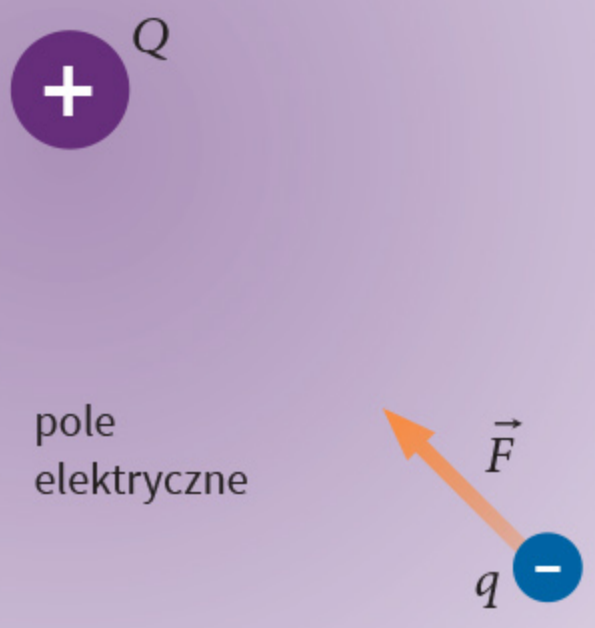
- Pole elektryczne
- Linie pola elektrycznego
- Pole elektryczne układu ładunków

➔ **Przypomnij sobie** prawo Coulomba i pojęcie dipola elektrycznego.

Z prawa Coulomba wynika, że dwa ładunki elektryczne oddziałują ze sobą z dowolnej odległości. Skąd jeden ładunek „wie" o obecności drugiego i jak może działać na niego siłą na odległość?

## Pole elektryczne

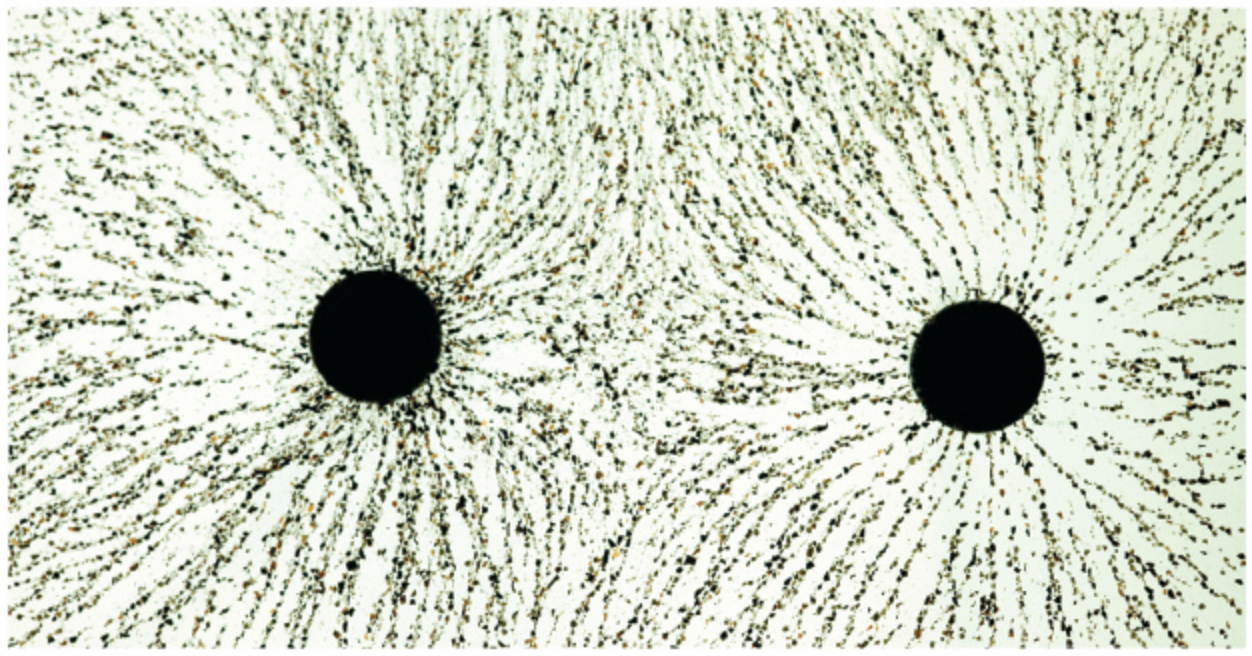
Przeanalizujmy sytuację, w której duży ładunek $Q$ działa siłą na mały ładunek $q$ (ryc. 4.1). Gdy ładunek $Q$ się przesunie, siła działająca na ładunek $q$ się zmieni. W jaki sposób informacja o przesunięciu ładunku $Q$ dociera do ładunku $q$? Prace fizyków w XIX wieku – przede wszystkim Faradaya i Maxwella – dały na to pytanie odpowiedź zmieniającą zasadniczo nasze rozumienie przyrody. Okazało się, że Wszechświat jest wypełniony nie tylko ciałami składającymi się z cząstek, ale także różnymi rodzajami pól, m.in. polami elektrycznymi i magnetycznymi.




**Ryc. 4.1.** Ładunek $Q$ działa siłą na ładunek $q$ za pośrednictwem pola elektrycznego

Każdy ładunek elektryczny wytwarza wokół siebie **pole elektryczne**. Pole elektryczne działa siłą na ładunki, które się w nim znajdują.

Oznacza to, że obecność ładunku elektrycznego zmienia właściwości przestrzeni, która go otacza. Gdy w polu elektrycznym znajdzie się inny ładunek, zadziała na niego siła elektryczna. Pola nie widać bezpośrednio, podobnie jak nie widać powietrza. O ruchu powietrza świadczy np. obserwacja rozchodzenia się dymu. Podobnie w niektórych sytuacjach można uzyskać obraz pola elektrycznego (ryc. 4.2).



**Ryc. 4.2.** Pieprz rozsypany w oleju w pobliżu ładunków elektrycznych nie układa się chaotycznie. Pokazuje nam obraz pola elektrycznego

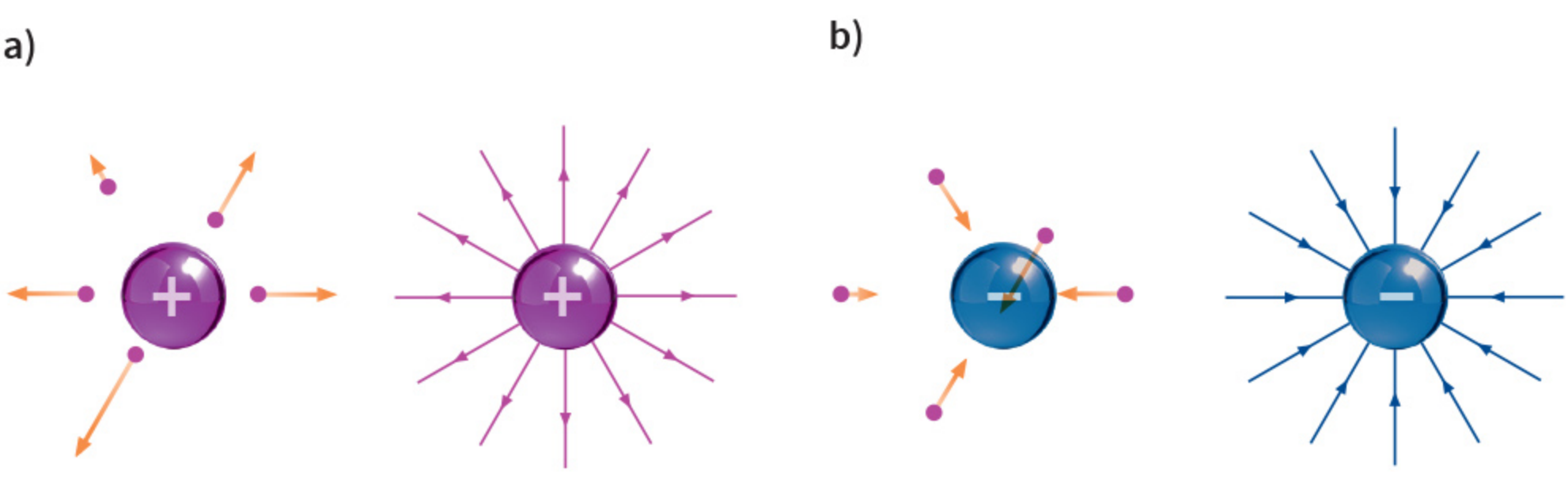
Teraz na oddziaływanie między ładunkami $Q$ i $q$ można spojrzeć inaczej: ładunek $Q$ jest źródłem pola elektrycznego wypełniającego przestrzeń wokół niego (ryc. 4.1). Z kolei pole działa siłą na ładunek $q$ znajdujący się w tej przestrzeni. Cechy tej siły opisuje prawo Coulomba.

## Linie pola elektrycznego

Jak rozpoznać, czy znajdujemy się w polu elektrycznym? Do sprawdzenia obecności pola może posłużyć niewielki ładunek elektryczny, tzw. **ładunek próbny**, który zgodnie z umową jest dodatni. Jeśli działa na niego siła elektryczna – jest w polu elektrycznym. Gdy umieścimy ten ładunek kolejno w różnych miejscach pola i wyznaczymy zwrot działającej na niego siły, zbadamy „strukturę" tego pola. Możemy ją przedstawić za pomocą linii pola elektrycznego.

**Linie pola elektrycznego** pokazują kierunek i zwrot siły elektrycznej działającej na dodatni ładunek próbny umieszczony w danym punkcie pola elektrycznego.

Na rycinie 4.3 przedstawiono siły działające na ładunek próbny umieszczony w polu elektrycznym i linie pola elektrycznego wokół pojedynczych ładunków: dodatniego i ujemnego.

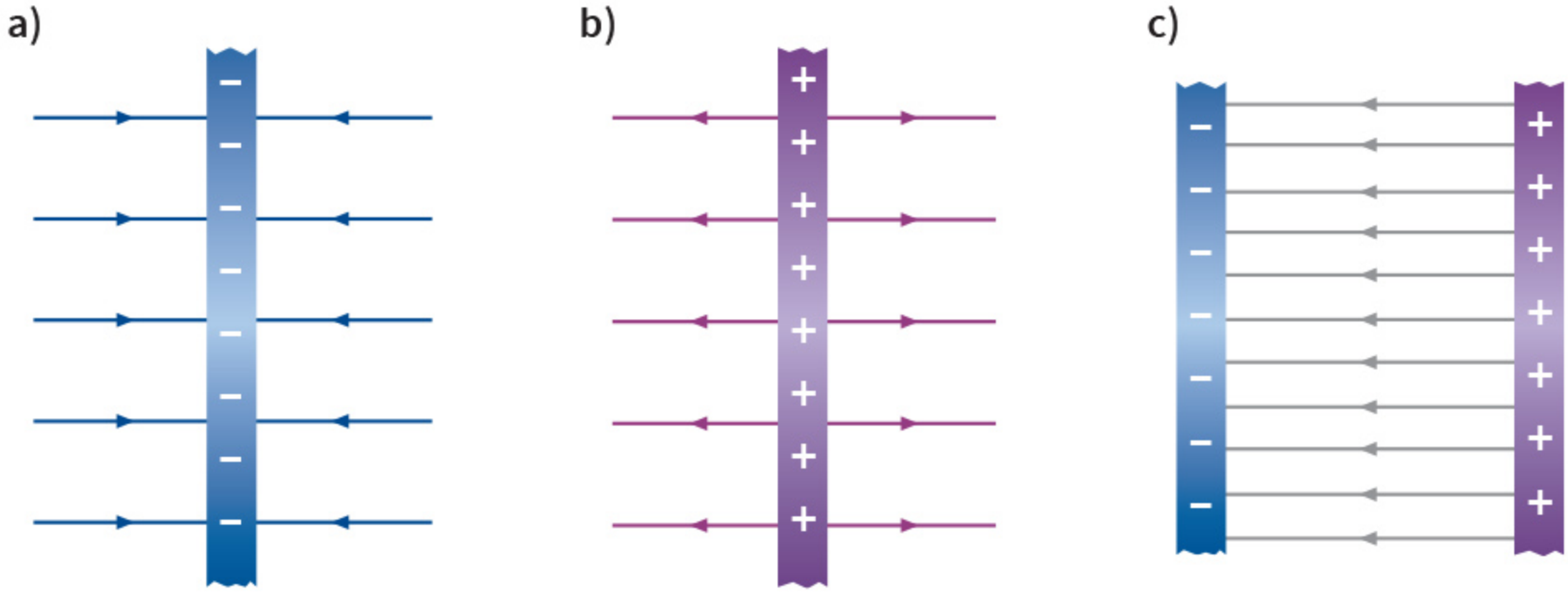



**Ryc. 4.3. a)** Siły działające na ładunek próbny umieszczony w polu wytworzonym przez ładunek dodatni i linie pola wokół ładunku dodatniego. **b)** Siły działające na ładunek próbny umieszczony w polu wytworzonym przez ładunek ujemny i linie pola wokół ładunku ujemnego

Ładunek próbny jest odpychany od dodatniego źródła pola, dlatego linie pola promieniście wychodzą z niego i są skierowane na zewnątrz. Gdy źródłem pola jest ładunek ujemny, przyciąga on ładunek próbny z każdego miejsca, dlatego linie pola są w tym przypadku skierowane do źródła pola.
Linie pola pokazują kierunek i zwrot działającej siły elektrycznej. Dzięki rysunkowi linii pola można też porównywać jakościowo wartości sił. Z prawa Coulomba wynika, że im bliżej źródła pola jest ładunek próbny, tym większa działa na niego siła, czyli pole jest silniejsze. Mówimy, że w tym miejscu pole ma większe natężenie. Na rycinie 4.3 widać, że im bliżej jesteśmy kulistego źródła pola, tym bardziej zagęszczają się linie pola. **Większe zagęszczenie linii pola oznacza większe jego natężenie w danym miejscu** (ryc. 4.5).

## Pole elektryczne wielu ładunków

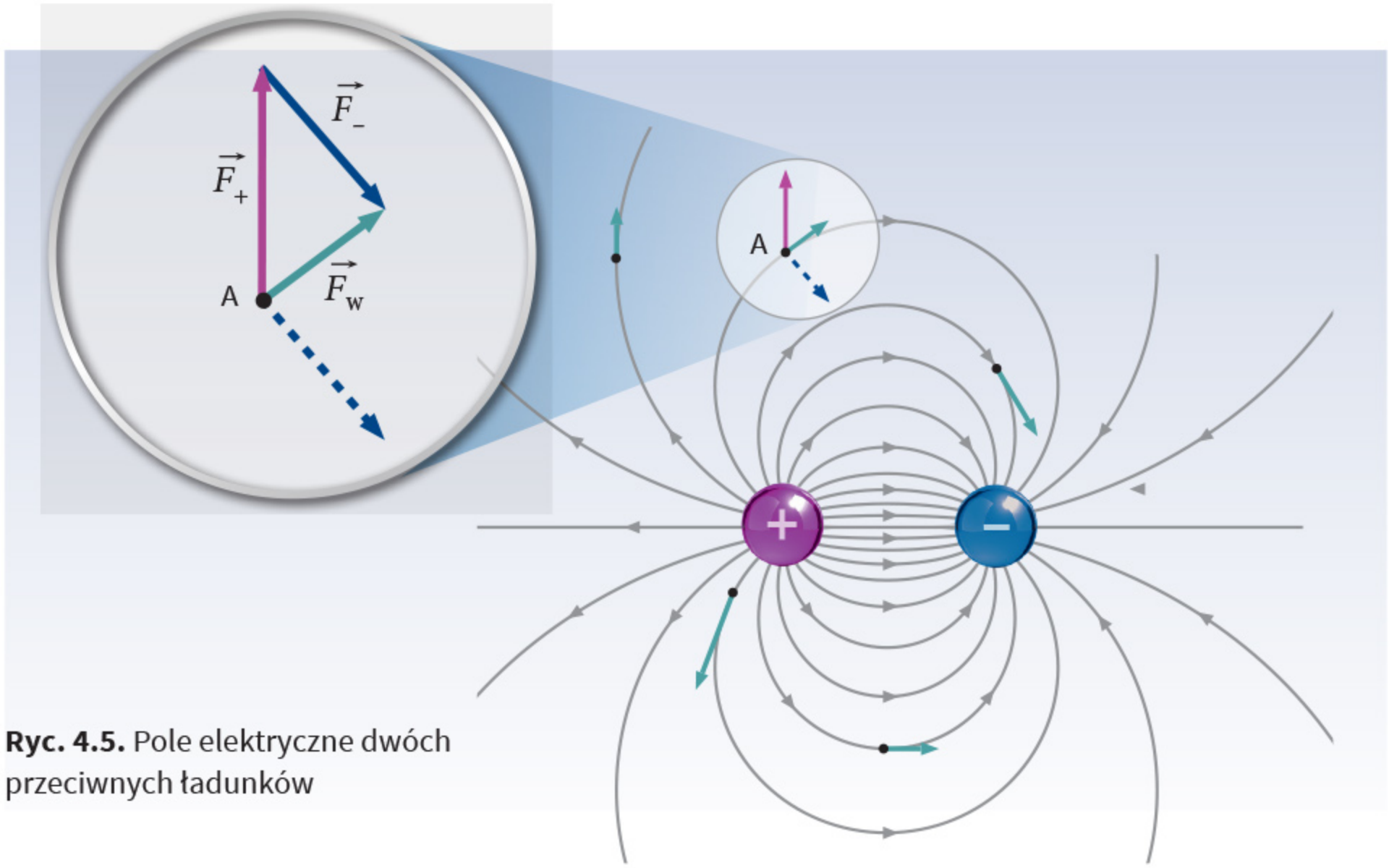
Jak wyglądają linie pola elektrycznego wytwarzanego przez wiele ładunków jednocześnie? Ryciny 4.4a i b pokazują linie pola wytwarzanego przez duże, jednorodnie naelektryzowane płyty, ustawione prostopadle do powierzchni rysunku. Przebieg linii tego pola wskazuje, że ładunek dodatni jest przyciągany do płyty ujemnej, a odpychany od płyty dodatniej. Siła działająca na ten ładunek jest w każdym punkcie pola prostopadła do płyt, a linie pola są równoległe (pomijamy obszar końcowy płyt, gdzie kształt linii pola jest bardziej skomplikowany). W takim obszarze natężenie pola jest stałe, czyli w każdym punkcie na ładunek próbny działa taka sama siła. Takie pole nazywamy **jednorodnym**.




**Ryc. 4.4.** Linie pola wytworzonego przez: **a)** dużą jednorodnie naelektryzowaną ujemnie pytę, **b)** jednorodnie naelektryzowaną dodatnio płytę, **c)** dwie równoległe płyty naładowane różnoimiennie

Z kolei pole wytwarzane przez dwie duże płyty o przeciwnym ładunku, położone blisko siebie, jest ograniczone tylko do obszaru między płytami (ryc. 4.4c). Wewnątrz pole jest jednorodne (pomijamy krańce płyt), na zewnątrz pola zaś nie ma w ogóle. Jak to możliwe? Pole elektryczne tego układu jest złożeniem pól pochodzących od dwóch takich płyt, jak na rycinach 4.4a i b. W obszarze między płytami linie obu pól są zgodne, czyli siły, którymi płyty działają na ładunek próbny, mają taki sam zwrot. Można powiedzieć, że wspólne pole ma dwukrotnie większe natężenie niż pole pochodzące od jednej płyty.

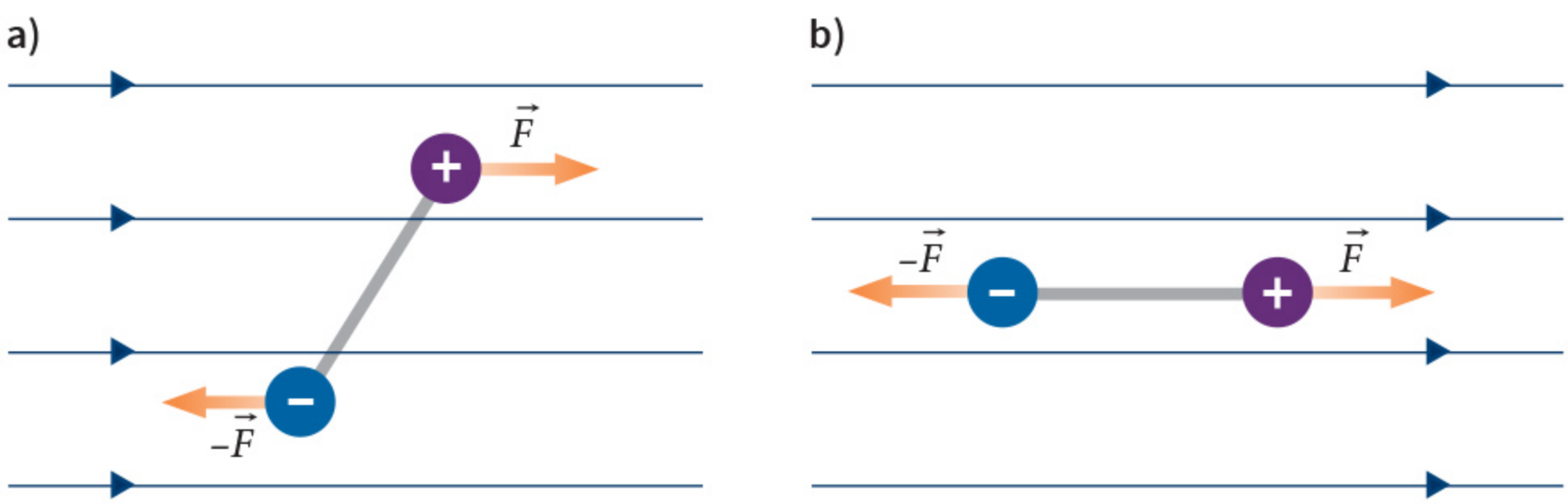
W obszarze na zewnątrz linie obu pól mają przeciwne zwroty, czyli siła wypadkowa działająca na ładunek próbny jest równa zeru. Wobec tego w tym obszarze pola nie ma. Na rycinie 4.5 przedstawiono pole elektryczne dipola (układu dwóch przeciwnych ładunków). W tym przypadku linie pola wskazują kierunek i zwrot wypadkowej siły działającej na ładunek próbny (na ryc. 4.5 umieszczony np. w punkcie A). Wektor siły wypadkowej jest styczny do linii pola w danym punkcie (zielony wektor na rycinie 4.5).




**Ryc. 4.5.** Pole elektryczne dwóch przeciwnych ładunków

## Dipol w polu elektrycznym

Wiemy już, że cząsteczki zachowują się pod względem elektrycznym jak dipole. A jak dipol zachowuje się w polu elektrycznym? Taką sytuację przedstawia ryc. 4.6a. Siły działające ze strony pola elektrycznego na dwa ładunki dipola mogą spowodować jego obrót. Gdy dipol ustawi się zgodnie z liniami pola (czyli równolegle do linii pola i z ładunkiem dodatnim dipola znajdującym się po stronie wskazywanej przez te linie), para sił będzie działała wzdłuż osi dipola, więc nie będzie go już obracać, tylko rozciągać (ryc. 4.6b). **Dipole mające swobodę ruchu ustawiają się zgodnie z liniami pola elektrycznego.**




**Ryc. 4.6.** Dipol w polu elektrycznym ustawia się zgodnie z liniami pola, czyli zgodnie z działaniem sił elektrycznych

To wyjaśnia powstawanie obrazu linii pola elektrycznego jak na rycinie 4.2. Drobiny pieprzu w polu elektrycznym zachowują się jak dipole – ustawiają się zgodnie z liniami pola, przyciągają się i tworzą obraz tych linii.

**DOŚWIADCZENIE 1.**

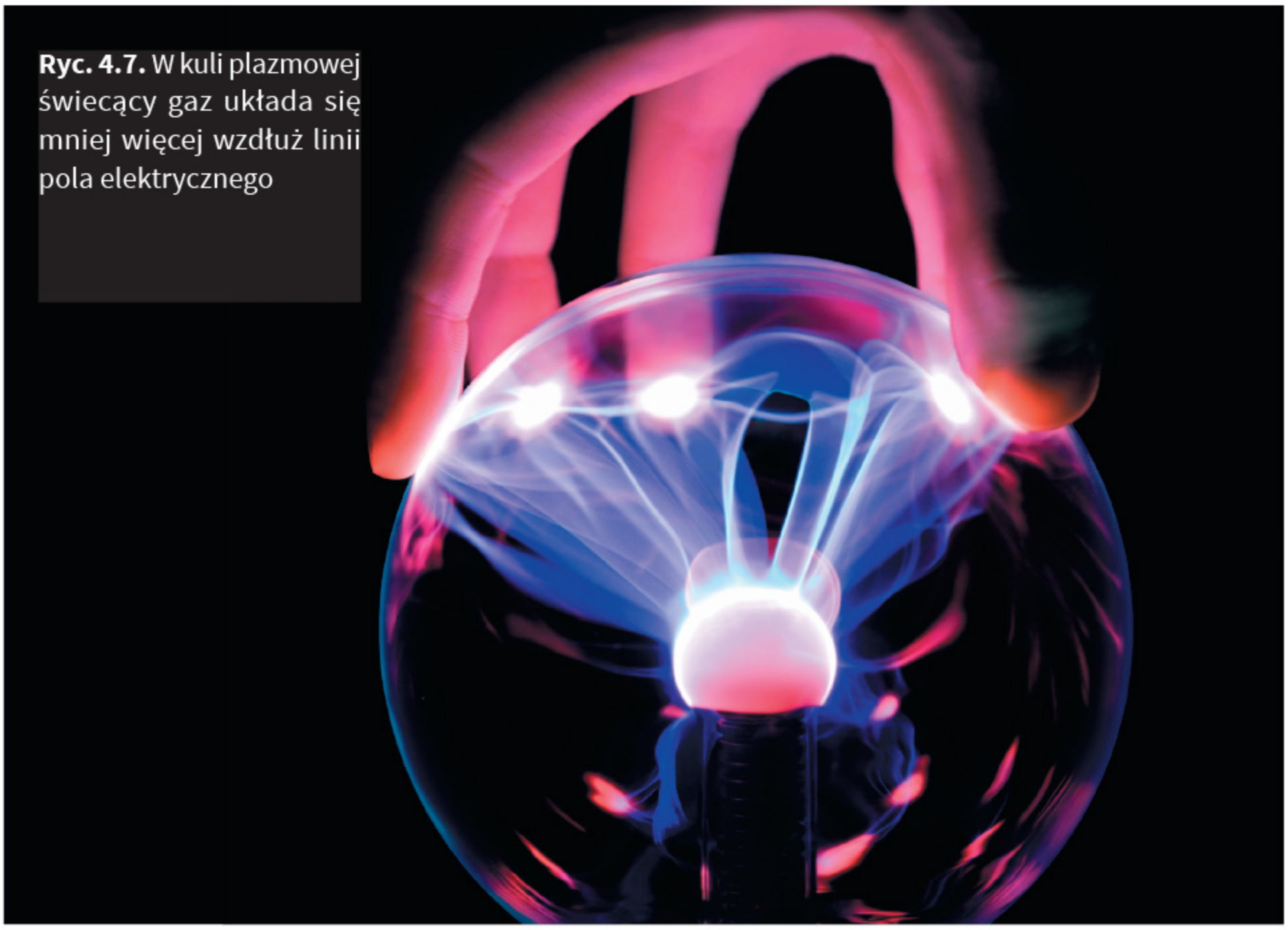
Do wykonania doświadczenia potrzebne będą: piłka tenisowa (lub inna kula podobnej wielkości), folia aluminiowa, kawałki nici, klej oraz plastikowa rura (może być od odkurzacza).

Piłkę tenisową owiń równomiernie folią aluminiową. Do folii przyklej w różnych miejscach kilka kawałków nici (nici powinny mieć ok. 5 cm długości). Ustaw piłkę na izolującej podstawce (może to być świeczka). Naelektryzuj rurę np. przez tarcie, a następnie za jej pomocą naelektryzuj piłkę. Opisz uzyskany efekt.

Pola elektryczne pochodzące od wielu ładunków są nieraz bardzo skomplikowane, jednak w każdym przypadku zasady dotyczące rysowania linii pola są takie same.

1. Linie pola zaczynają się od ładunków dodatnich i kończą na ładunkach ujemnych.
2. Gdy źródłem pola jest układ wielu ładunków, każdy z nich działa siłą na ładunek próbny, jednak siła wypadkowa jest tylko jedna, a linie pola pokazują jej kierunek i zwrot.
3. Linie pola nigdy się nie przecinają.

Pola elektryczne wypełniają przestrzeń wokół nas, również przestrzeń kosmiczną. W niektórych przypadkach można je nawet zobaczyć (ryc. 4.7). Różne efekty ich występowania zostaną przedstawione w kolejnych rozdziałach podręcznika.



**Ryc. 4.7.** W kuli plazmowej świecący gaz układa się mniej więcej wzdłuż linii pola elektrycznego

## PODSUMOWANIE

- Każdy ładunek elektryczny wytwarza **pole elektryczne**, które działa siłą na inne ładunki.
- **Linie pola elektrycznego** wskazują kierunek i zwrot siły działającej na ładunek dodatni umieszczony w danym punkcie.
- Linie pola zaczynają się na ładunkach dodatnich i kończą na ładunkach ujemnych.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Narysuj siłę działającą na ładunek ujemny umieszczony w trzech różnych, dowolnie wybranych punktach pól przedstawionych na rycinach 4.4a i b.
2. W których obszarach pole elektryczne wytwarzane przez dipol jest najsilniejsze, a w których najsłabsze? Uzasadnij odpowiedź.
3. Narysuj linie pola elektrycznego, którego źródłem jest długi pręt z równomiernie rozmieszczonym ładunkiem ujemnym. Przedstaw sytuację z boku (pręt leży w płaszczyźnie rysunku) i z góry (pręt prostopadły do płaszczyzny rysunku).
4. Narysuj schematycznie linie pola wytwarzanego przez dwa takie same ładunki ujemne, leżące w pewnej odległości od siebie. Skorzystaj z ryciny 4.2.
5. Czy dipol umieszczony w niejednorodnym polu elektrycznym zgodnie z liniami pola pozostanie w spoczynku? Zakładamy, że ma swobodę ruchu. Uzasadnij odpowiedź.

# 5. Napięcie elektryczne

- Energia elektryczna i potencjał elektryczny
- Napięcie elektryczne
- Praca pola elektrycznego

➔ **Przypomnij sobie** zasadę zachowania energii oraz to, jak się oblicza pracę.

Pole elektryczne działa siłą na cząstki naładowane, zatem ma energię. Właśnie dzięki energii elektrycznej działają niemal wszystkie urządzenia, z których korzystamy na co dzień.

## Energia pola i potencjał elektryczny

Burze są efektownym pokazem energii elektrycznej w przyrodzie (ryc. 5.1). Na co dzień z energii pola elektrycznego korzystamy w sposób nieco mniej spektakularny, np. gdy wykorzystujemy prąd elektryczny do zasilania różnych urządzeń domowych.

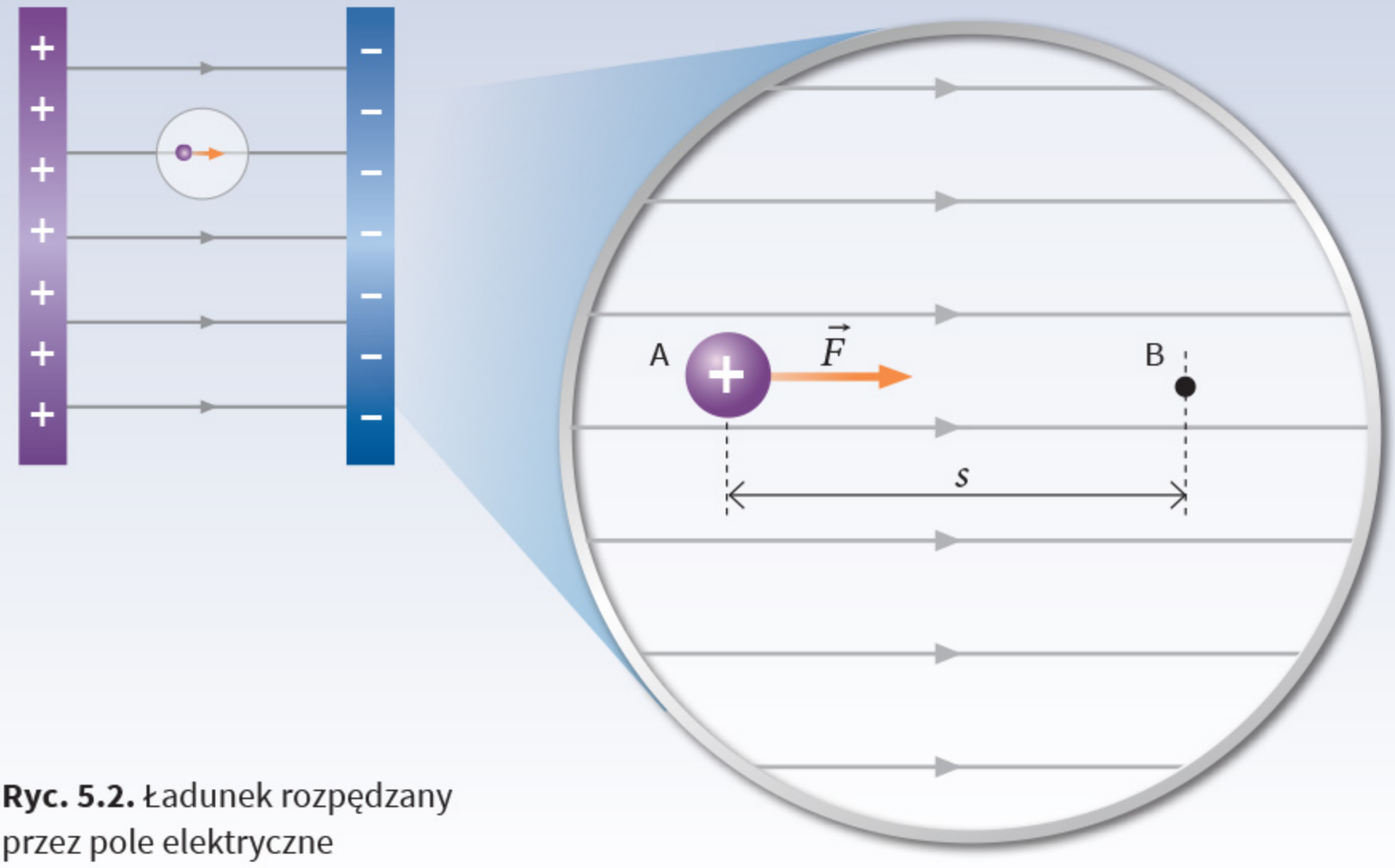
**Ryc. 5.1.** Burza jest przejawem istnienia energii elektrycznej w przyrodzie

Spróbujmy bardziej precyzyjnie opisać energię elektryczną. Gdy umieścimy dodatni ładunek $q$ w jednorodnym polu elektrycznym, zacznie na niego działać siła elektryczna (ryc. 5.2). Ładunek będzie więc przyspieszany wzdłuż linii pola zgodnie z ich zwrotem, a zatem jego energia kinetyczna będzie rosła.

Z zasady zachowania energii wynika, że przy wzroście energii jednego rodzaju inny jej rodzaj musi zmaleć. Ładunek umieszczony w polu elektrycznym ma **potencjalną energię elektryczną** $E_e$. Wobec tego wzrost energii kinetycznej ładunku między punktami A i B pola elektrycznego (ryc. 5.2) jest równy zmniejszeniu jego energii potencjalnej:

$$\Delta E_k = E_{eA} - E_{eB}$$

To znaczy, że gdy ładunek dodatni porusza się wzdłuż linii pola, jego energia elektryczna maleje.




**Ryc. 5.2.** Ładunek rozpędzany przez pole elektryczne

Energia elektryczna ładunku jest wprost proporcjonalna do jego wartości. Energia ta zależy także od samego pola. Wielkością charakteryzującą pole elektryczne jest **potencjał elektryczny**, oznaczany symbolem $V$. Potencjał pola w danym punkcie określa, jaką energię elektryczną ma w tym punkcie ładunek +1 C. Jednostką potencjału jest wolt $\left(1\ \text{V} = \frac{1\ \text{J}}{1\ \text{C}}\right)$. Potencjał w danym punkcie pola wynosi 1 V, jeśli umieszczony tam ładunek +1 C ma energię elektryczną 1 J.

Jeśli znamy potencjał $V$ w danym punkcie pola, możemy obliczyć energię elektryczną $E_e$ ładunku $q$ w tym punkcie ze wzoru:

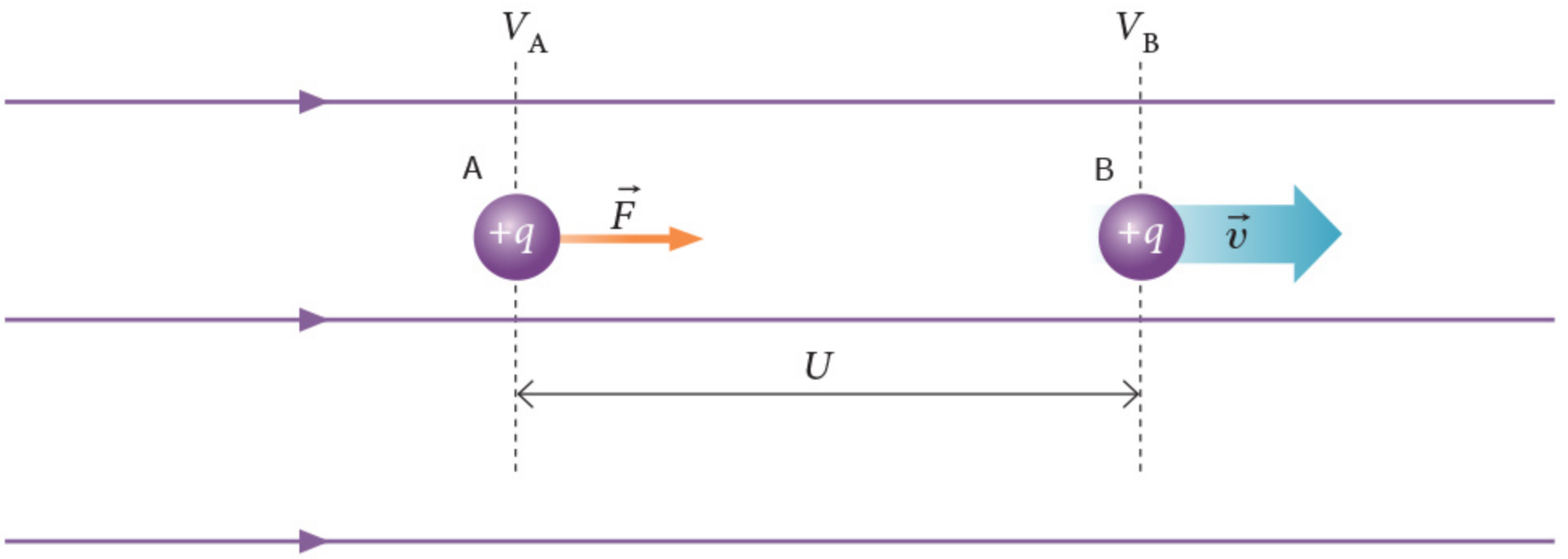
$$E_e = qV \tag{1}$$

Gdy ładunek dodatni porusza się wzdłuż linii pola, jego energia elektryczna maleje – stąd wniosek, że wzdłuż linii pola potencjał również maleje.

## Napięcie elektryczne

Gdy ładunek dodatni porusza się wzdłuż linii pola od punktu A do punktu B, jego energia kinetyczna rośnie dzięki pracy pola, natomiast jego energia potencjalna maleje (ryc. 5.3):

$$W = \Delta E_k = E_{eA} - E_{eB}$$




**Ryc. 5.3.** Pole wykonuje pracę podczas przemieszczania ładunku między punktami o różnych potencjałach. Potencjał w punkcie A jest większy niż w punkcie B

Jeśli do tego wzoru podstawimy zależności (wynikające ze wzoru (1)):

$$E_{eA} = qV_A$$

$$E_{eB} = qV_B$$

i wyłączymy $q$ przed nawias, uzyskamy:

$$W = q(V_A - V_B)$$

Różnicę potencjałów nazywamy **napięciem elektrycznym**.

Napięcie oznacza się symbolem $U$. Pracę wykonaną nad ładunkiem przez pole elektryczne zapiszemy wówczas wzorem:

$$W = qU \qquad (2)$$

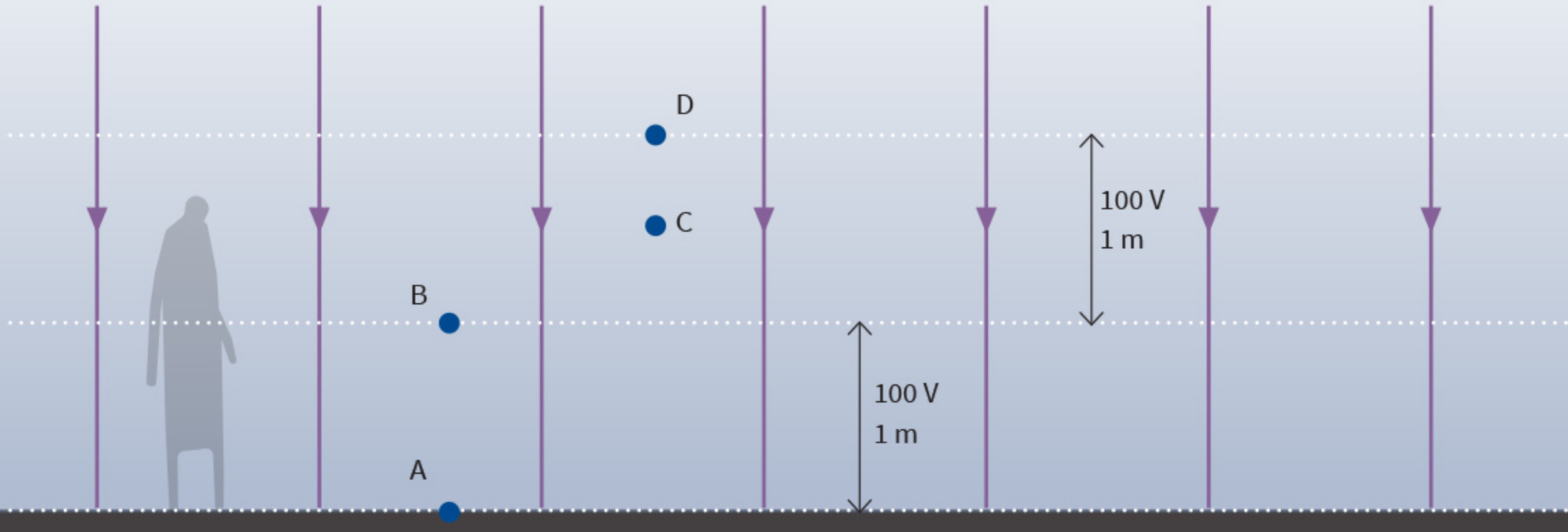
Ze wzoru (2) wynika, że pole elektryczne wykonuje pracę przy przemieszczaniu ładunku między punktami tylko wtedy, gdy między nimi jest napięcie elektryczne.

Przeskok iskry elektrycznej jest widocznym przykładem energii wydzielonej dzięki pracy pola elektrycznego. Rozpędzone przez pole ładunki elektryczne przekazują energię

otoczeniu i w ten sposób silnie je nagrzewają. Ten efekt wykorzystano w zapalniczce piezoelektrycznej (ryc. 5.4). Na końcu zapalniczki znajdują się dwa ostrza, które w wyniku odkształcania kryształu wewnątrz zapalniczki uzyskują przeciwny ładunek. Napięcie między ostrzami może przekraczać 1000 V. Wyzwolona w postaci iskry energia elektryczna nie może być większa od tej, jaką przekazujemy zapalniczce, gdy palcem naciskamy spust. Jest ona zatem bardzo mała. Z tego powodu mimo wykorzystywania wysokich napięć zapalniczka nie jest niebezpieczna.

Powierzchnia Ziemi jest źródłem pola elektrycznego, które dla niewielkich wysokości możemy traktować jako jednorodne. W tym polu napięcie wynosi ok. 100 V na każdy metr linii pola (ryc. 5.5).

**Ryc. 5.4.** W piezoelektrycznej zapalniczce do np. kuchenki gazowej ładunki rozpędzane są przez pole o wysokim napięciu




**Ryc. 5.5.** Pole elektryczne przy powierzchni Ziemi

**PRZYKŁAD 1.**

Jakie informacje możemy odczytać z ryciny 5.5?

1. Linie pola biegną od ładunków dodatnich do ujemnych – stąd wynika, że powierzchnia Ziemi ma ładunek ujemny.
2. Napięcie wzdłuż linii pola wynosi 100 V na każdy metr, zatem np. między punktami A i D wynosi 200 V, bo punkt D jest 2 m wyżej niż punkt A, natomiast między punktami C i D wynosi 50 V.
3. We wszystkich punktach znajdujących się na tej samej białej linii potencjał jest taki sam. Jeśli ładunek jest przemieszczany wzdłuż tej linii, siła elektryczna nie wykonuje nad nim pracy, bo jest prostopadła do przemieszczenia, zatem energia elektryczna tego ładunku się nie zmienia.

**PRZYKŁAD 2.**

Energia potrzebna do zjonizowania cząsteczkowego tlenu wynosi $1{,}9 \cdot 10^{-18}$ J. Jaką minimalną drogę w ziemskim polu elektrycznym powinien przebyć jon dodatni o ładunku elementarnym, żeby uzyskać energię wystarczającą do zjonizowania cząsteczki tlenu?

Energia kinetyczna jonu powinna być co najmniej równa energii potrzebnej do jonizacji. Taką energię kinetyczną jon powinien uzyskać dzięki pracy pola elektrycznego:

$$W = eU$$

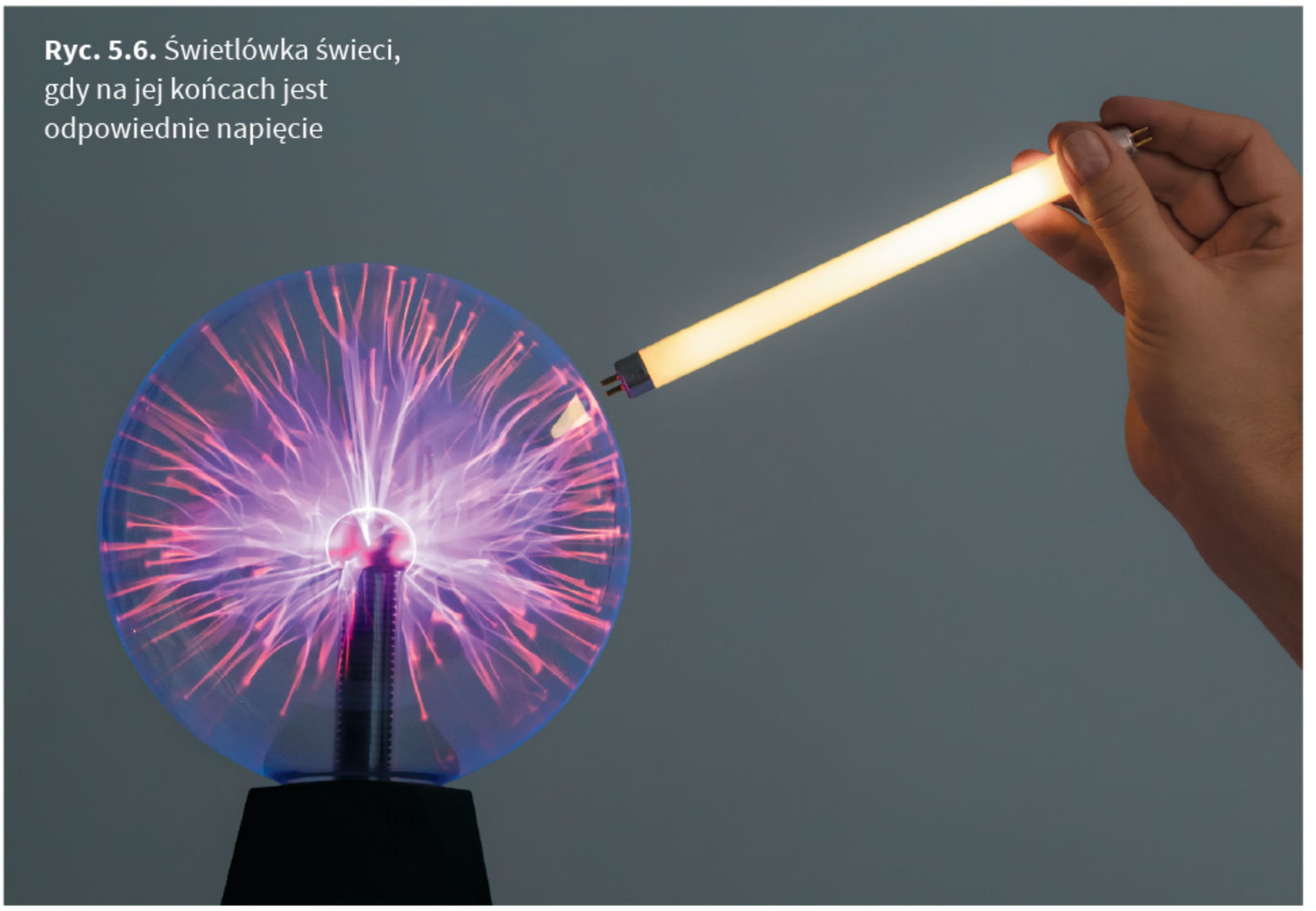
Stąd obliczymy napięcie:

$$U = \frac{W}{e} = \frac{1{,}9 \cdot 10^{-18}\ \text{J}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}} \approx 12\ \text{V}$$

Na podstawie ryciny 5.5 wnioskujemy, że ten jon powinien przebyć drogę ok. 12 cm, jeśli będzie się poruszał zgodnie z liniami ziemskiego pola elektrycznego.

Jednakże w powietrzu każdy jon bardzo często zderza się z cząsteczkami powietrza, a średnia droga przebyta między zderzeniami jest mniejsza niż tysięczna część milimetra. Oznacza to, że jony rozpędzane ziemskim polem elektrycznym nie jonizują cząsteczek powietrza.

Między dwoma różnymi punktami na tej samej linii pola elektrycznego zawsze jest pewne napięcie. Widać to na rycinie 5.6. Kula plazmowa wytwarza wokół siebie silne pole elektryczne. Jeśli ustawimy świetlówkę wzdłuż linii tego pola, jej końce znajdą się w punktach o różnym potencjale, więc między tymi końcami powstanie napięcie powodujące świecenie. Świetlówka nie musi nawet dotykać kuli.



**Ryc. 5.6.** Świetlówka świeci, gdy na jej końcach jest odpowiednie napięcie

## PODSUMOWANIE

- **Potencjał elektryczny** określa energię elektryczną ładunku +1 C w danym punkcie pola. Potencjał w danym punkcie pola wynosi 1 V, jeśli umieszczony tam ładunek +1 C ma energię elektryczną 1 J.
- **Napięcie elektryczne** to różnica potencjałów elektrycznych w dwóch punktach.
- Praca wykonana przez pole elektryczne podczas przemieszczania ładunku jest równa:

$$W = qU$$

## PYTANIA I ZADANIA

1. W którą stronę są przyspieszane przez ziemskie pole elektryczne jony dodatnie, a w którą ujemne? Czy ich ruch na drodze 1 m jest zawsze jednostajnie przyspieszony? Skorzystaj z informacji w przykładzie 2.
2. Czy w sytuacji z ryciny 5.6 tak samo jasno świeciłaby świetlówka ustawiona w przybliżeniu prostopadle do linii pola? Uzasadnij odpowiedź.
3. Jon tlenu o ładunku elementarnym powinien być rozpędzony w polu o napięciu 12 V, by uzyskać energię potrzebną do zjonizowania innej cząsteczki tlenu wskutek zderzenia. Między metalowymi kulkami odległymi o 1 mm wytworzono pole elektryczne o napięciu 5000 V. Jaką drogę wzdłuż linii tego pola powinien przebyć jon tlenu, żeby wskutek zderzenia mógł zjonizować inną cząsteczkę tlenu?
4. Proton i elektron najpierw spoczywały, a potem zostały rozpędzone w polu elektrycznym o napięciu 80 V.
   a) Czy poruszały się w tę samą stronę?
   b) Oblicz uzyskaną przez te cząstki energię kinetyczną.
   c) Która cząstka uzyska większą prędkość? Uzasadnij odpowiedź.
5. Podczas ściągania bluzy polarowej przez głowę napięcie między bluzą a głową powstałe w wyniku elektryzowania może osiągnąć 1000 V i spowodować przeskok iskry. Czy taka iskra przenosi duży ładunek? Czy jest to niebezpieczne? Wskazówka: o szkodliwości przepływu ładunku decyduje energia elektryczna przekazana naszemu ciału.

# 6. Przewodnik w polu elektrycznym

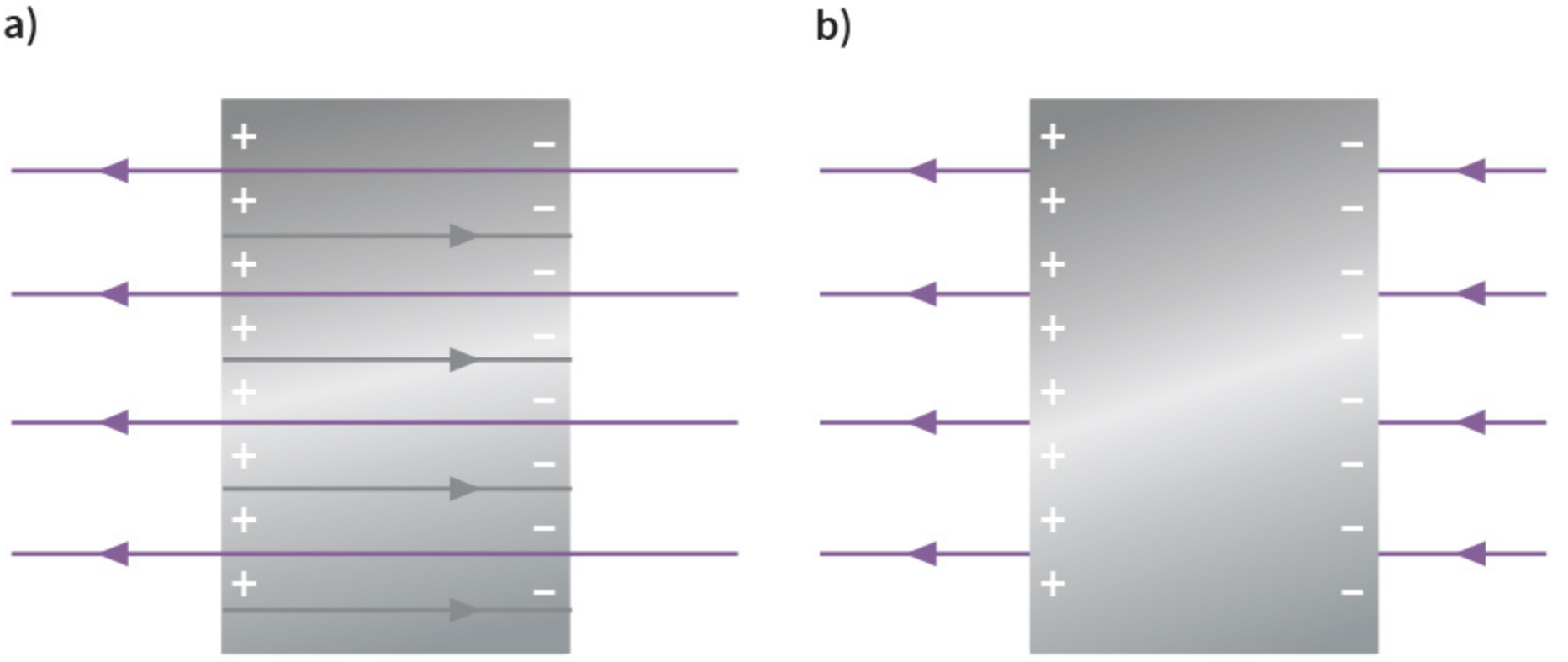
- Ekranujące właściwości przewodników
- Rozmieszczenie ładunku na przewodniku
- Napięcie między przewodnikami

➔ **Przypomnij sobie** jak opisujemy pole elektryczne oraz czym są potencjał elektryczny i napięcie elektryczne.

Wiemy już, że we wnętrzu przewodnika nie ma ładunku elektrycznego. W tym rozdziale sprawdzimy, jak ładunek na powierzchni przewodnika modyfikuje pole elektryczne w jego wnętrzu. Ograniczymy się tylko do sytuacji statycznej, czyli takiej, gdy ładunek nie przepływa i zewnętrzne pole elektryczne jest stałe.

## Znikanie pola elektrycznego wewnątrz przewodnika

Jak wiemy, w przewodnikach ładunki elektryczne mogą się swobodnie przemieszczać. To powoduje, że pole elektryczne nie wnika do przewodników. Dlaczego tak się dzieje?




**Ryc. 6.1.** Rozdzielone ładunki wytwarzają własne pole elektryczne (linie szare) (a), które niweluje pole zewnętrzne (b)

Rycina 6.1 przedstawia nienaelektryzowaną metalową kostkę, umieszczoną w polu elektrycznym. Wskutek działania tego pola elektrony swobodne w metalu przemieszczają się w prawo. Wobec tego lewa powierzchnia kostki, pozbawiona niektórych elektronów, ma ładunek dodatni, a prawa powierzchnia ma ładunek ujemny. Te naelektryzowane powierzchnie wytwarzają własne pole elektryczne, którego linie mają zwrot przeciwny do linii pola zewnętrznego. Przepływ elektronów w kostce trwa do czasu, gdy wypadkowe pole elektryczne zniknie. Wtedy na żaden ładunek we wnętrzu przewodnika nie będzie

już działać zewnętrzna siła elektryczna. Końcowa sytuacja statyczna to brak ładunku oraz wypadkowego pola elektrycznego wewnątrz przewodnika. Dochodzenie do tego stanu trwa ułamek sekundy.

> We wnętrzu przewodnika w sytuacji statycznej nie ma ładunku oraz pola elektrycznego.

Skoro wewnątrz przewodnika nie ma pola elektrycznego, to **nie ma również napięcia między dowolnymi punktami przewodnika.** Mówiąc inaczej, potencjał każdego punktu przewodnika jest taki sam. Powyższe stwierdzenia dotyczą również naładowanych przewodników. W momencie ich elektryzowania wytworzone pole elektryczne natychmiast przemieszcza ładunki tak, że ich nowe rozmieszczenie na powierzchni niweluje pole wewnątrz przewodnika.

Ptaki mogą bezpiecznie siadać na liniach wysokiego napięcia (ryc. 6.2). Napięcie między linią a powierzchnią Ziemi może być równe nawet 400 000 V, a napięcie między dwiema liniami również jest duże. Jednak ptak dotyka tylko jednej linii i to praktycznie w jednym miejscu. Całe jego ciało uzyskuje potencjał, jaki ma linia w miejscu styku. A ponieważ między różnymi częściami ciała ptaka nie powstaje napięcie, nie przepływa przez niego żaden ładunek elektryczny. Z tego samego powodu można bezpiecznie dotknąć silnie naelektryzowanego przewodnika, jeśli stoimy na dobrym izolatorze. Nasze ciało uzyskuje ten sam potencjał co przewodnik. Bez napięcia nie ma przepływu ładunku.

**Ryc. 6.2.** Ptaki siedzące na liniach wysokiego napięcia

Przedmioty schowane w metalowym pojemniku są chronione przed wpływem zewnętrznych ładunków i pól elektrycznych (w tym fal elektromagnetycznych). Mówi się, że metal ekranuje od sił elektrycznych.

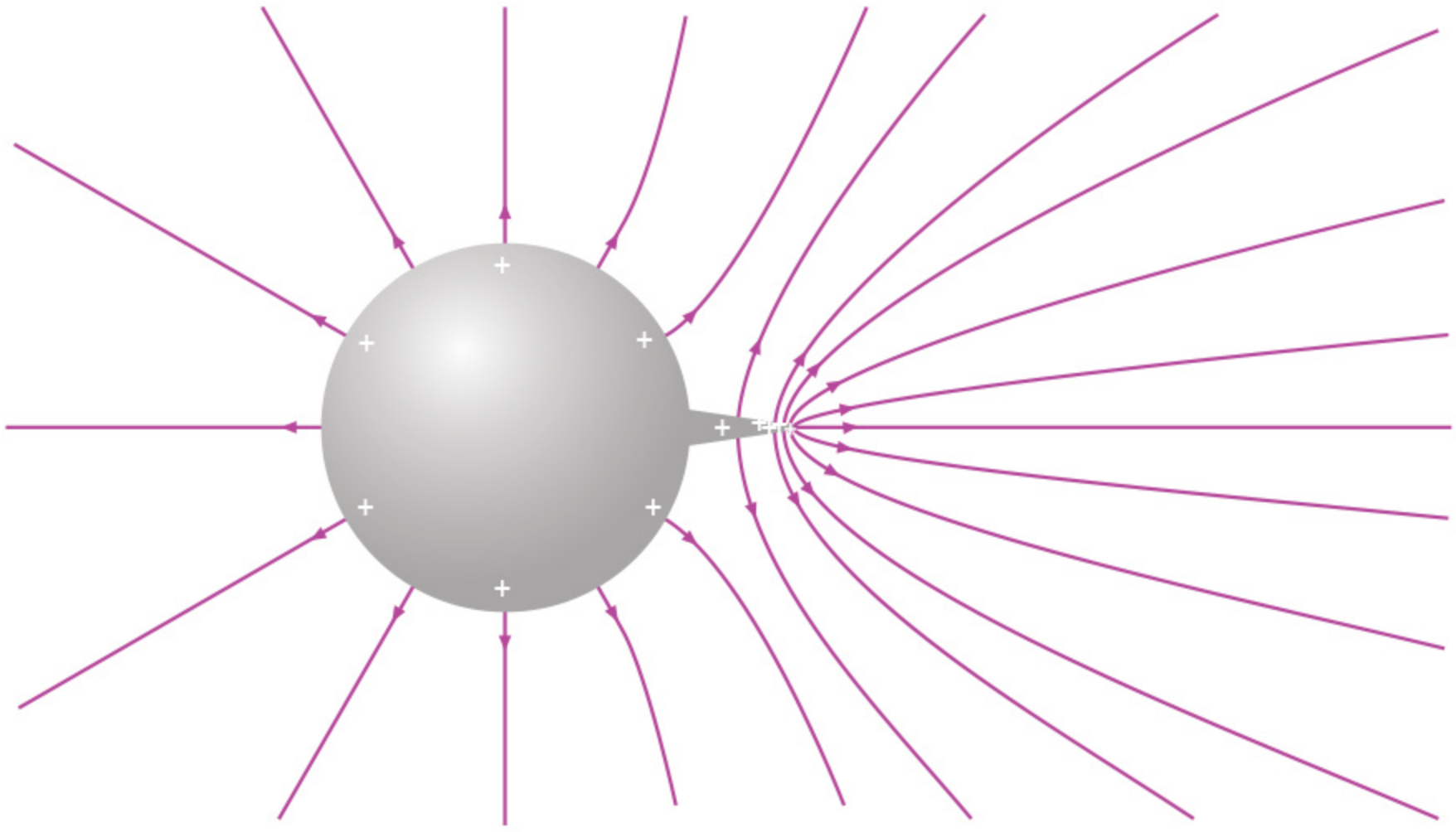
**DOŚWIADCZENIE 1.**
Schowaj włączony telefon komórkowy do metalowego pudełka lub owiń go szczelnie folią aluminiową. Pudełko nie może mieć elementów niemetalowych. Zadzwoń na numer schowanego urządzenia z innego telefonu. Czy zamknięty telefon odpowiada?

W wielu przypadkach do ochrony przed polem elektrycznym wystarczy metalowa druciana siatka o odpowiednio gęstym splocie. Taki metalowy ekran nosi nazwę *klatki Faradaya* – na cześć wybitnego fizyka z XIX wieku. Nawet gdy powierzchnia metalowej klatki jest silnie naelektryzowana, ani ładunek, ani pole elektryczne nie wnikają do jej wnętrza (ryc. 6.3). Warto zauważyć, że samochód czy pociąg również działają jak klatka Faradaya, zatem w czasie burzy to w miarę bezpieczne schronienie przed skutkami wyładowań atmosferycznych.

**Ryc. 6.3.** Ani ładunek, ani pole elektryczne nie wnikają do wnętrza klatki Faradaya

## Rozmieszczenie ładunków w przewodniku

Na powierzchni metalowej kuli nadmiarowe ładunki rozkładają się równomiernie. Gdy przewodnik ma inny kształt, ładunki gromadzą się gęściej w miejscach silnie zakrzywionych. Dlatego gdy naładowany przewodnik ma wystające ostrze, to pole elektryczne wokół tego przewodnika jest najsilniejsze w pobliżu ostrza (ryc. 6.4).



**Ryc. 6.4.** Ostrza naładowanych przewodników są źródłem silnego pola elektrycznego

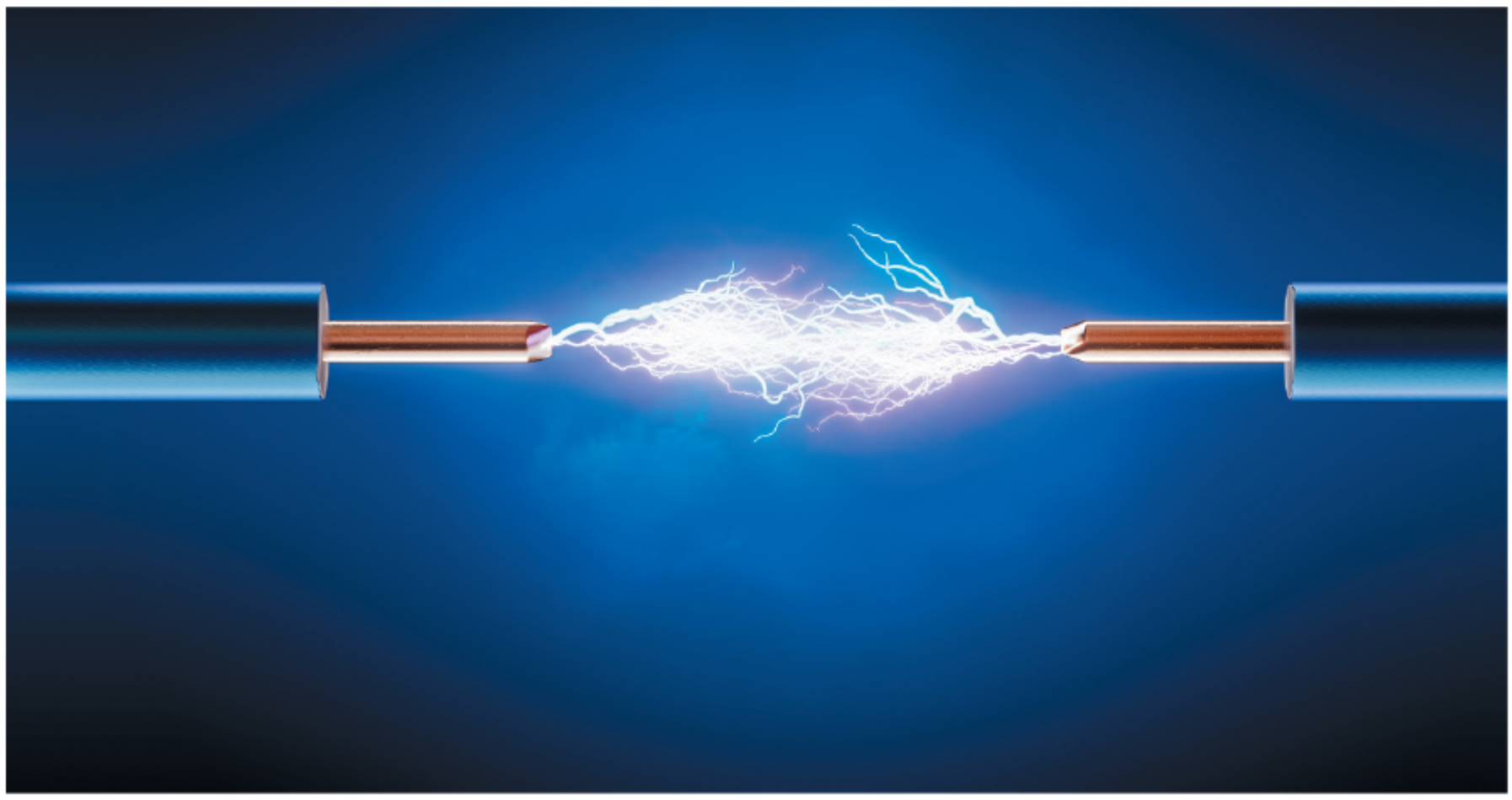
Silne pole elektryczne powoduje jonizację powietrza i rozpędza jony, które mogą pobudzić do świecenia cząsteczki powietrza. Tak powstają iskry lub wyładowania koronowe (infografika na s. 58–59). Strumień jonów rozpędzonych polem elektrycznym może odchylić płomień świecy w pobliżu ostrza (ryc. 6.5).

**Ryc. 6.5.** Płomień świecy odchyla się w pobliżu silnie naelektryzowanego ostrza

## WARTO WIEDZIEĆ

**Napięcie a iskra elektryczna**

W silnym polu elektrycznym napięcie między punktami leżącymi blisko siebie może być duże. W takim polu znajdujące się w powietrzu cząsteczki ulegają jonizacji, a następnie są rozpędzane tak, że podczas zderzeń jonizują kolejne cząsteczki. Tworzy się wąski kanał przewodzącego powietrza, przez który przepływają ładunki tworzące iskrę elektryczną. Jeśli źródłem pola będą dwie metalowe kulki, między którymi powstało napięcie równe 5000 V, iskra pojawi się, gdy odległość między ich powierzchniami będzie wynosiła ok. 1 mm. Przy większej odległości iskra już nie przeskoczy, gdyż pole będzie zbyt słabe. Jeśli jednak do kulek przymocuje się metalowe ostrza, to przy napięciu 5000 V iskra może przeskoczyć nawet z odległości 4 mm między ostrzami*. Natomiast przy napięciu 30 000 V uzyskamy iskrę przy odległości prawie 3 cm między ostrzami.

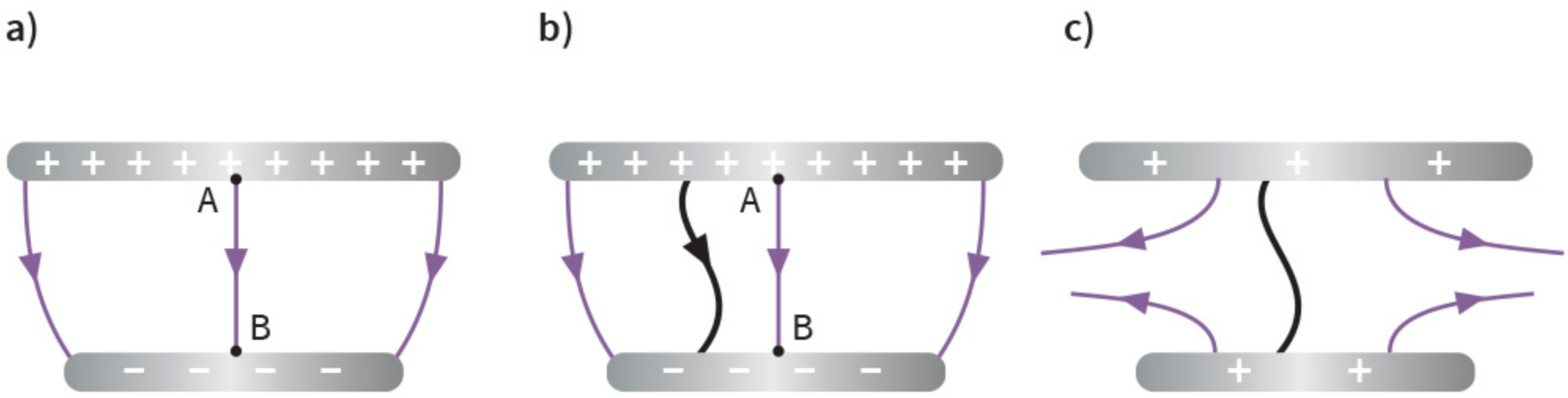


* A. Piekara, *Elektryczność i magnetyzm*, Warszawa 1970, s. 114.

## Napięcie między przewodnikami

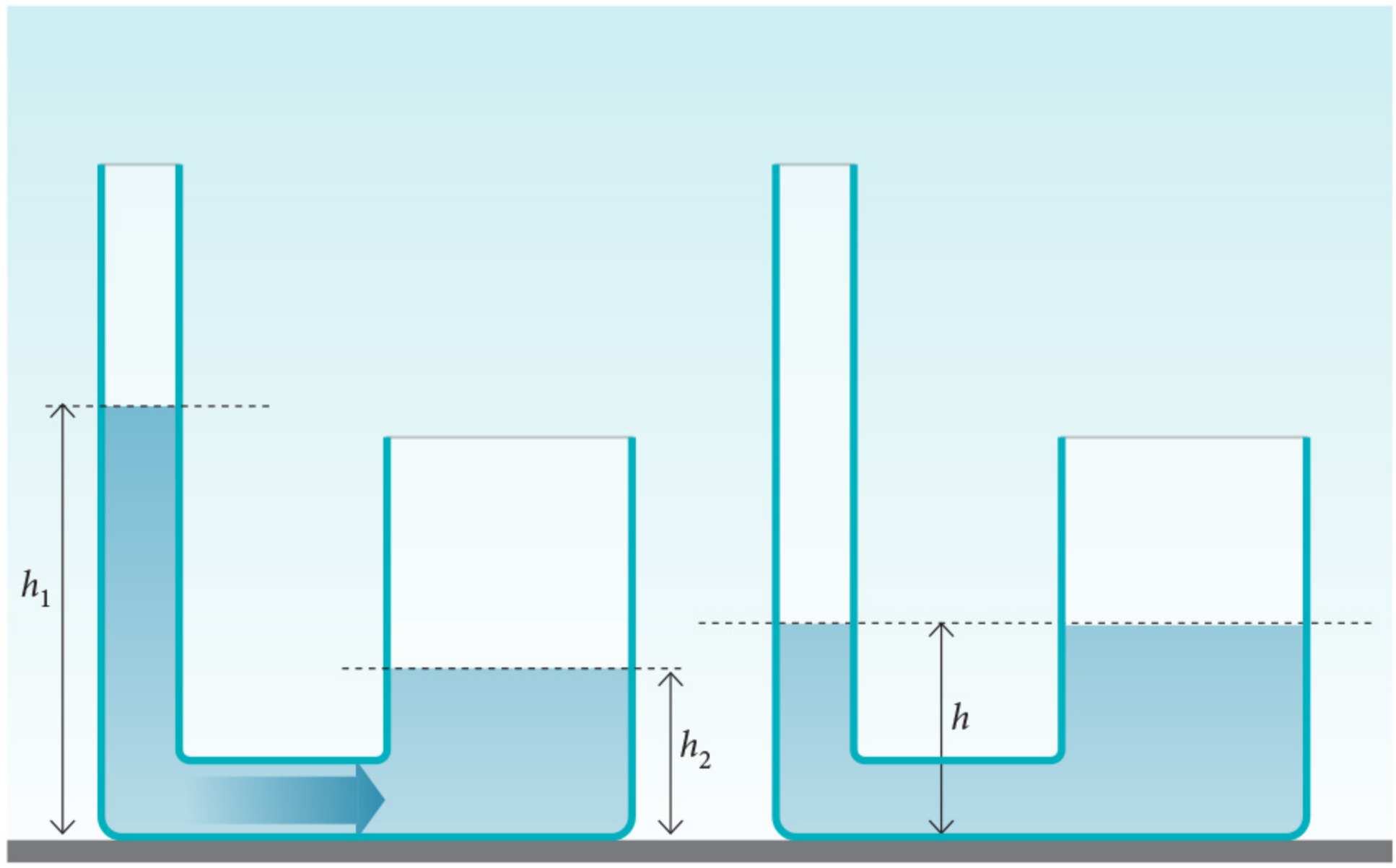
Rycina 6.6a przedstawia dwie metalowe płyty naładowane różnoimiennymi ładunkami. Między nimi jest napięcie (różnica potencjałów między punktami A i B), a górna płyta ma większy potencjał. Jeśli połączymy obie płyty przewodem, pewien ładunek dodatni przepłynie z górnej płyty na dolną (ryc. 6.6b). Przepływ ładunku będzie trwał aż do zaniku napięcia między płytami. Zwykle trwa to ułamek sekundy. Połączone płyty stanowią **jeden** przewodnik, zatem w stanie końcowym nie ma między nimi napięcia. Nie oznacza to jednak, że końcowy ładunek na płytach jest jednakowy.

Napięcie elektryczne powoduje przepływ ładunku. Przepływ się kończy, gdy napięcie znika.




**Ryc. 6.6. a)** Dwie różnie naelektryzowane płyty, między którymi jest napięcie. **b)** Przez przewód łączący płyty przepływa ładunek dodatni od potencjału wyższego do niższego. **c)** W stanie końcowym nie ma napięcia między płytami

Podobnie zachowuje się woda w dwóch połączonych naczyniach. Przepływ następuje od naczynia o wyższym poziomie wody do naczynia o niższym poziomie, aż do momentu wyrównania poziomów. Różnica wysokości poziomów wody jest w tym porównaniu odpowiednikiem napięcia elektrycznego, a woda – odpowiednikiem ładunku (ryc. 6.7).




**Ryc. 6.7.** Przepływ wody trwa do czasu wyrównania jej poziomów

Wnioski z tego rozdziału, dotyczące pola elektrycznego i rozmieszczenia ładunku na przewodniku, są prawdziwe tylko w sytuacji statycznej, czyli takiej, gdy ładunek nie przepływa i zewnętrzne pole elektryczne jest stałe. Więcej informacji o tym, co dzieje się w trakcie ciągłego przepływu ładunku, znajduje się w dziale *Prąd elektryczny*.

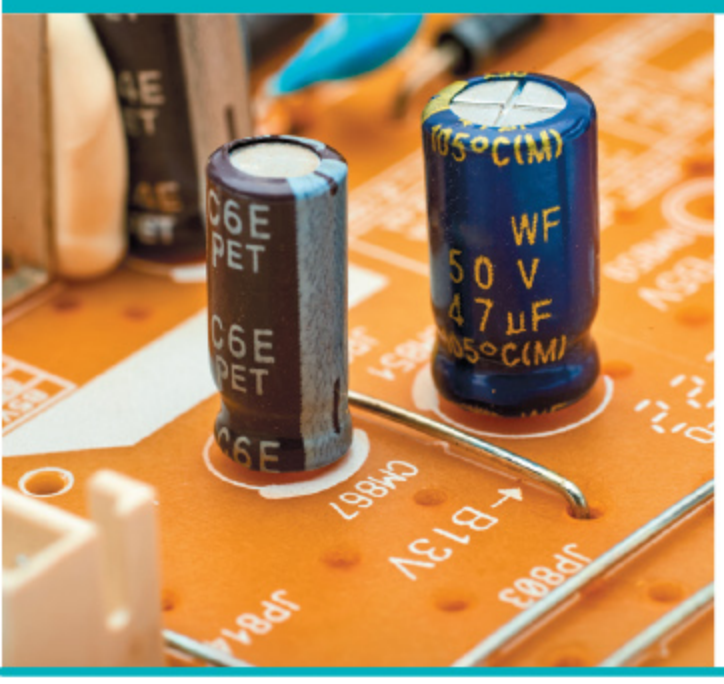
## PODSUMOWANIE

- We wnętrzu przewodnika w sytuacji statycznej nie ma pola oraz napięcia elektrycznego.
- Największy ładunek gromadzi się na ostrzu przewodnika i tam tworzy się najsilniejsze pole elektryczne.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Przerysuj rycinę 6.4. Zaznacz obszar, w którym pole elektryczne jest najsilniejsze, oraz obszar, w którym nie ma pola.
2. Gdy samochód przejeżdża przez stalowy most (fot.), odbiór niektórych zakresów fal radiowych bywa zakłócony. Wyjaśnij, dlaczego tak się dzieje.

3. Dlaczego podczas dotykania silnie naelektryzowanego przewodnika należy stanąć na dobrym izolatorze, jeśli nie chcemy dopuścić do przepływu ładunków przez nasze ciało?
4. Dlaczego iskra elektryczna przeskakuje z większej odległości między ostrzami niż między kulkami przy tym samym napięciu?
5. W ziemskim polu elektrycznym napięcie między punktami odległymi o 1 m w pionie wynosi 100 V. Jakie jest napięcie między stopami a głową człowieka mającego 180 cm wzrostu i stojącego na trawie? Uzasadnij odpowiedź, korzystając z informacji zawartych w rozdziałach 1 i 6.




# 7. Kondensator

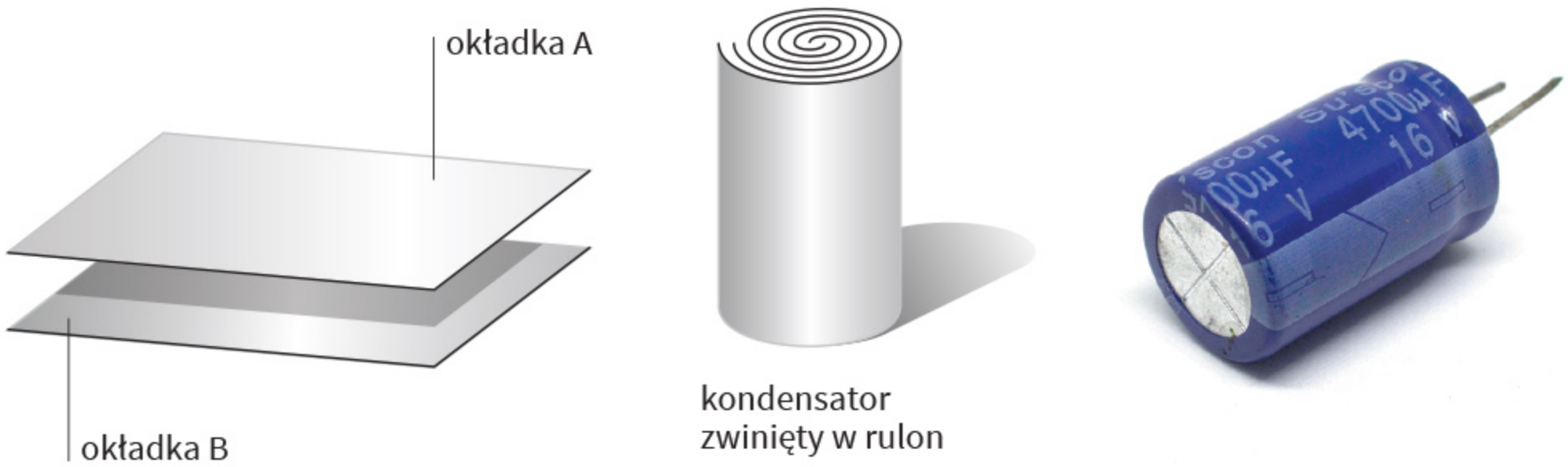
- Kondensator, pojemność kondensatora
- Energia naładowanego kondensatora
- Zastosowania kondensatorów

➔ **Przypomnij sobie**, co to jest napięcie elektryczne.

Od czasu upowszechnienia się zastosowań energii elektrycznej pojawiła się potrzeba magazynowania tej energii. Jednym ze sposobów jej gromadzenia, zazwyczaj na krótki czas, jest ładowanie kondensatorów. Obecnie prowadzone są badania nad zastosowaniem kondensatorów jako źródeł energii dla pojazdów elektrycznych.

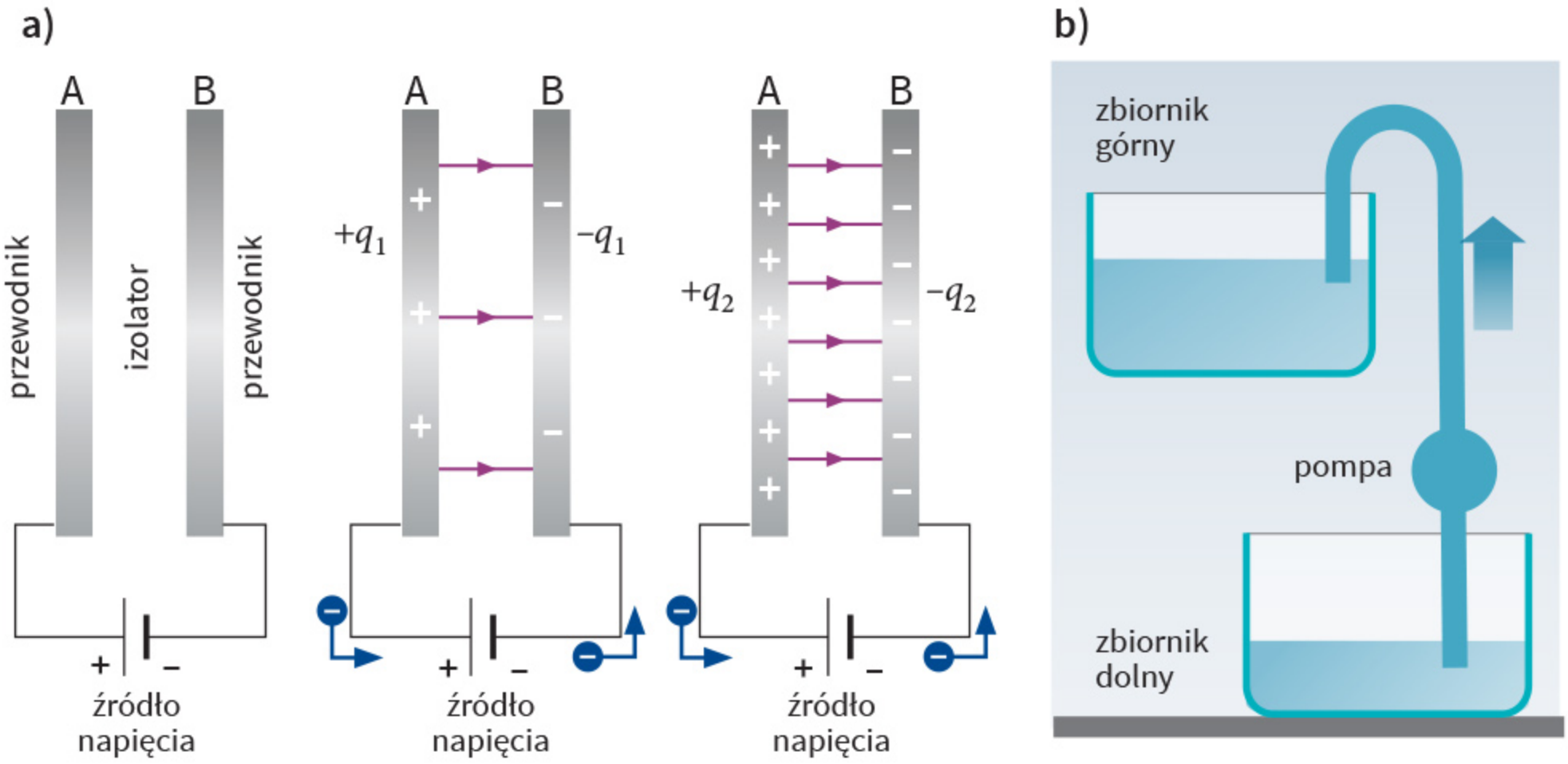
## Kondensator, pojemność kondensatora

**Kondensator** stanowią dwa przewodniki oddzielone od siebie izolatorem. Kształt przewodników tworzących kondensator może być dowolny. Najczęściej są to płytki, dlatego nazywa się je okładkami kondensatora (ryc. 7.1). Aby zmniejszyć rozmiary zewnętrzne kondensatora, okładki zwija się w rulon, dlatego kondensatory często mają kształt walca.




**Ryc. 7.1.** Kondensator płaski składa się z dwóch okładek rozdzielonych izolatorem

Ładowanie kondensatora polega na przenoszeniu ładunku z jednej okładki kondensatora na drugą (ryc. 7.2a). To zadanie wykonuje podłączone do kondensatora źródło napięcia, np. bateria. Jest to proces podobny do przepompowywania wody ze zbiornika położonego niżej do zbiornika położonego wyżej (ryc. 7.2b).




**Ryc. 7.2. a)** Ładowanie kondensatora polega na przenoszeniu ładunku z jednej okładki na drugą. **b)** Pompowanie wody ze zbiornika dolnego do górnego

Rycina 7.2a przedstawia dwie okładki kondensatora A i B umieszczone w pewnej odległości od siebie. Gdy z okładki A przeniesiemy ładunek ujemny na okładkę B, to pierwsza będzie naładowana dodatnio, a druga ujemnie. Ładunki na okładkach co do wartości bezwzględnej będą takie same. Gdy mówimy o ładunku zgromadzonym w kondensatorze, mamy na myśli ładunek okładki dodatniej. Ponieważ na okładkach kondensatora gromadzony jest ładunek elektryczny, między nimi jest pole elektryczne – tym silniejsze, im większy jest ten ładunek. Napięcie elektryczne między okładkami jest wprost proporcjonalne do ładunku zgromadzonego na okładce naelektryzowanej dodatnio (lub inaczej: do wartości bezwzględnej ładunku na jednej okładce). Współczynnikiem proporcjonalności między tymi wielkościami jest tzw. pojemność kondensatora, oznaczana symbolem $C$. Można to zapisać za pomocą wzoru:

$$q = C \cdot U$$

gdzie:
$q$ – ładunek okładki naelektryzowanej dodatnio,
$C$ – pojemność kondensatora,
$U$ – napięcie między okładkami.

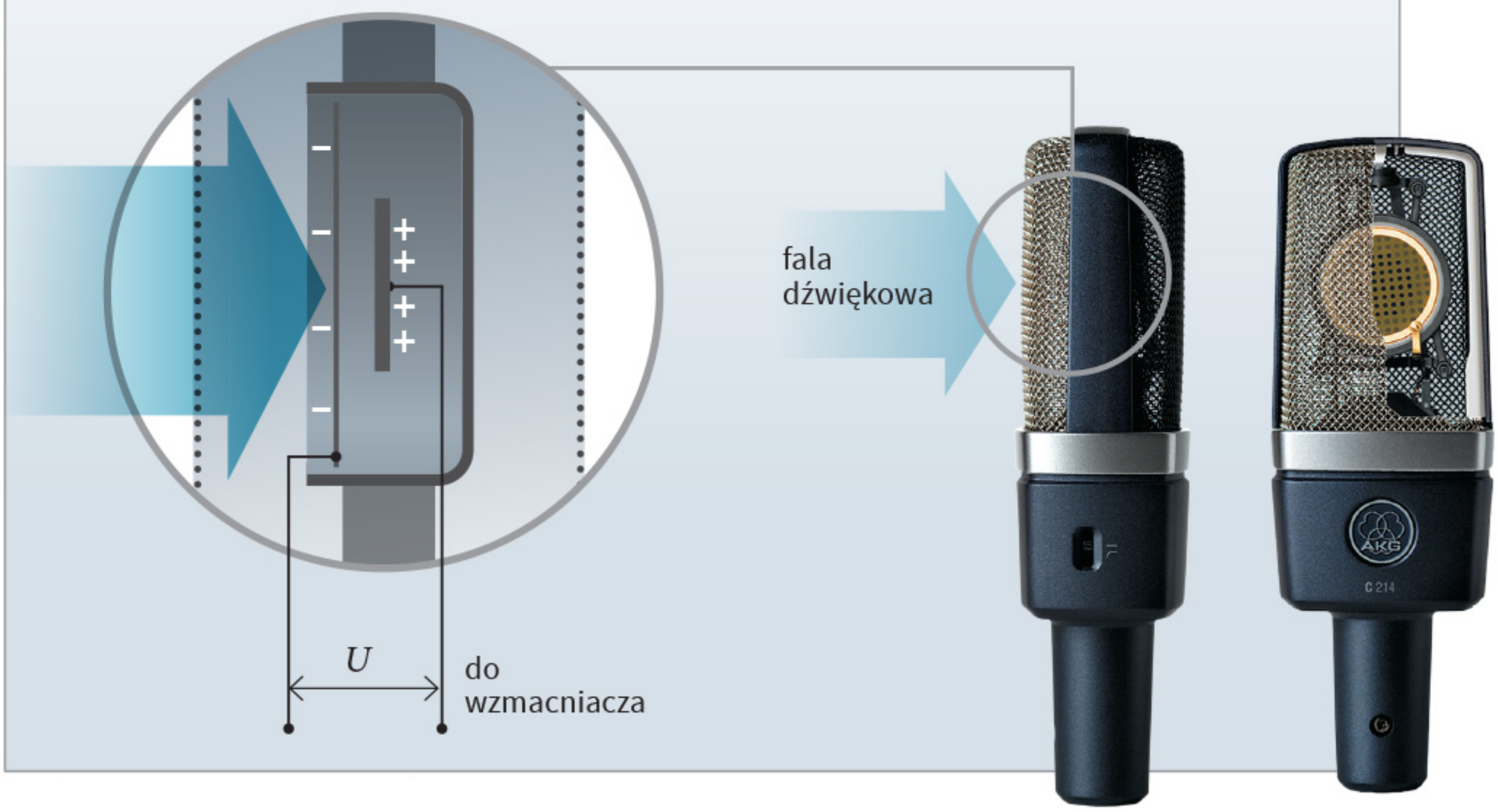
Pojemność kondensatora jest cechą wynikającą z jego budowy. Pojemność nie zależy od ładunku zgromadzonego w kondensatorze, podobnie jak pojemność zbiornika nie zależy od ilości wody, którą do niego przepompujemy. Pojemność kondensatora określa, ile ładunku można zgromadzić na okładkach kondensatora przy napięciu 1 V.
Jednostką pojemności jest farad (F). Kondensator ma pojemność 1 F, gdy ładunek 1 C wytwarza napięcie 1 V między okładkami. Jeden farad to bardzo duża pojemność. W praktyce częściej posługujemy się pojemnościami rzędu mikrofaradów (1 μF = $10^{-6}$ F) czy nanofaradów (1 nF = $10^{-9}$ F).

s. 352

## WARTO WIEDZIEĆ

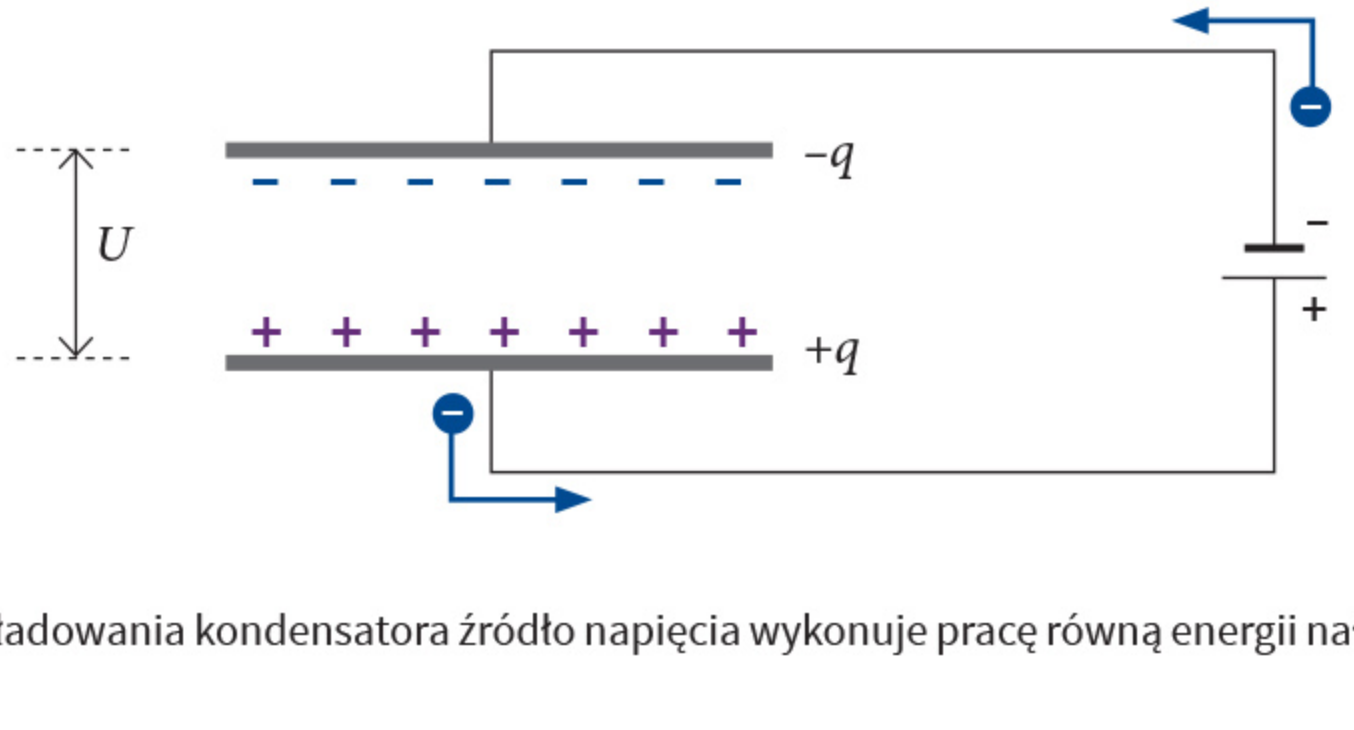
**Mikrofon**

Energię fali dźwiękowej na energię elektryczną zamienia mikrofon pojemnościowy. Jest on praktycznym przykładem zastosowania kondensatorów. Dwa przewodniki ustawione w pewnej odległości od siebie tworzą kondensator. Zewnętrzną okładkę tego kondensatora stanowi cienka sprężysta blaszka. Gdy dochodzi do niej fala dźwiękowa, następują zmiany kształtu kondensatora, co skutkuje zmianą jego pojemności. Wówczas przy stałym napięciu utrzymywanym między okładkami zmienia się zgromadzony na nich ładunek. Jest on uzupełniany lub odbierany przez układ elektroniczny wzmacniacza, który jednocześnie generuje sygnał elektryczny o odpowiedniej mocy, zsynchronizowany ze zmianami ładunku.




## Energia naładowanego kondensatora

Ładowanie kondensatora odbywa się poprzez podłączenie go do źródła napięcia (ryc. 7.3). Energia elektryczna zgromadzona na kondensatorze jest równa pracy wykonanej przez źródło napięcia podczas ładowania – podobnie jak energia grawitacji przepompowanej wody (ryc. 7.2b) jest równa pracy wykonanej przez pompę.

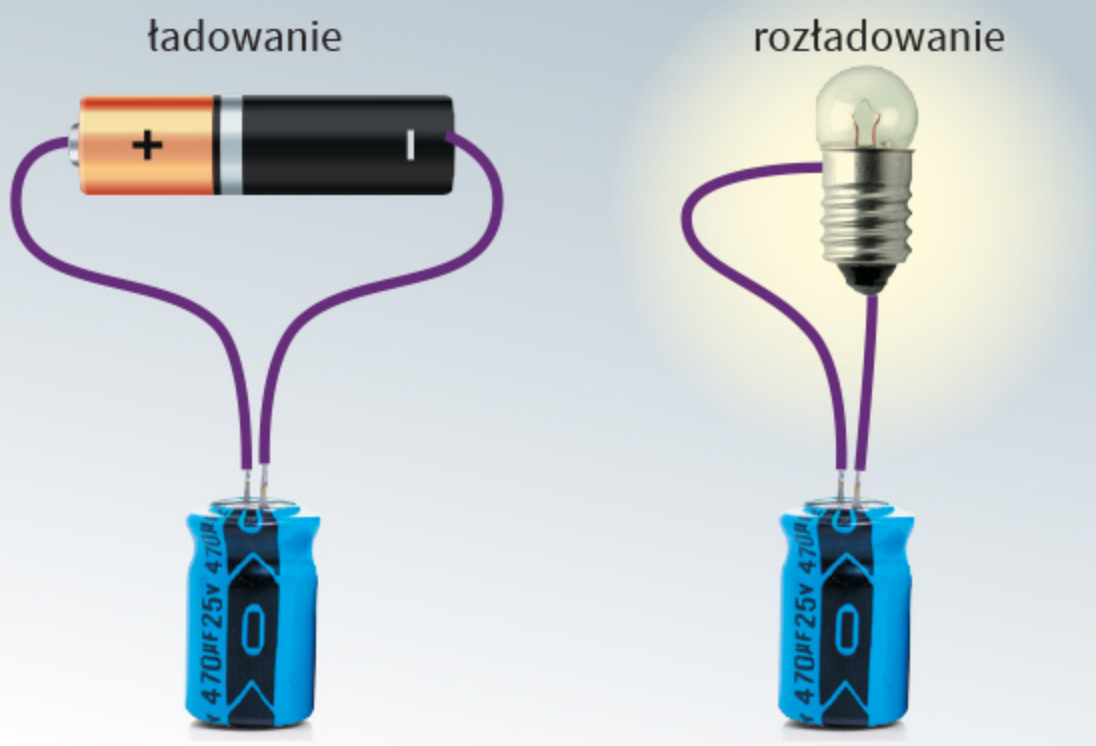



**Ryc. 7.3.** Podczas ładowania kondensatora źródło napięcia wykonuje pracę równą energii naładowanego kondensatora

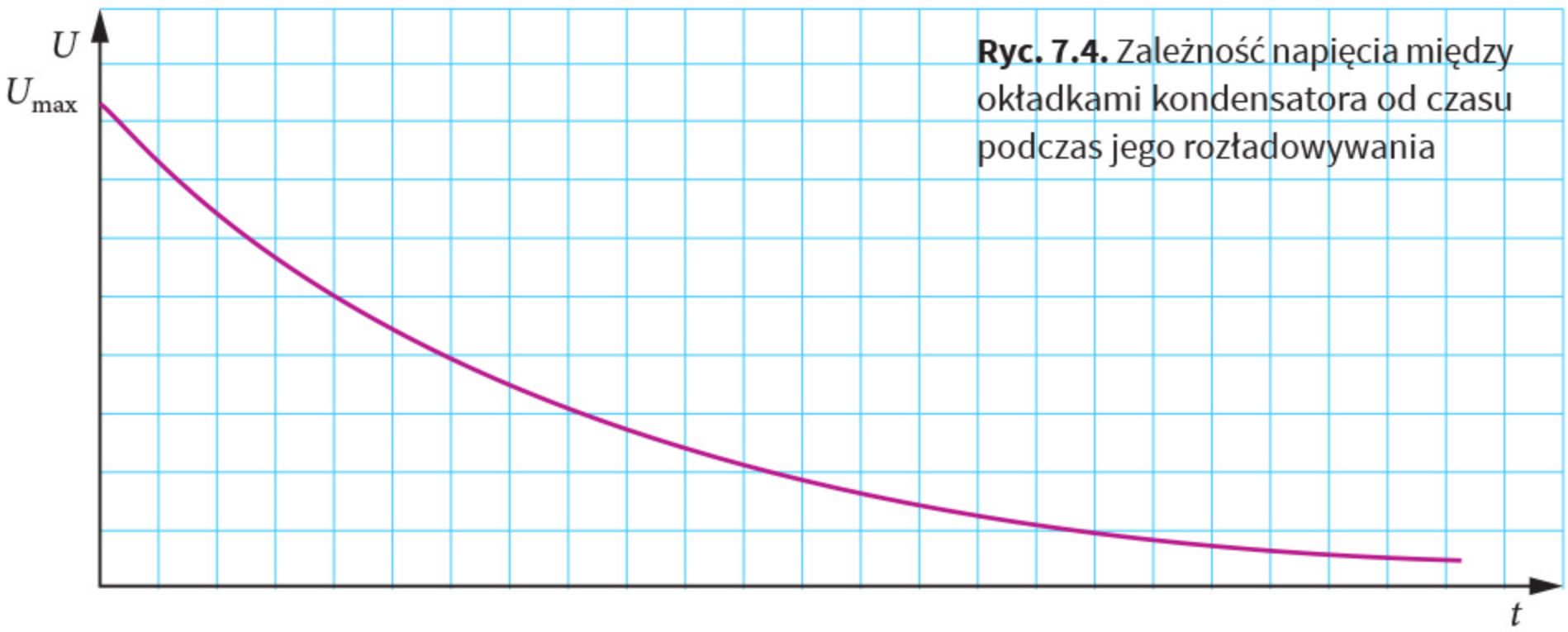
**DOŚWIADCZENIE 1.**

Do wykonania doświadczenia potrzebne będą: bateria (np. płaska, o napięciu 4,5 V), kondensator o pojemności co najmniej 1000 μF (dostępny w sklepach z częściami elektronicznymi w cenie kilku złotych), tradycyjna żarówka do latarki oraz przewody łączące.

1. Ładowanie kondensatora. Podłącz kondensator do baterii zgodnie z zaznaczonymi na nim biegunami. Ładowanie kondensatora powinno trwać ok. minuty.
2. Rozładowanie kondensatora. Naładowany kondensator odłącz od baterii. Do kondensatora podłącz żarówkę. Czy żarówka świeci? Czy jej jasność się zmienia?




Ładunki zgromadzone na okładkach kondensatora są źródłem pola elektrycznego. Energia tego pola to energia zgromadzona w kondensatorze. Gdy okładki naładowanego kondensatora połączymy przewodem, ładunek będzie przepływał przez ten przewód do momentu, gdy napięcie na kondensatorze spadnie do zera. Napięcie między okładkami maleje wraz ze zmniejszaniem się ładunku (ryc. 7.4). Czas rozładowania kondensatora jest tym dłuższy, im większa jest jego pojemność.




**Ryc. 7.4.** Zależność napięcia między okładkami kondensatora od czasu podczas jego rozładowywania

Zwykle energia zgromadzona w kondensatorze jest niewielka. Jednak moc, jaką możemy uzyskać w czasie jego rozładowania, może być duża ze względu na krótki czas tego procesu. Przykładem może być lampa błyskowa (tzw. flesz) używana w fotografii. Światło emitowane przez tę lampę to impuls oświetlający otoczenie z dużą mocą. Lampy błyskowe są zasilane z baterii, które nie są w stanie zapewnić tak dużej energii w krótkim czasie. Bateria zasila więc kondensator, który w odpowiednim momencie przekazuje energię do lampy. Błysk trwa ułamek sekundy. Kondensatory używane w lampach błyskowych mają pojemności rzędu kilkuset μF.

**PRZYKŁAD 1.**

Do zasilania lampy błyskowej użyto kondensatora o pojemności 800 μF. Jego energia elektryczna po naładowaniu była równa 36 J. Błysk lampy trwał 1 ms. Oszacujmy jej moc.

Zakładamy, że cała energia elektryczna zgromadzona na kondensatorze została zamieniona na energię światła. Moc lampy to stosunek energii światła do czasu wydzielenia tej energii:

$$P = \frac{E_e}{t} = \frac{36\ \text{J}}{\frac{1}{1000}\ \text{s}} = 36\ \text{kW}$$

Tak dużą moc trudno jest uzyskać za pomocą lamp zasilanych bezpośrednio bateriami.

## WARTO WIEDZIEĆ

**Defibrylator**

Urządzenie mogące uratować życie w przypadku zaburzeń pracy serca to defibrylator. Elementem gromadzącym energię elektryczną w tym urządzeniu jest kondensator i dlatego defibrylator jest w stanie przesłać w okolice serca impuls elektryczny o dużej mocy. Defibrylatory można znaleźć w wielu miejscach w przestrzeni publicznej. Mogą ich użyć osoby nieprzeszkolone. Po przyłożeniu elektrod do klatki piersiowej osoby potrzebującej pomocy urządzenie samodzielnie diagnozuje rytm serca pacjenta, a następnie wysyła elektrowstrząs o odpowiedniej energii i czasie trwania. Przed użyciem defibrylatora zwykle zaleca się przeprowadzenie resuscytacji krążeniowo-oddechowej.

## Superkondensatory

Kondensatory o bardzo dużej pojemności elektrycznej, rzędu kilku tysięcy faradów, to superkonndensatory. Od pewnego czasu prowadzi się badania nad zastosowaniem superkondensatorów w autobusach elektrycznych oraz tramwajach (ryc. 7.5). Ważną cechą superkondensatorów jest krótki czas ładowania. W tym projekcie ładowanie pojazdów

**Ryc. 7.5.** Tramwaj zasilany superkondensatorami

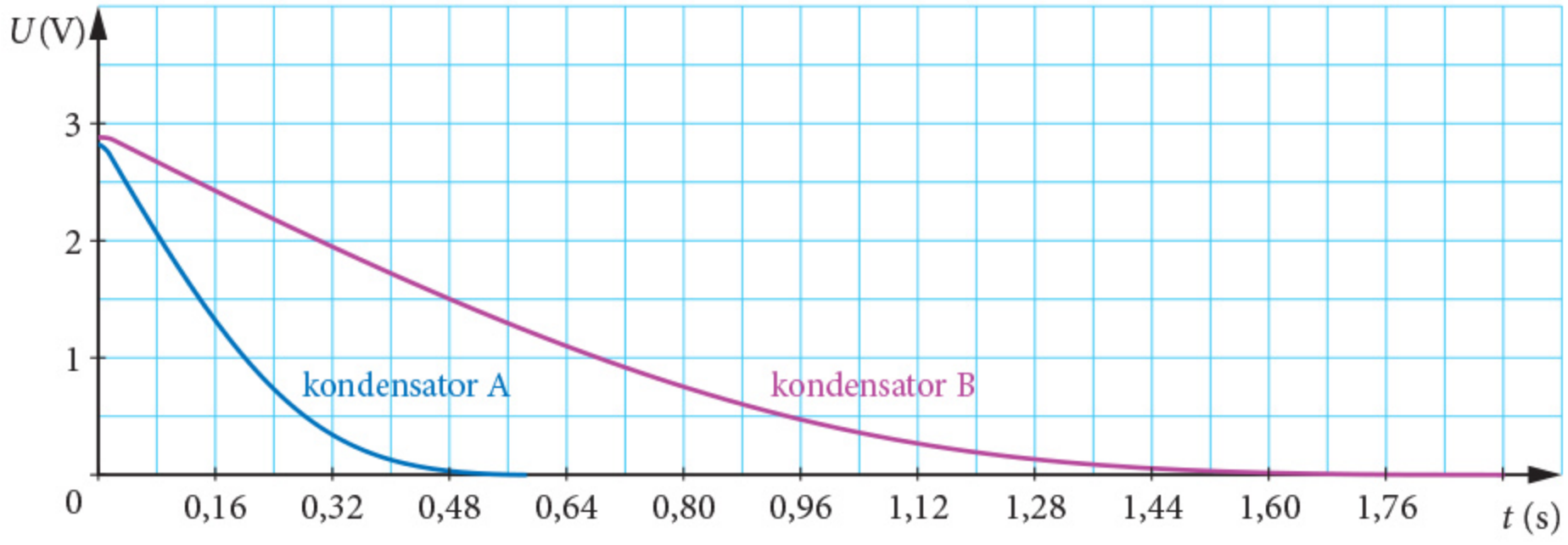
odbywa się na przystankach w czasie wysiadania i wsiadania pasażerów. Nad przystankiem montuje się linię elektryczną, do której za pomocą pantografu podłącza się tramwaj. Tramwaj tego typu testowano w 2016 roku w chińskim mieście Zhuzhou w prowincji Hunan.

## PODSUMOWANIE

- **Kondensator** to układ dwóch przewodników oddzielonych od siebie izolatorem.
- Kondensator gromadzi energię elektryczną, którą można później wykorzystać.
- **Pojemność elektryczna** kondensatora określa, jaki ładunek jest zgromadzony na kondensatorze przy napięciu 1 V. Jednostką pojemności jest farad (F).

## PYTANIA I ZADANIA

1. Kondensator o pojemności 150 nF naładowano do napięcia 1,5 V. Co się stanie z pojemnością tego kondensatora, gdy w wyniku dalszego ładowania napięcie między okładkami wzrośnie do 3,0 V?
2. Na jednym z dwóch jednakowych kondensatorów jest zgromadzony dwa razy większy ładunek niż na drugim.
   a) Na którym kondensatorze jest większe napięcie?
   b) W którym kondensatorze jest zgromadzona większa energia?
   Uzasadnij odpowiedzi.
3. Na jednej z okładek kondensatora o pojemności 680 μF zgromadzony jest ładunek +3,4 mC. Jaki ładunek jest zgromadzony na drugiej okładce?
4. Kondensator o pojemności 1500 μF został naładowany do napięcia 4,5 V. Oblicz ładunek zgromadzony na jednej z jego okładek.
5. Dwa kondensatory różniące się pojemnością naładowano do takiego samego napięcia. Następnie podłączono do nich takie same żarówki. Na wykresach przedstawiono zależność napięcia od czasu podczas rozładowywania obu kondensatorów. Który z tych kondensatorów miał większą pojemność? Uzasadnij odpowiedź.



# 8. Zjawiska elektryczne w atmosferze

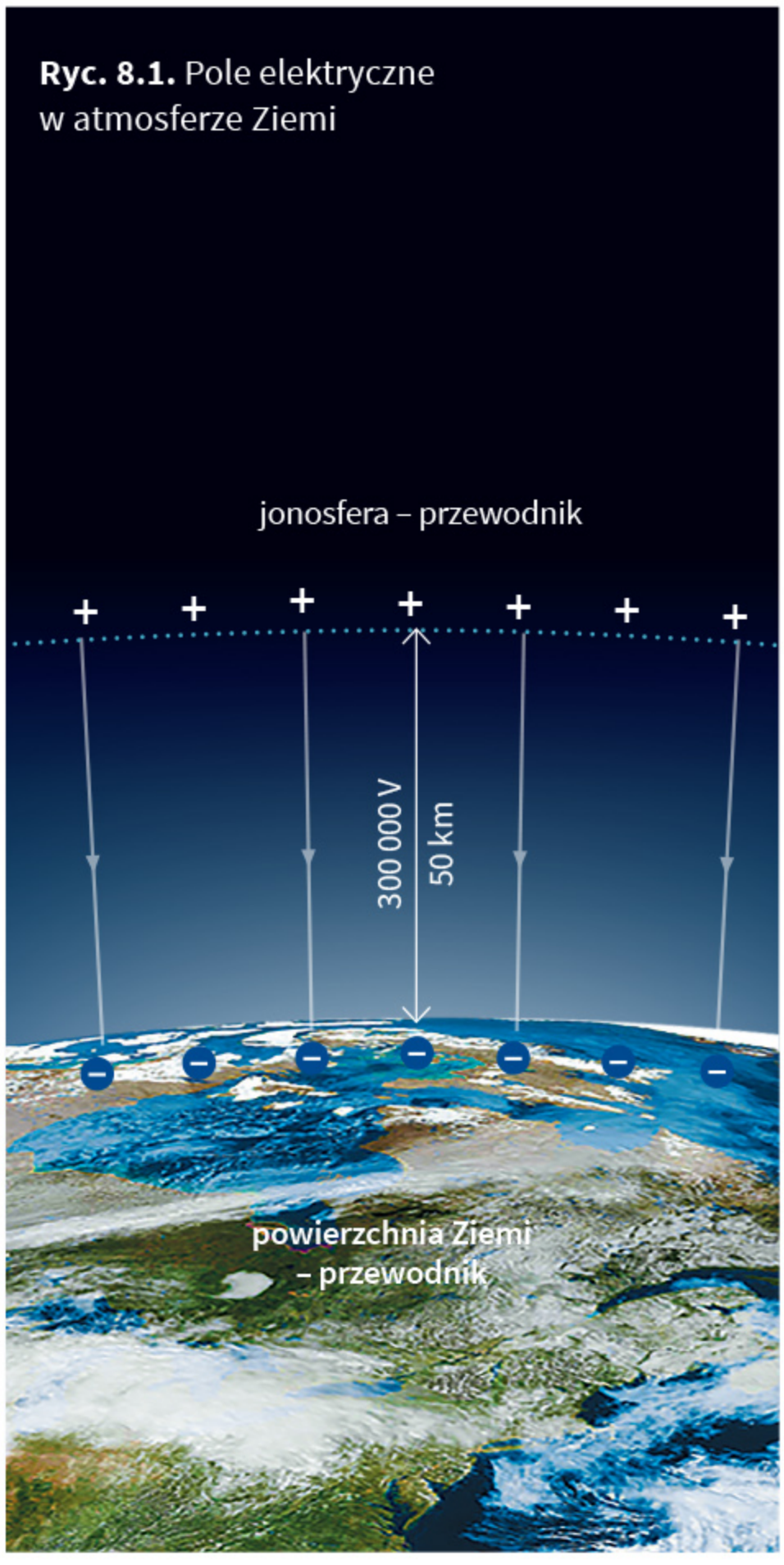
- Pole elektryczne w atmosferze
- Burze
- Piorunochron

➔ **Przypomnij sobie** informacje o polu elektrycznym i sposoby elektryzowania ciał.

W ziemskiej atmosferze ciągle jest obecne pole elektryczne. Dlaczego w ogóle istnieje? Czy jest związek między istnieniem tego pola a burzami?

## Pole elektryczne wokół Ziemi

Powietrze wokół nas można traktować jako izolator, gdyż składa się ono głównie z elektrycznie obojętnej mieszaniny gazów. Jednak pod wpływem promieniowania kosmicznego oraz promieniowania pierwiastków promieniotwórczych występujących w samym powietrzu i w skorupie ziemskiej może nastąpić jonizacja powietrza. Jonizacja polega na odrywaniu elektronów od atomów, dzięki czemu powstają jony dodatnie. Zawartość jonów w powietrzu rośnie wraz z wysokością, ponieważ im wyżej, tym silniejsze jest promieniowanie kosmiczne powodujące jonizację. Na wysokości ponad 50 km nad powierzchnią Ziemi jonów jest już tak dużo, że tamtejsze powietrze można uznać za bardzo dobry przewodnik. Tę najwyższą część atmosfery nazywamy **jonosferą**. Jonosfera ma ładunek dodatni. Powierzchnia Ziemi jest przewodnikiem naelektryzowanym ujemnie, a jej całkowity ładunek wynosi ok. $-5 \cdot 10^5$ C. Wszystko to sprawia, że przy powierzchni Ziemi istnieje pole elektryczne skierowane pionowo w dół (ryc. 8.1).



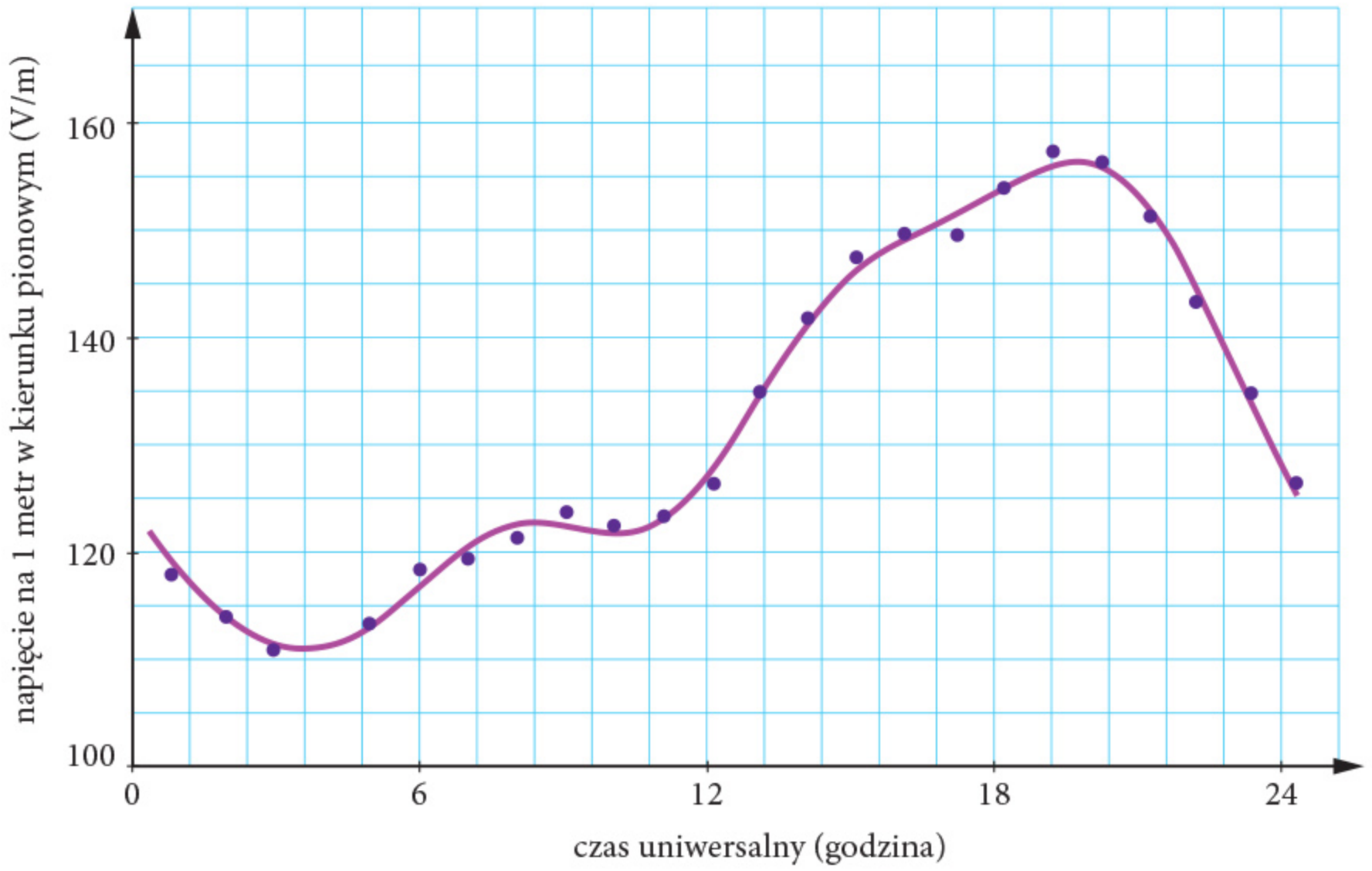

**Ryc. 8.1.** Pole elektryczne w atmosferze Ziemi

Powierzchnia Ziemi wraz z jonosferą tworzą zatem ogromny kondensator. W tym kondensatorze izolator (czyli powietrze) nie jest jednak doskonały – nieustannie płyną przez niego jony, które tworzą prąd rozładowujący ten kondensator. Z obliczeń wynika, że ziemskie pole elektryczne powinno zaniknąć mniej więcej po… 30 minutach! Dlaczego zatem istnieje? Musi działać jakiś mechanizm ciągłego dostarczania ładunku ujemnego do powierzchni Ziemi.

## WARTO WIEDZIEĆ

**Dobowe zmiany pola elektrycznego Ziemi**

W pierwszej połowie XX wieku, podczas rejsów badawczych żaglowców „Carnegie" i „Maud", dokonano pomiarów pola elektrycznego przy powierzchni Ziemi. Wyniki tych pomiarów były zaskakujące. Okazało się, że ziemskie pole elektryczne ulega zmianom w cyklu dobowym, a najsilniejsze jest ok. godziny 19 czasu Greenwich, niezależnie od miejsca, w którym dokonywano pomiarów. Ma to związek z różną w ciągu doby częstotliwością występowania burz na naszej planecie. Gdy w Europie jest popołudnie, na świecie jest więcej burz niż wówczas, gdy w Europie jest środek nocy. Współczesne badania potwierdzają odkrycie z początku XX wieku.



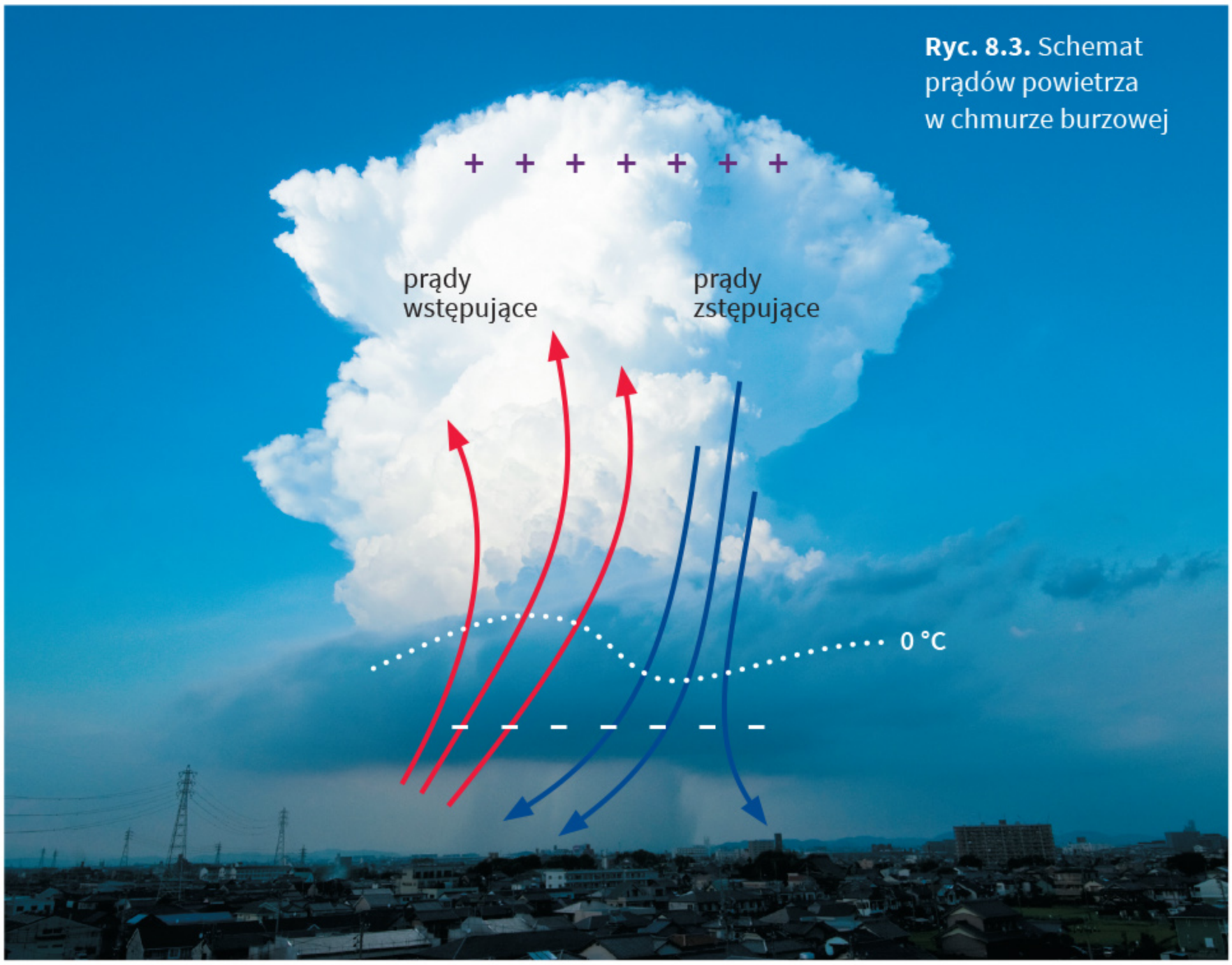

Dobowe zmiany pola elektrycznego wokół Ziemi

### Burze

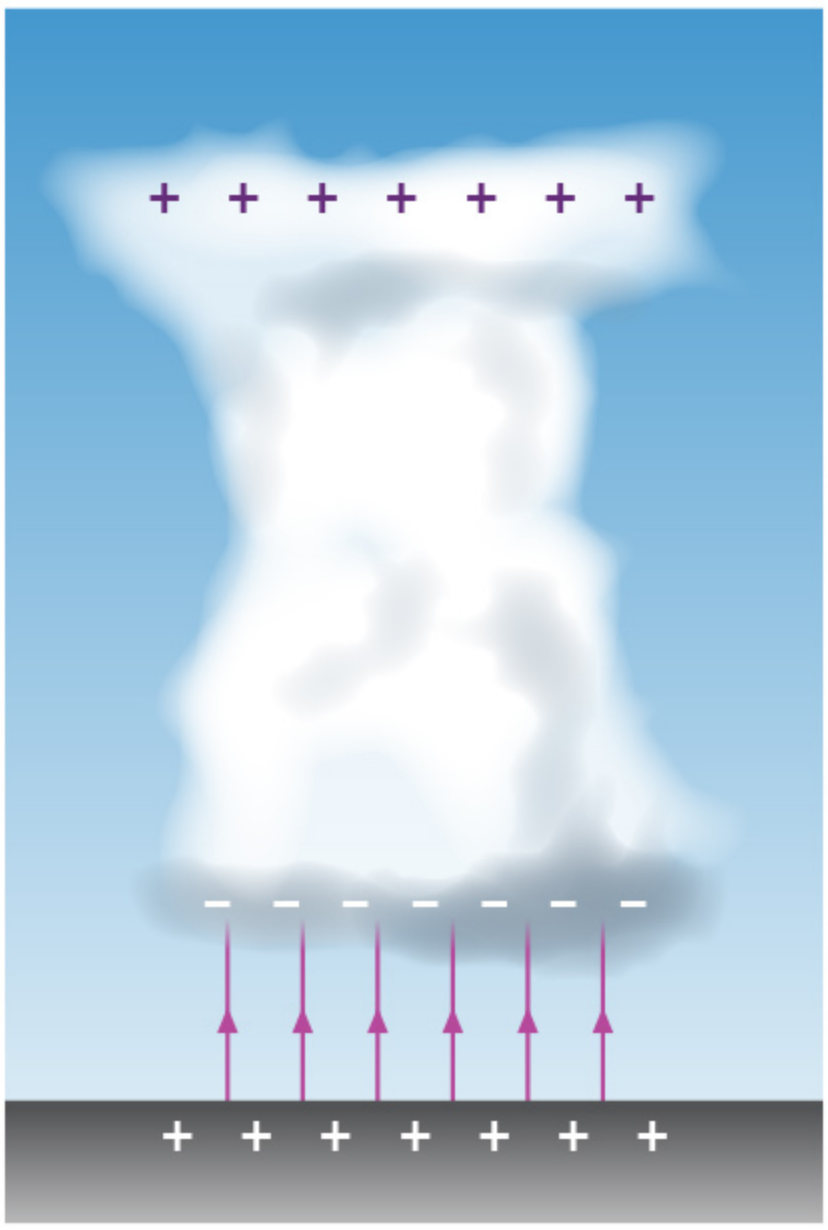
Wskutek ruchów konwekcyjnych mocno ogrzanego powietrza powstają burze. Zanim jednak powstanie burza, chmura musi wypiętrzyć się na wysokość kilkunastu kilometrów i może być widziana z daleka (ryc. 8.2).

**Ryc. 8.2.** Chmury burzowe i ich cienie widoczne z pokładu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej

Unoszące się powietrze rozpręża się i ochładza, a skraplająca się para wodna tworzy krople wody oraz kryształki lodu, które opadają wraz z ochłodzonym powietrzem (ryc. 8.3). Drobiny materii zderzają się ze sobą, na skutek czego się elektryzują. Krople wody uzyskują ładunek ujemny, a kryształki lodu dodatni (wynika to z sił wiążących elektrony w cząsteczkach wody i cząsteczkach lodu). Krople wody są najczęściej większe i cięższe od kryształków lodu, więc opadają w stronę podstawy chmury – w wyniku tego podstawa chmury staje się silnie naelektryzowana ujemnie.




**Ryc. 8.3.** Schemat prądów powietrza w chmurze burzowej



**Ryc. 8.4.** Bezpośrednio pod chmurą burzową powierzchnia Ziemi naelektryzowana jest dodatnio. Powstaje bardzo silne pole elektryczne, skierowane w górę

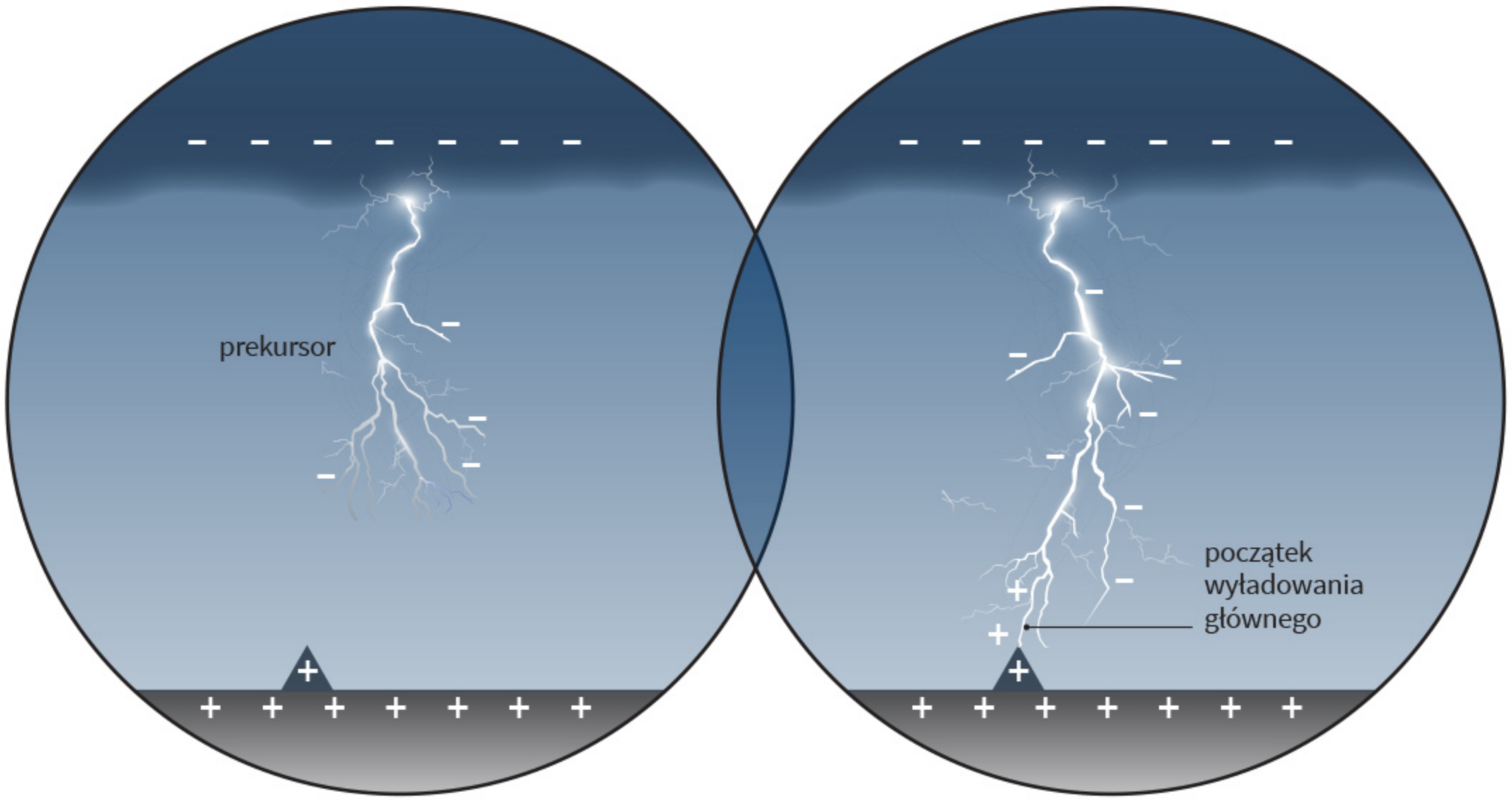
**Ryc. 8.5.** Piorun między podstawą chmury a powierzchnią Ziemi

Duży ładunek ujemny podstawy chmury odpycha ładunki ujemne znajdujące się na powierzchni Ziemi, a przyciąga ładunki dodatnie, więc w czasie burzy powierzchnia Ziemi pod chmurą ma ładunek dodatni. Powstaje wówczas bardzo silne pole elektryczne skierowane odwrotnie niż zwykle (ryc. 8.4). Napięcie między dolną częścią chmury a powierzchnią Ziemi może wynosić 100 mln V. Podobne jest napięcie między dolną i górną warstwą chmury.

Przy odpowiednio dużym napięciu następuje wyładowanie atmosferyczne zwane piorunem (ryc. 8.5). Pioruny przeskakują zarówno z chmury do gruntu, jak i pomiędzy warstwami jednej chmury. Zdarzają się również wyładowania pomiędzy dwiema różnymi chmurami.

Piorun jest niezwykle skomplikowanym zjawiskiem. Nie jesteśmy w stanie przewidzieć, którą drogę wybierze wyładowanie zmierzające do powierzchni Ziemi. Zależy to od lokalnej jonizacji powietrza oraz odległości chmury od gruntu. Tuż przed właściwym wyładowaniem chmurę burzową opuszcza tzw. prekursor, czyli niewielkie zgrupowanie ładunku ujemnego, które porusza się z prędkością ok. 100 km/s. Prekursor jonizuje powietrze i tworzy w ten sposób kanał przewodzący o przekroju kilku centymetrów kwadratowych (ryc. 8.6).

Gdy prekursor zbliży się do powierzchni Ziemi, następuje wyładowanie główne przenoszące ładunek dodatni z gruntu do chmury. W kanale powstaje prąd o natężeniu dochodzącym do 10 000 A (amperów). Podczas przepływu prądu trwającego zaledwie 0,1 μs powietrze rozgrzewa się nawet do 30 000 °C, w wyniku czego gwałtownie się rozszerza.




**Ryc. 8.6.** Schemat powstawania wyładowania wstępnego (prekursora) oraz głównego podczas burzy

Powoduje to powstanie fali uderzeniowej, której efektem jest grzmot towarzyszący piorunowi. W tym samym kanale następuje jeszcze kilka lub kilkanaście wyładowań idących na przemian w obie strony, jednak trwa to tak krótko, że widzimy tylko jeden błysk.

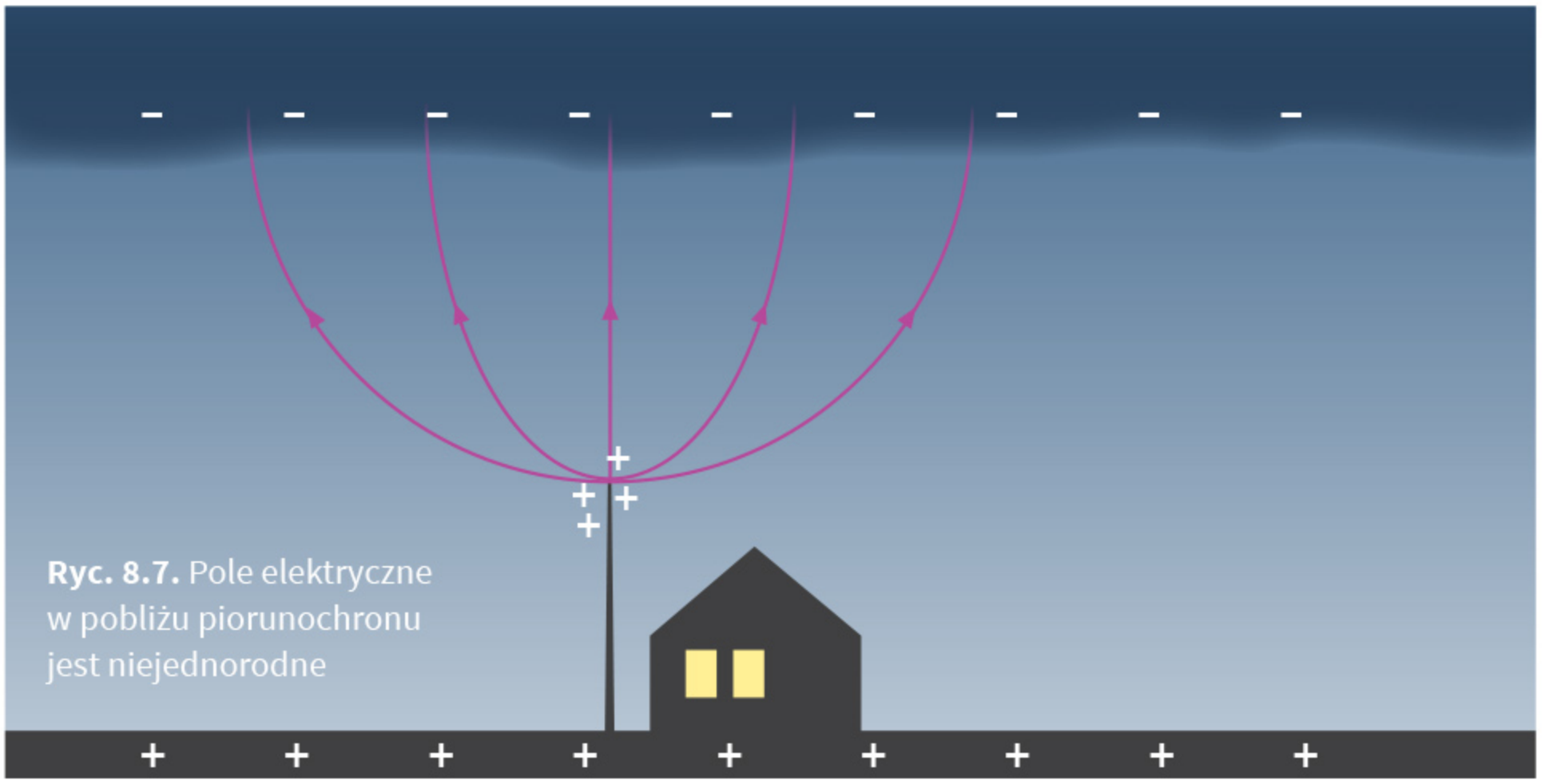
Wynika stąd, że mówienie o piorunie uderzającym w powierzchnię Ziemi jest dużym uproszczeniem, ponieważ w rzeczywistości jest to wyładowanie między chmurą a gruntem, a ładunki płyną w obie strony. Jednak w każdym wyładowaniu powierzchnia Ziemi otrzymuje ładunek ujemny, a chmura dodatni. Dzięki temu ładunek ujemny Ziemi istnieje cały czas, mimo przepływu prądu jonów, który nieustannie go zmniejsza. Pole elektryczne Ziemi jest podtrzymywane przez burze, których na świecie w ciągu każdej doby są tysiące. W czasie ich trwania pioruny odprowadzają z Ziemi ładunek dodatni i dostarczają na jej powierzchnię ładunek ujemny. Zwykle wyładowania w postaci iskry rozładowują ciała naelektryzowane, jednak pioruny odgrywają rolę odwrotną: ładują wielki kondensator Ziemia–jonosfera.

s. 352

Całkowita energia wydzielona podczas jednego wyładowania atmosferycznego może być rzędu miliarda dżuli, dlatego pioruny są dla człowieka śmiertelnym zagrożeniem. W czasie burzy, gdy jesteśmy na dworze, powinniśmy unikać przebywania na otwartej przestrzeni i kąpieli w zbiornikach wodnych. Najlepiej jest znaleźć jakieś nisko położone schronienie, oddalone od pojedynczych drzew. Podczas burzy jednym z bezpieczniejszych miejsc poza domem jest wnętrze samochodu. Metalowa karoseria auta stanowi w tym przypadku klatkę Faradaya, wewnątrz której nie ma ani ładunków elektrycznych, ani pola elektrycznego.

## Piorunochron

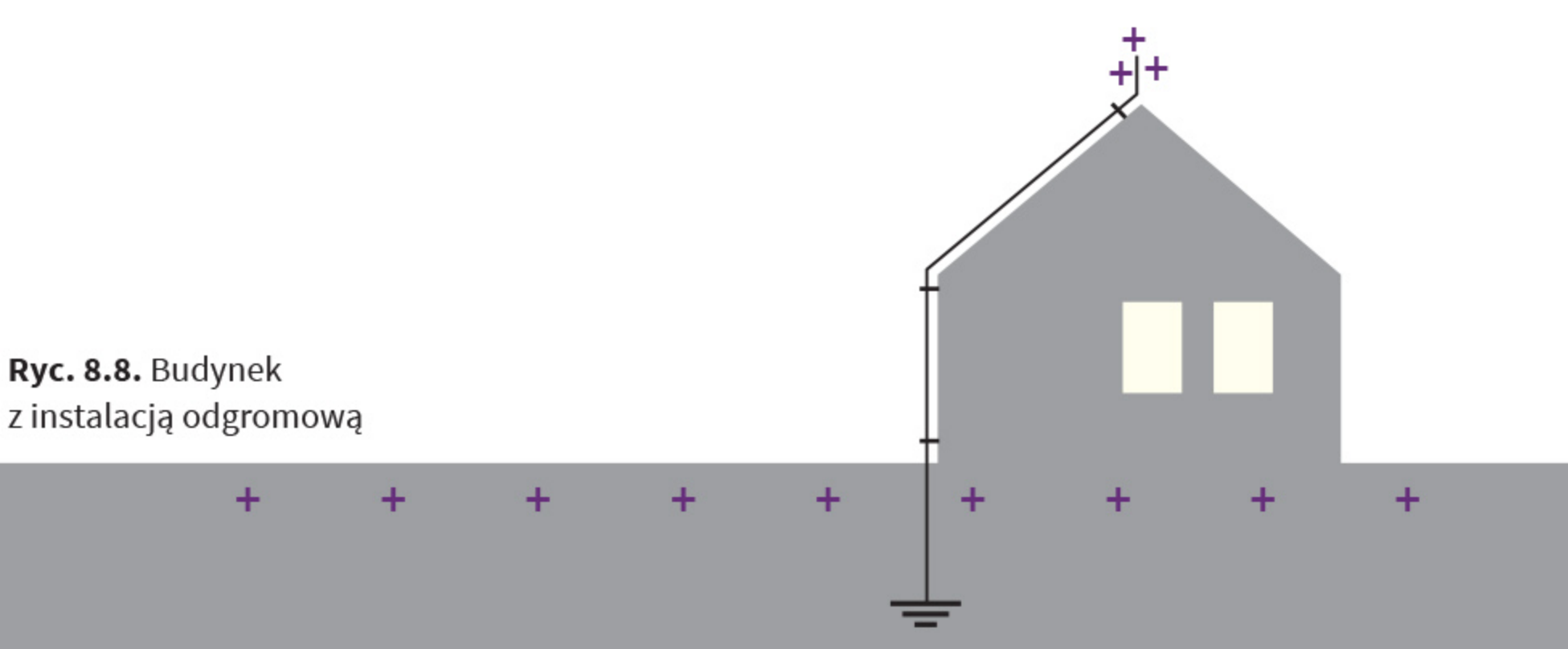
Ładunki na powierzchni naelektryzowanego przewodnika gromadzą się w dużych ilościach na ostrych krawędziach i wystających ostrzach (rozdział 6). Efekt ten został wykorzystany do ochrony budynków przed skutkami wyładowań atmosferycznych. Piorunochron to metalowe, uziemione ostrze, wyprowadzone ponad dach budynku. Może mieć postać wysokiego masztu w pobliżu budynku lub przewodu poprowadzonego od dachu budynku do ziemi. Ze względu na silne naelektryzowanie piorunochron w zasadniczy sposób zmienia obraz pola elektrycznego pod chmurą burzową (ryc. 8.7).



**Ryc. 8.7.** Pole elektryczne w pobliżu piorunochronu jest niejednorodne

Linie pola elektrycznego silnie zakrzywiają się w kierunku ostrza i omijają obiekty położone w okolicy. To powoduje, że ładunki elektryczne prekursora, tworzące kanał jonowy dla głównego uderzenia pioruna, omijają chronione obszary. Piorunochron w trakcie wyładowania atmosferycznego przeprowadza do gruntu i do chmury ładunki, które bez niego płynęłyby przez budynek (ryc. 8.8).

Za wynalazcę piorunochronu uważa się Benjamina Franklina, który w roku 1752 założył pierwsze piorunochrony na domach w Filadelfii.



**Ryc. 8.8.** Budynek z instalacją odgromową

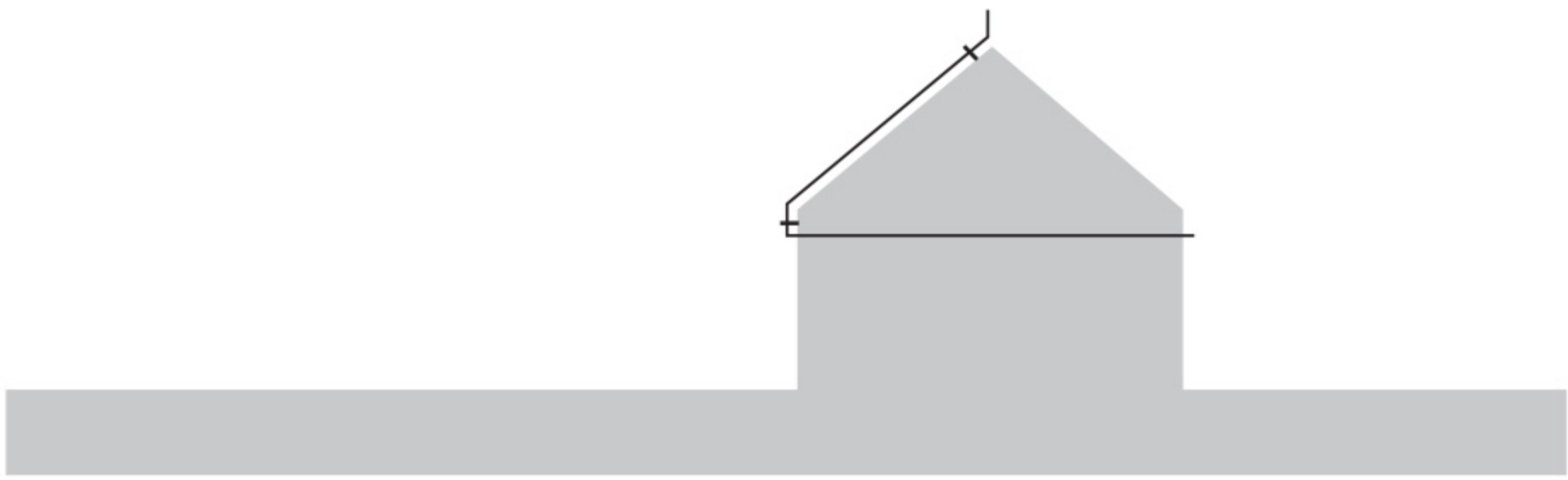
Zjawiska elektryczne w atmosferze są niezwykle złożone i nie do końca wyjaśnione. Znamy wyładowania elektryczne zupełnie inne niż pioruny. Kilka z nich przedstawiono na infografice na s. 58–59.

## PODSUMOWANIE

- Powierzchnia Ziemi razem z jonosferą tworzą naładowany kondensator.
- Podczas wyładowań atmosferycznych następuje ładowanie kondensatora Ziemia–jonosfera.
- **Piorunochrony** stanowią zabezpieczenie budynków przed skutkami wyładowań atmosferycznych.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Przed wynalezieniem piorunochronu w czasie burzy dzwonnicy wchodzili na wieżę i dzwonili, aby odstraszyć pioruny. Czy z punktu widzenia nauki był to skuteczny sposób? Czy było to bezpieczne dla dzwonników? Uzasadnij odpowiedzi.
2. Dlaczego jonosfera jest bardzo dobrym przewodnikiem prądu?
3. Właściciel domu samodzielnie zainstalował piorunochron, którego dolny koniec stanowi nieuziemiona pętla obiegająca budynek, tak jak pokazano na rysunku. Czy zapewni to skuteczną ochronę przed piorunem? Uzasadnij odpowiedź.



4. Podczas pojedynczego wyładowania atmosferycznego wydziela się energia ok. 200 kWh (1 kWh = 3,6 mln J). Napięcie między chmurą a gruntem jest równe 30 MV. Oszacuj ładunek, który przepływa podczas tego wyładowania. Przyjmij, że napięcie między chmurą a powierzchnią Ziemi podczas wyładowania się nie zmienia.
5. Oblicz pojemność kondensatora Ziemia–jonosfera. Wskazówka: odpowiednie dane znajdziesz w treści rozdziału.

# Wyładowania atmosferyczne

Wyładowania atmosferyczne nie ograniczają się jedynie do piorunów, najczęściej przez nas obserwowanych. Wyładowania z chmur burzowych mogą kierować się również w stronę jonosfery. Niektóre rodzaje wyładowań sięgają bardzo wysoko, nawet do 100 km nad powierzchnię Ziemi.

## Błękitne smugi

Błękitne smugi (*blue jets*) to wyładowania rozciągające się od szczytu chmury burzowej do wysokości ok. 50 km.

## Wyładowanie koronowe (ognie świętego Elma)

Wyładowania koronowe (*corona discharge*) powstają wówczas, gdy wokół ciała jest pole elektryczne wystarczająco silne, by zjonizować otaczające powietrze, lecz zbyt słabe, by spowodować przeskok iskry.

Ognie świętego Elma (*St. Elmo's fire*) pojawiające się tuż przed burzą na końcach masztów żaglowców są ostrzeżeniem przed możliwym uderzeniem pioruna. Dla zabobonnych marynarzy były znakiem wysłuchania ich modlitw.

## Elfy

Elfy (*elves*) to ogromne dyski słabej poświaty, tworzące się na wysokości ok. 100 km nad powierzchnią Ziemi. Są tak słabe i pojawiają się na tak krótko, że nie widać ich gołym okiem. Ujawniają się dopiero na zdjęciach robionych czułym sprzętem.

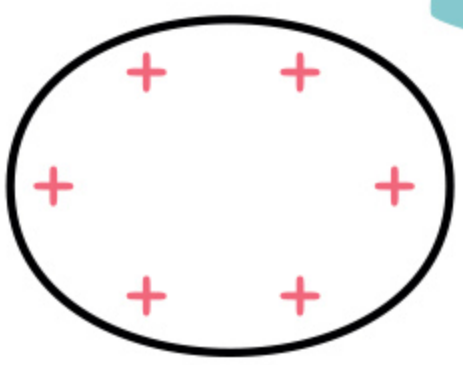
## Duszki

Duszki (*sprites*) to wyładowania pojawiające się wysoko w jonosferze. Są wyjątkowo urokliwe, ale trwają tylko kilkanaście milisekund. Powstają tuż po uderzeniu w Ziemię bardzo silnego pioruna.

## Wyładowania pajęczynowe

Wyładowania pajęczynowe (*spider lightning*) to snop błyskawic biegnących poziomo wzdłuż podstawy chmur. Powstają tuż za frontem burzowym.

# ELEKTROSTATYKA



Nadmiarowy ładunek gromadzi się na powierzchni przewodnika.
ciało naelektryzowane

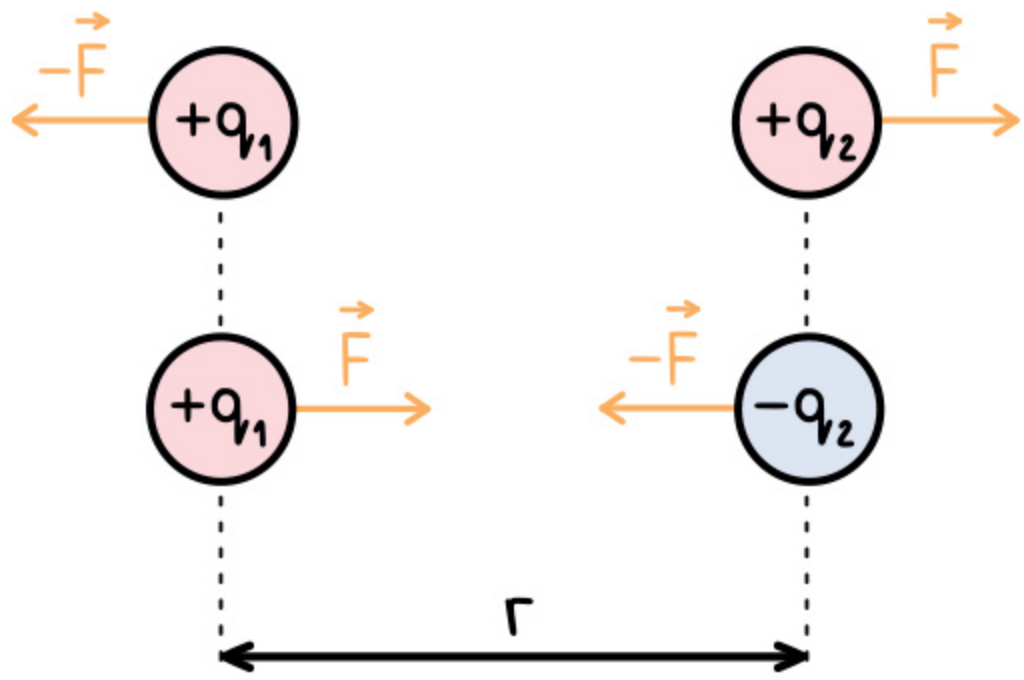
## ŁADUNEK ELEMENTARNY

Ładunek pojedynczego protonu

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19} C$$

Ładunki o tych samych znakach się odpychają.

Ładunki o różnych znakach się przyciągają.




## PRAWO COULOMBA

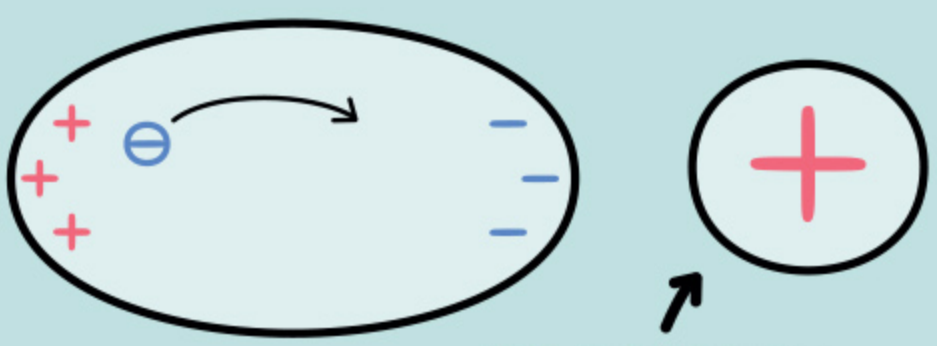
Każde dwie cząstki naładowane działają na siebie siłami elektrycznymi o wartości wprost proporcjonalnej do iloczynu tych ładunków, a odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi.

$$F_e = k\frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2}$$

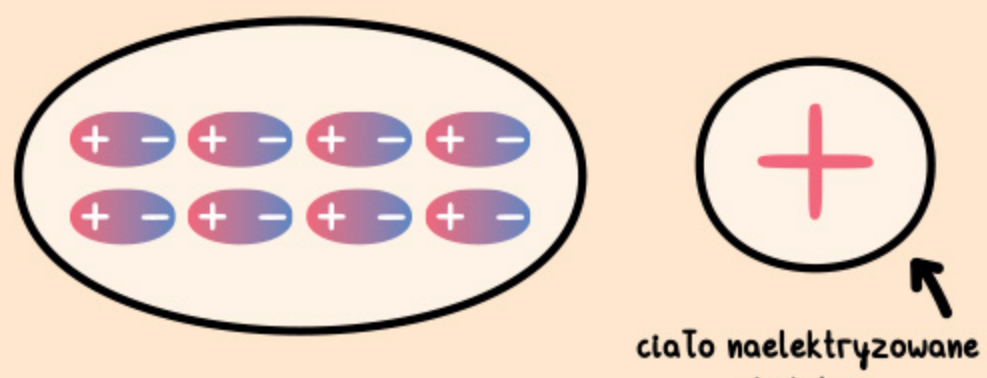
## ZASADA ZACHOWANIA ŁADUNKU

Całkowity ładunek elektryczny układu izolowanego się nie zmienia.

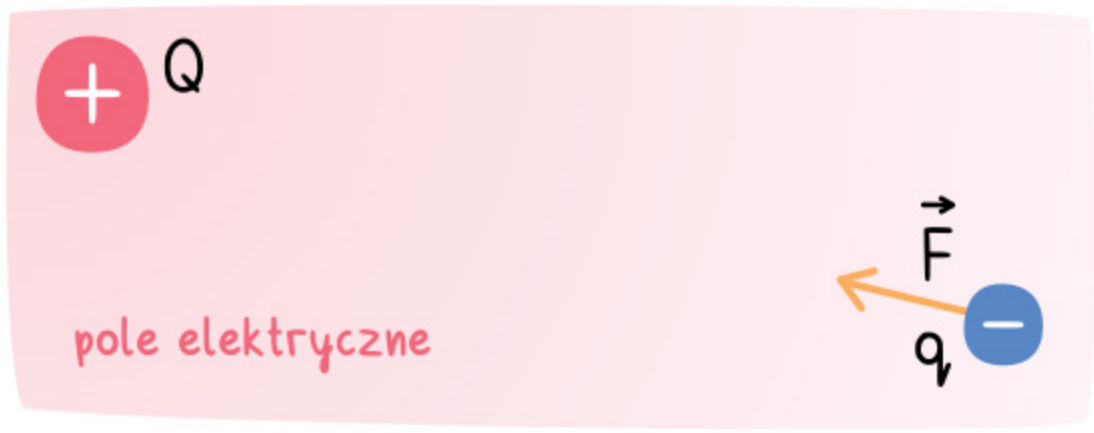
**Przewodnik** – ładunek swobodnie przemieszcza się wewnątrz.

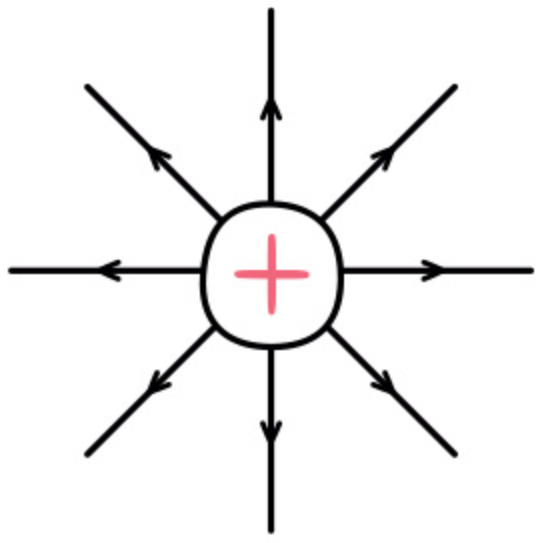



**Izolator** – ładunki nie mogą się przemieszczać.

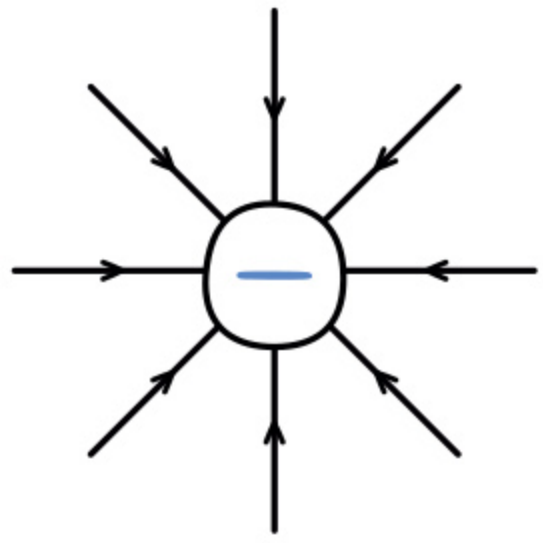


Pole elektryczne działa siłą na ładunki, które się w nim znajdują.

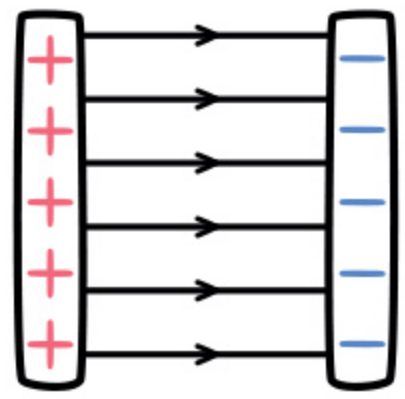


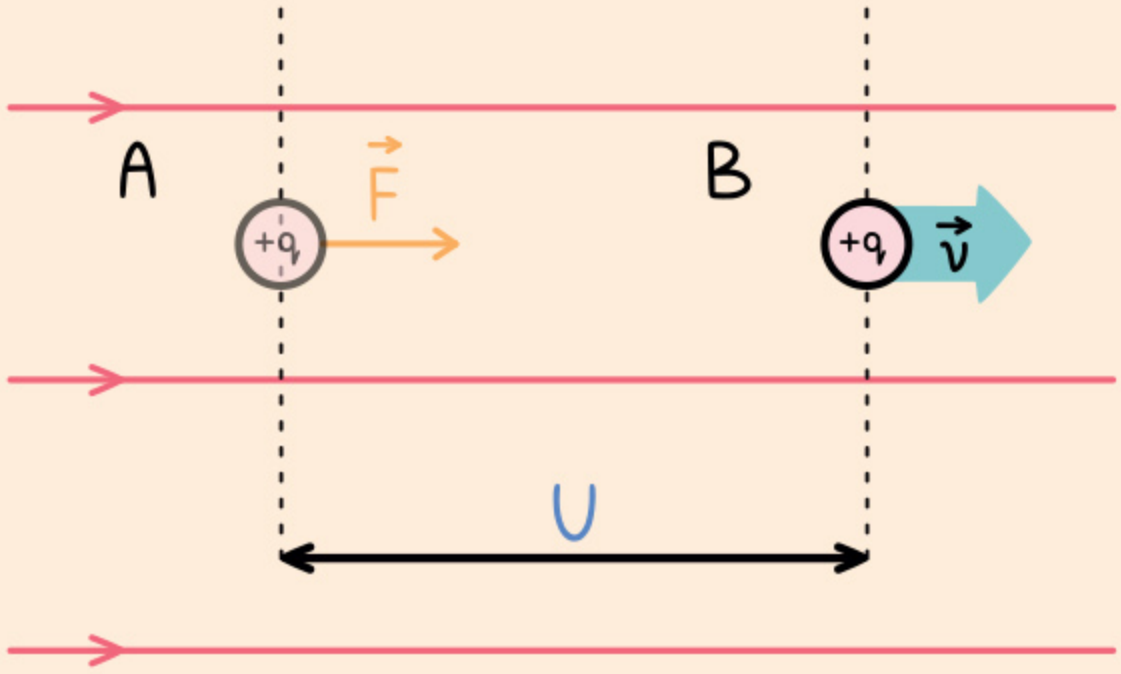
pole elektryczne wokół ładunku dodatniego



pole elektryczne wokół ładunku ujemnego



pole elektryczne między naelektryzowanymi płytami




**Napięcie elektryczne**
to różnica potencjałów w dwóch punktach.

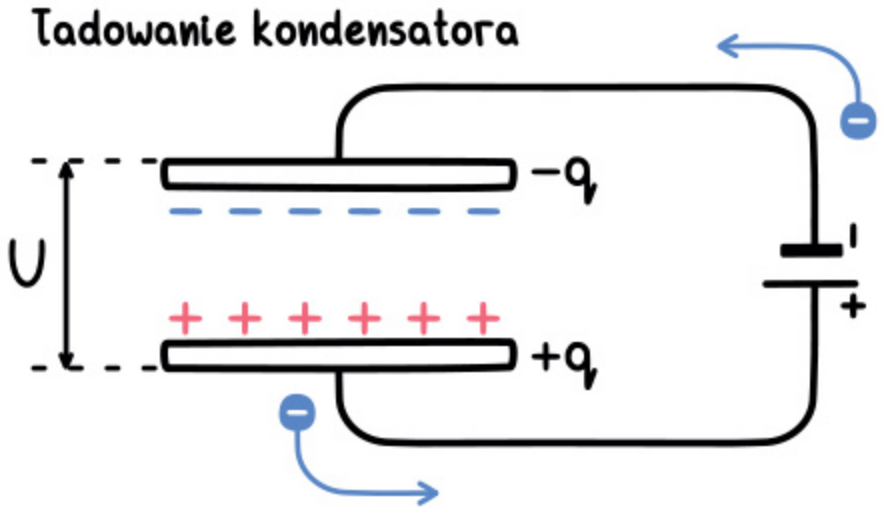
praca wykonana przez pole elektryczne

$$W = q \cdot U$$

ładunek

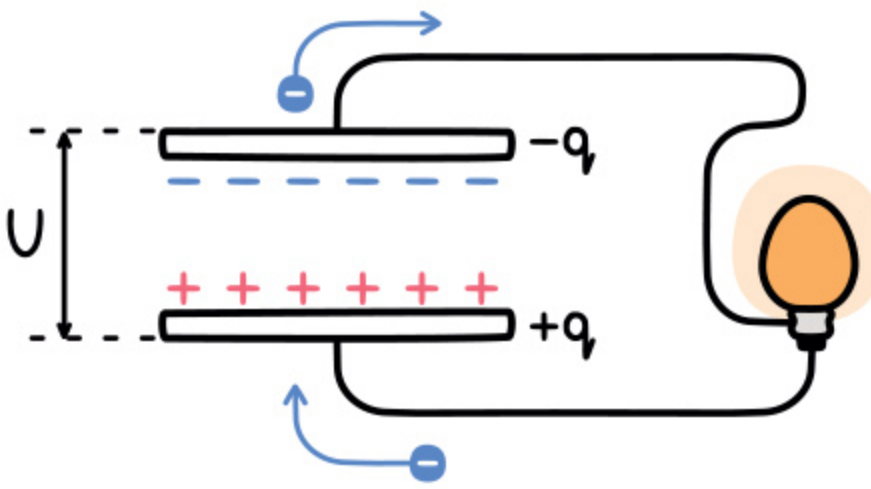
napięcie

Ładowanie kondensatora




**Kondensator** stanowią dwa przewodniki oddzielone od siebie izolatorem. W kondensatorach można gromadzić energię elektryczną.

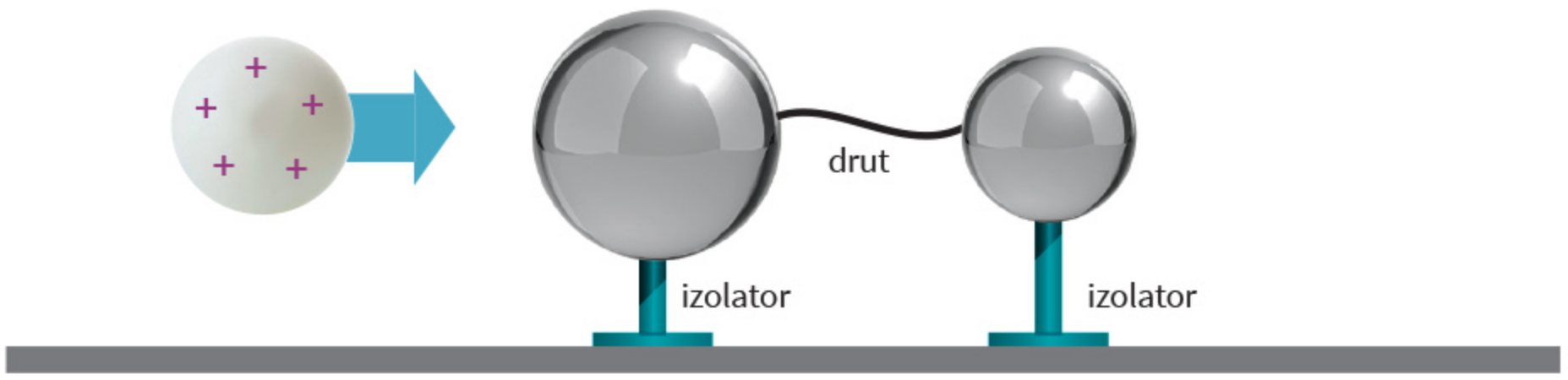
KONDENSATOR



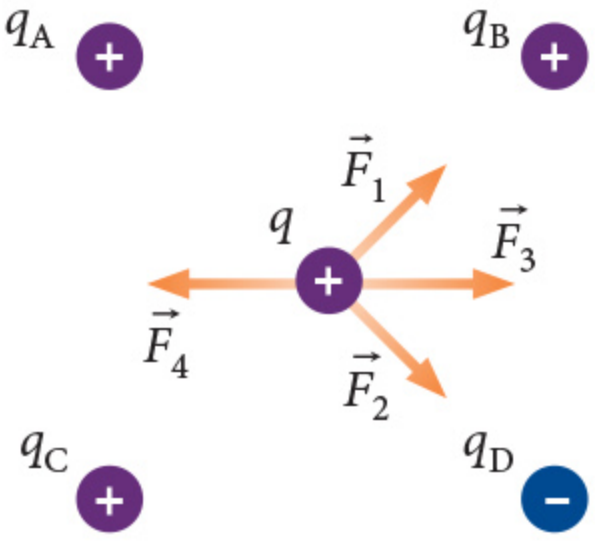

rozładowanie kondensatora

## PYTANIA I ZADANIA

1. W wyniku elektryzowania plastikowej rurki poprzez pocieranie jej jedwabną szmatką rurka uzyskała ładunek ujemny –2 nC. Jaki ładunek uzyskała szmatka?
2. Do połączonych ze sobą przewodem nienaelektryzowanych metalowych kul zbliżono (bez dotykania) ciało naelektryzowane dodatnio. Wyjaśnij, dlaczego mniejsza kula uzyskała ładunek dodatni.




3. W wierzchołkach kwadratu są umieszczone cztery ładunki o takiej samej wartości bezwzględnej, a w jego środku – pewien dodatni ładunek, tak jak przedstawiono na rysunku.



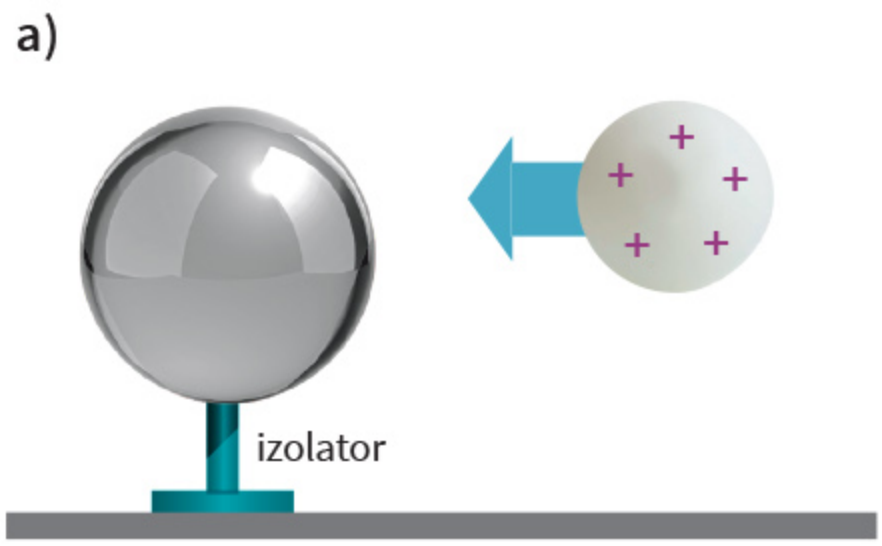

$q_A = q_B = q_C = |q_D|$

**Wybierz poprawne dokończenie zdania.**

Wypadkową siłę działającą na ładunek $q$ poprawnie przedstawia wektor

**A.** $\vec{F}_1$. **B.** $\vec{F}_2$. **C.** $\vec{F}_3$. **D.** $\vec{F}_4$.

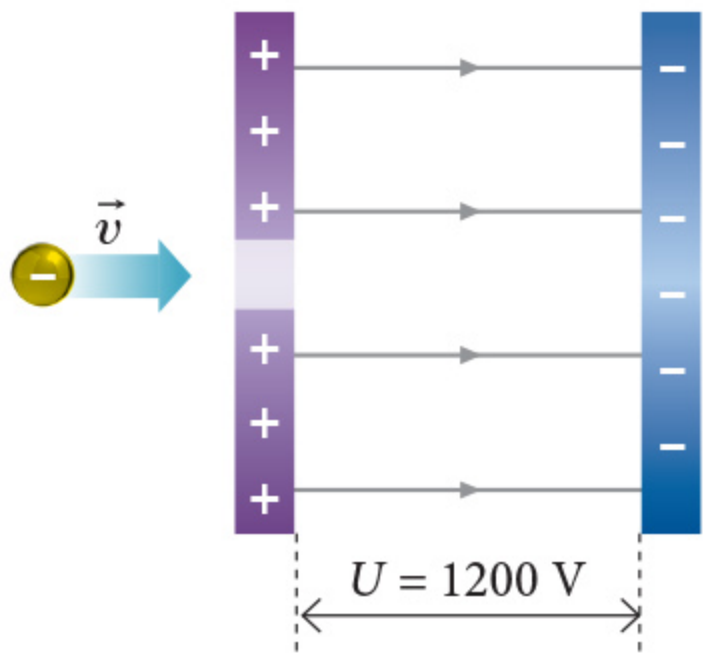
4. Do metalowej, początkowo nienaelektryzowanej kuli zbliżono ciało naelektryzowane dodatnio (a). Następnie kulę uziemiono (b).



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

| | | | |
|---|---|---|---|
| **1.** | Przed uziemieniem ładunek ujemny był równomiernie rozłożony na całej powierzchni metalowej kuli, a ładunek dodatni znajdował się w jej środku. | **P** | **F** |
| **2.** | Gdy metalowa kula została uziemiona, dopłynęły do niej elektrony i spowodowały jej naelektryzowanie ładunkiem ujemnym. | **P** | **F** |
| **3.** | Jeżeli najpierw usuniemy uziemienie, a później naładowane dodatnio ciało, na kuli pozostanie ładunek ujemny. | **P** | **F** |

**5.** Kropla oleju naelektryzowana ładunkiem ujemnym –9,4 nC wpada w obszar pola elektrycznego wytworzonego przez dwie płyty. Napięcie między płytami jest równe 1200 V. Kropla zatrzymuje się tuż przed uderzeniem w płytę naelektryzowaną ujemnie. Oblicz energię kinetyczną kropli w momencie mijania płyty naelektryzowanej dodatnio. Pomiń wpływ siły ciężkości na ruch kropli.

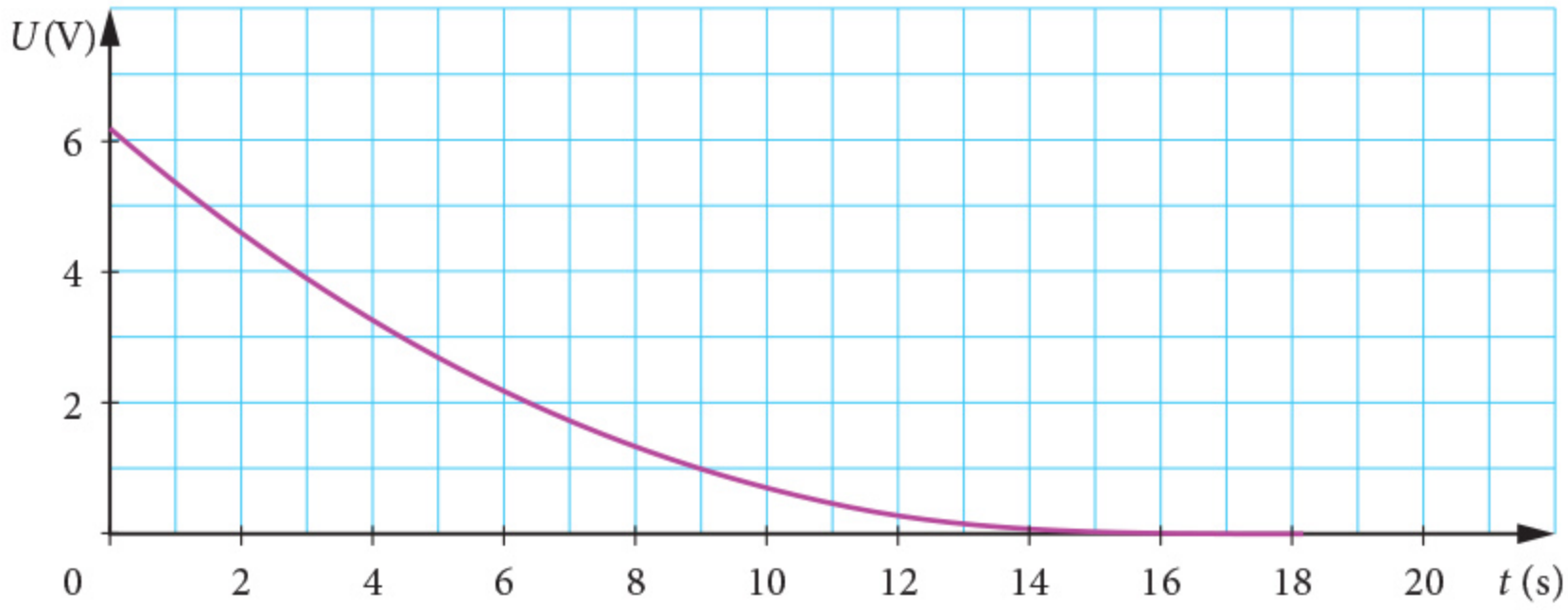



**6.** W chwili początkowej dwie kulki naelektryzowane ujemnie znajdowały się w odległości *r* od siebie. Następnie zmniejszono ładunek na jednej z nich o połowę oraz dwukrotnie zmniejszono odległość między kulkami.
**Wybierz właściwe dokończenie zdania spośród A–C oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–2.**
Wartość sił odpychania między kulkami w chwili końcowej była

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **A.** | taka sama jak | w chwili początkowej, ponieważ | **1.** | siła elektryczna jest odwrotnie proporcjonalna do odległości między ładunkami. |
| **B.** | dwa razy mniejsza niż | | **2.** | iloczyn ładunków kulek zmalał dwukrotnie, a kwadrat odległości między nimi zmalał czterokrotnie. |
| **C.** | dwa razy większa niż | | | |

**7.** Dwie metalowe kulki tej samej wielkości, naelektryzowane ładunkami –2,6 nC oraz +3,8 nC, znajdowały się w pewnej odległości od siebie. Kulki zetknięto ze sobą, a następnie rozsunięto na odległość równą połowie odległości początkowej. Ile razy siły wzajemnego oddziaływania tych kulek w chwili początkowej były większe (lub mniejsze) od tych sił w chwili końcowej?

**8.** Kondensator o pojemności 3200 μF podłączono do baterii, a po naładowaniu odłączono od niej. Następnie do naładowanego kondensatora podłączono opornik. Na wykresie przedstawiono zależność napięcia na okładkach tego kondensatora po podłączeniu opornika od czasu.




Na podstawie wykresu:

**a)** oszacuj początkowy ładunek zgromadzony na jednej z okładek kondensatora;

**b)** wyznacz czas, po jakim napięcie między okładkami kondensatora zmniejszy się o połowę;

**c)** oszacuj ładunek, który pozostanie na jednej z okładek kondensatora po tym czasie.

**9.** Napięcie między okładkami kondensatora jest równe 2,3 V. Jak zmieni się pojemność tego kondensatora, gdy napięcie między okładkami wzrośnie do 4,5 V? Uzasadnij odpowiedź.

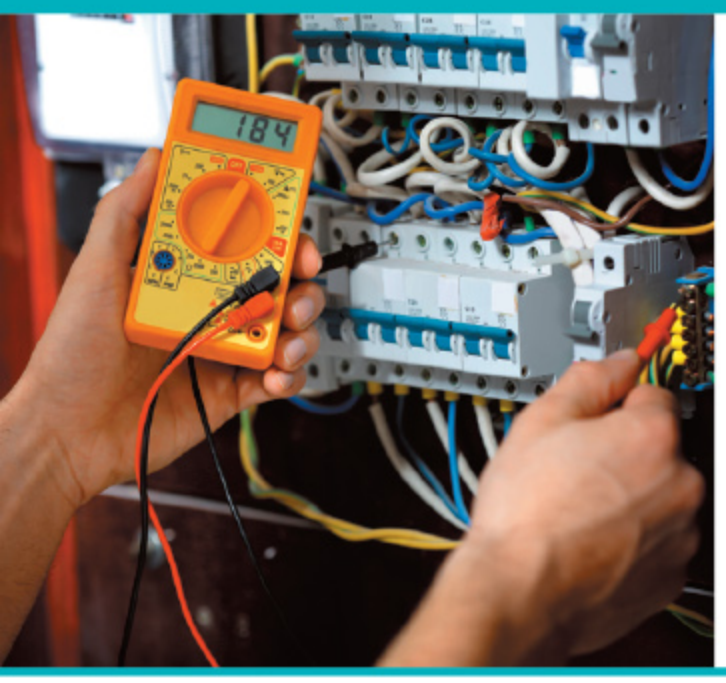
**10.** Skąd bierze się ujemny ładunek w podstawie chmury burzowej?

## Najważniejsze pojęcia

- atom [*atom*] 9
- dipol elektryczny [*electric dipole*] 17
- elektron swobodny [*free electron*] 10
- energia elektryczna [*electrical energy*] 33
- izolator [*insulator*] 15
- klatka Faradaya [*Faraday cage*] 40
- kondensator [*capacitor*] 45
- linie pola elektrycznego [*electric field lines*] 27
- ładunek elektryczny [*electric charge*] 8
- ładunek elementarny [*elementary charge*] 8
- napięcie elektryczne [*voltage*] 34
- piorun [*lightning*] 54
- piorunochron [lightning rod] 56
- pojemność elektryczna (kondensatora) [*capacitance*] 46
- pole elektryczne [*electric field*] 26
- potencjał elektryczny [*electric potential*] 33
- prawo Coulomba [*Coulomb's law*] 20, 21
- przewodnik [*conductor*] 10
- siła elektryczna [*electric force*] 9
- uziemienie [*ground*] 12

# PRĄD ELEKTRYCZNY

**Jak to się dzieje, że lampy uliczne zapalają się jednocześnie, skoro prąd w przewodach ma prędkość ślimaka? Dlaczego włączona grzałka elektryczna nagrzewa się, a przewody łączące ją z gniazdkiem już nie? Czy bezpiecznik w domowej sieci chroni nas przed porażeniem? Wyjaśnienia tych zjawisk znajdziecie w dziale PRĄD ELEKTRYCZNY.**



# 9. Obwód prądu elektrycznego

- Prąd elektryczny
- Źródła napięcia elektrycznego
- Natężenie prądu

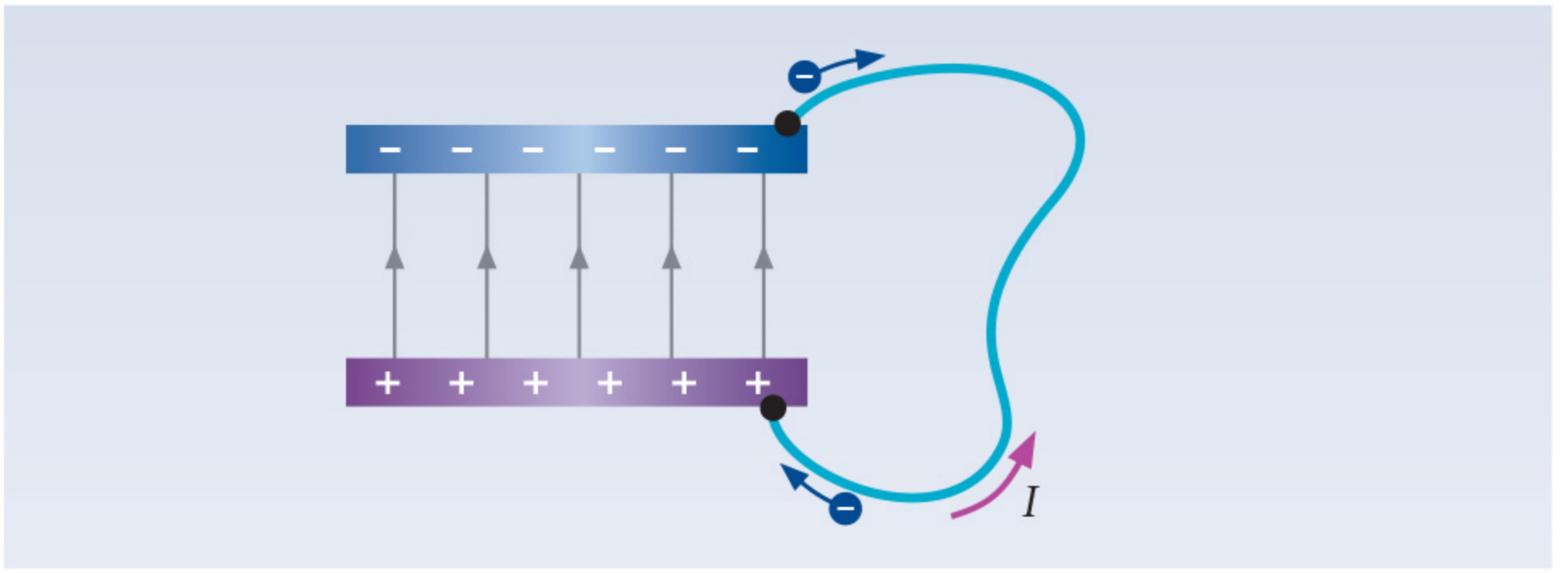
➔ **Przypomnij sobie** wiadomości o ruchu cząstek naładowanych w polu elektrycznym.

Trudno wyobrazić sobie współczesny świat bez energii elektrycznej. Nawet krótkotrwałe przerwy w jej dostawie są dla nas uciążliwe. Nośnikiem tej energii jest prąd elektryczny i to właśnie za pośrednictwem prądu trafia ona do wszystkich odbiorców.

## Prąd elektryczny

Gdy łączymy przewodem okładki naładowanego kondensatora, to ładunki w przewodzie przepływają, co powoduje rozładowanie kondensatora (ryc. 9.1). Mówimy, że w przewodzie płynie prąd elektryczny.

**Prąd elektryczny** to uporządkowany przepływ cząstek naładowanych.




**Ryc. 9.1.** Prąd płynący w przewodzie rozładowuje kondensator

Umownie przyjmuje się, że **kierunek prądu to kierunek przepływu ładunku dodatniego** (na rycinie 9.1 oznaczony strzałką z literą *I*). W rzeczywistości to elektrony przepłynęły z górnej okładki kondensatora do dolnej. W metalach prąd elektryczny tworzą elektrony, które poruszają się w przeciwną stronę niż umowny kierunek prądu; w cieczach prąd tworzą jony, a w gazach – jony i elektrony.

## Źródła napięcia elektrycznego

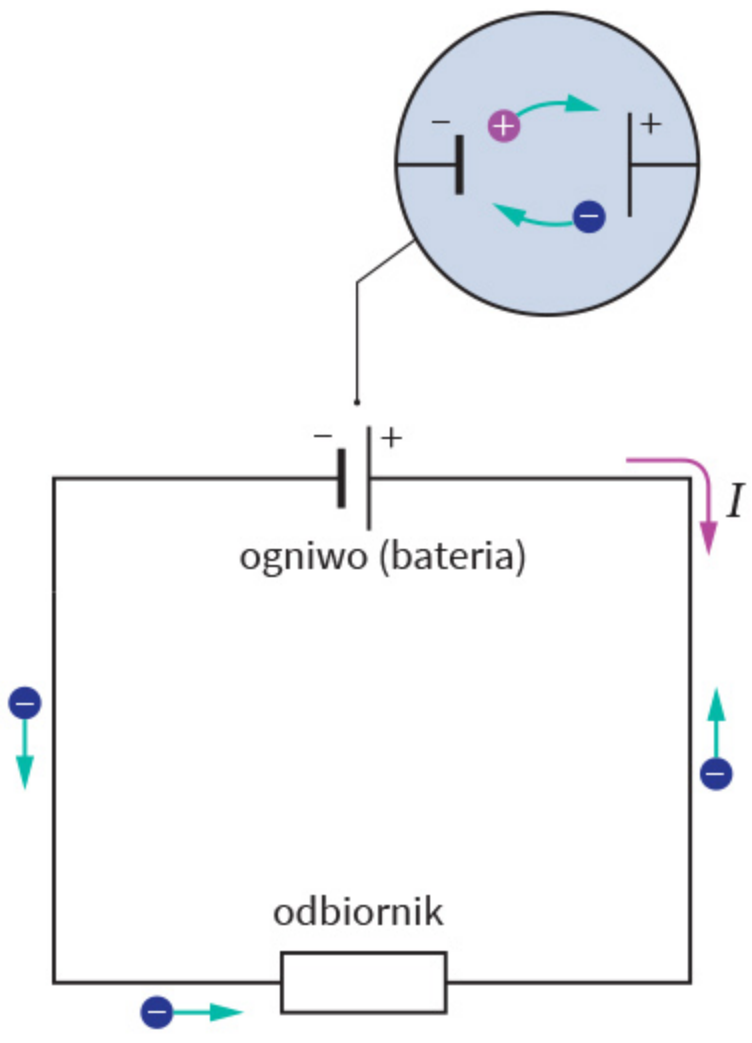
W wyniku rozładowania kondensatora uzyskuje się zwykle krótkotrwały przepływ prądu, jednak do celów użytkowych potrzebujemy prądu płynącego przez dowolnie długi czas. Żeby taki prąd uzyskać, elementy przewodzące należy połączyć w obwód zamknięty i wytworzyć w nim pole elektryczne wymuszające ruch ładunków. Zapewniają to **źródła napięcia**. Są to elementy obwodu podtrzymujące pole elektryczne w obwodzie. Mogą to być np. ogniwa galwaniczne (czyli powszechnie stosowane baterie), wykorzystujące reakcje chemiczne, w których wyniku część energii wiązań międzycząsteczkowych przekształca się w energię elektryczną. Coraz powszechniejsze stają się też ogniwa fotowoltaiczne, czerpiące energię ze światła słonecznego.

**Ryc. 9.2.** Schemat prostego obwodu elektrycznego

Podstawową cechą ogniw jest napięcie (czyli różnica potencjałów elektrycznych) między dwoma zaciskami. Wyższy potencjał jest na zacisku oznaczonym znakiem „+”. Jeżeli włączymy źródło napięcia do obwodu elektrycznego (ryc. 9.2), to będzie ono ciągle podtrzymywało pole elektryczne przesuwające ładunki wzdłuż obwodu.

W obwód elektryczny powinien być włączony co najmniej jeden odbiornik prądu, czyli urządzenie przekształcające energię elektryczną w inny rodzaj energii. Przykładem odbiornika może być żarówka, która przekształca energię elektryczną w świetlną, albo opornik przekształcający energię elektryczną w ciepło.

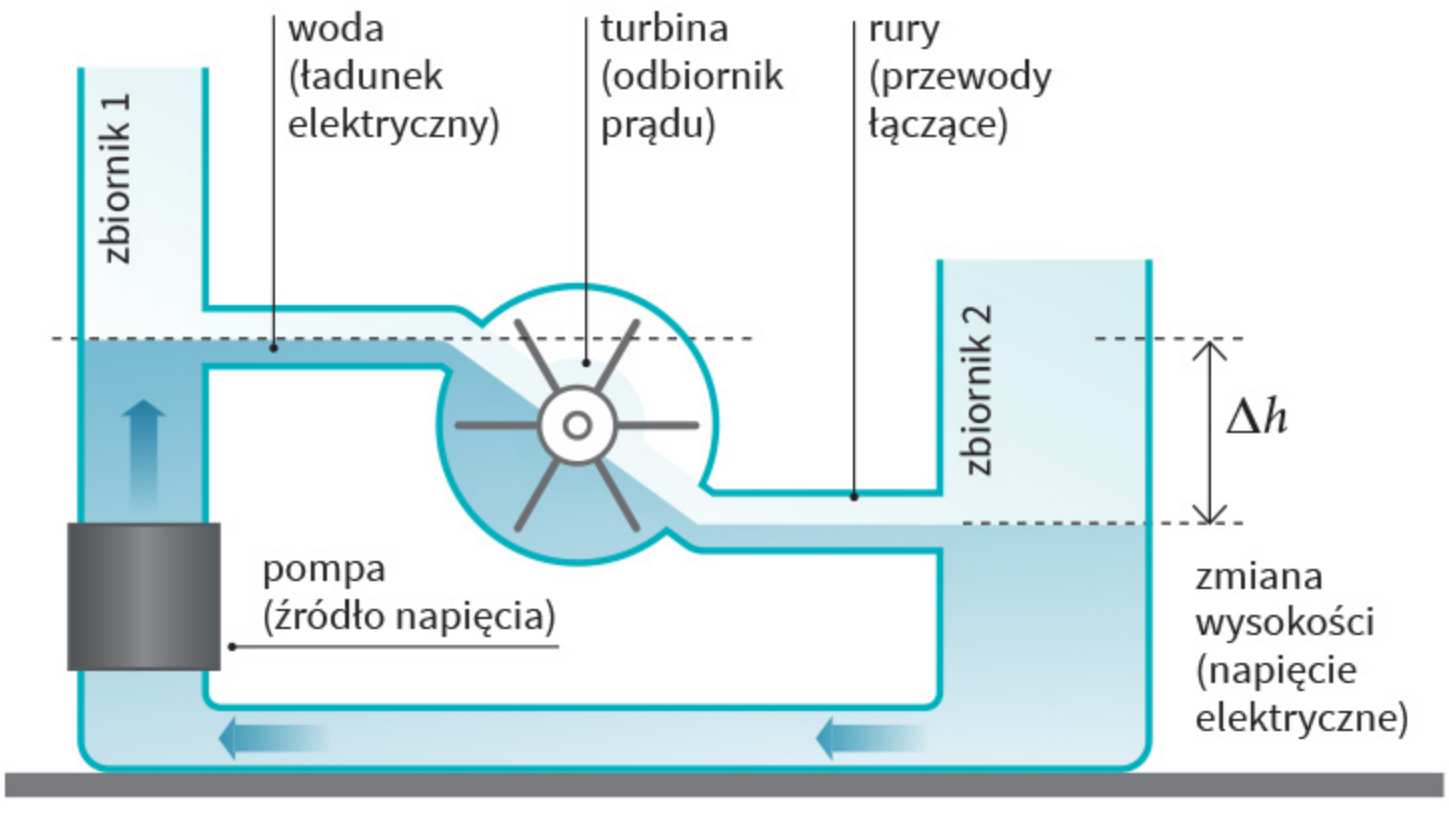
W obwodzie prąd płynie od potencjału wyższego (+) do niższego (–). Natomiast wewnątrz samego ogniwa następuje transport ładunków wbrew siłom elektrycznym: ładunków dodatnich w stronę dodatniego zacisku baterii, a ładunków ujemnych – w stronę ujemnego (ryc. 9.3). Zapewniają to procesy chemiczne zachodzące wewnątrz ogniwa – podtrzymują one istnienie pola elektrycznego i prądu. Dzięki temu ładunki mogą płynąć wzdłuż całego obwodu, łącznie z wnętrzem ogniwa.




**Ryc. 9.3.** Ogniwo wymusza przepływ ładunków w obwodzie

Przepływ prądu elektrycznego w obwodzie i ogniwie można przyrównać do obiegu wody w instalacji hydraulicznej. Przeanalizujmy rycinę 9.4. Dzięki sile grawitacji woda płynie z miejsc położonych wyżej do miejsc położonych niżej,

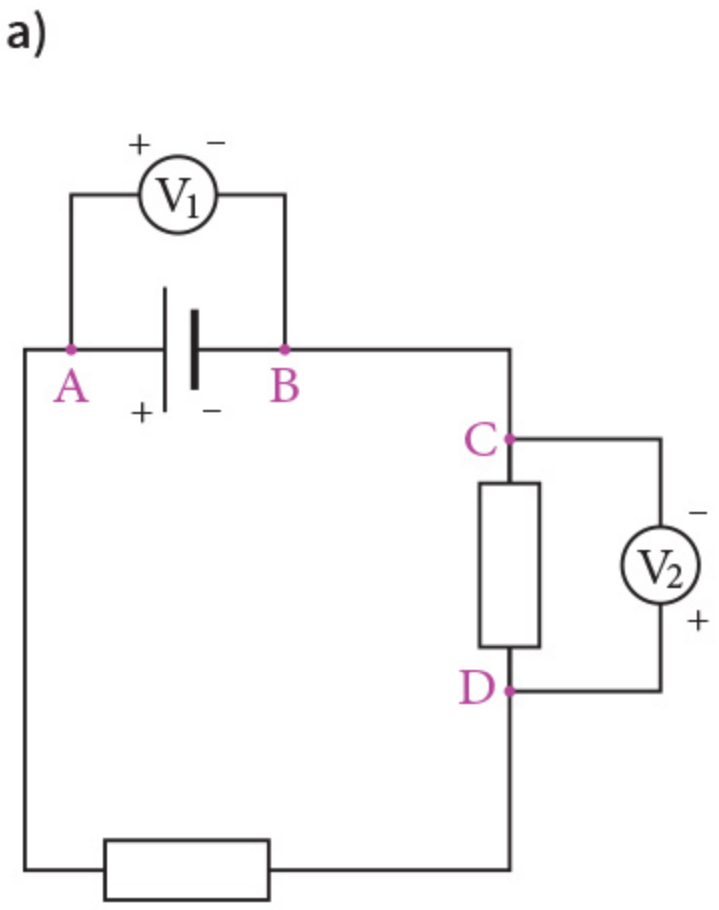
aż do wyrównania poziomów. Żeby zapewnić ciągły przepływ wody, trzeba podłączyć pompę, która będzie transportować wodę ze zbiornika o niższym poziomie do tego o poziomie wyższym. W tym modelu wodnym różnica wysokości między poziomami wody odgrywa rolę napięcia elektrycznego, woda – ładunku elektrycznego, a siła grawitacji – siły elektrycznej. Zbiornik 1 odpowiada dodatniemu zaciskowi źródła napięcia, a zbiornik 2 – zaciskowi ujemnemu.




**Ryc. 9.4.** Obieg wody w instalacji hydraulicznej. Elementy tej instalacji odpowiadają elementom obwodu elektrycznego (podane w nawiasach)

Pompa wykonuje pracę, a w turbinie, czyli odbiorniku energii, płynąca woda oddaje uzyskaną w pompie energię. Podobnie jest w obwodzie elektrycznym: źródło napięcia wykonuje pracę i zwiększa energię ładunków, a w odbiorniku energia ładunków jest przekształcana w inną użyteczną dla nas postać.

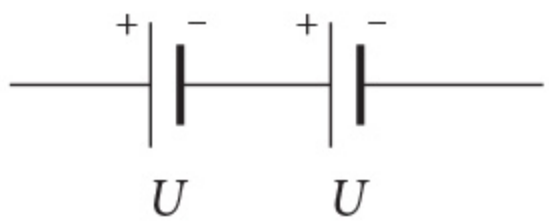
Do pomiaru napięcia elektrycznego służy **woltomierz** (ryc. 9.5). Włączamy go do obwodu w punktach, między którymi chcemy zmierzyć napięcie. Na przykład woltomierz $V_1$ ze schematu 9.5a mierzy napięcie na zaciskach źródła napięcia (między punktami A i B), a woltomierz $V_2$ – między punktami, w których prąd wpływa do odbiornika i z niego wypływa (między punktami C i D).




**Ryc. 9.5. a)** Schemat włączenia woltomierzy do obwodu, **b)** woltomierz analogowy, **c)** woltomierz cyfrowy

## Łączenie ogniw

Ogniwa można łączyć ze sobą w szereg, jak pokazano na rycinie 9.6. Przyjmijmy, że ogniwa są jednakowe. Biegun dodatni (+) jednego ogniwa należy połączyć z biegunem ujemnym (–) kolejnego. Tak połączone ogniwa działają zgodnie, czyli spowodują przepływ prądu w tę samą stronę (na ryc. 9.6 w lewo).




**Ryc. 9.6.** Szeregowe łączenie ogniw

Jakie jest napięcie między „+” lewego ogniwa a „–” prawego? Napięcie na jednym ogniwie oznaczmy jako $U$. Podczas przesuwania ładunku każde z ogniw wykonuje pracę:

$$W = Uq$$

O taką wartość wzrasta energia przenoszonego ładunku. Wobec tego przyrost energii elektrycznej ładunku $q$, który przepłynie przez oba ogniwa, jest dwa razy większy i wynosi $2Uq$. Po połączeniu szeregowym $n$ takich ogniw uzyskamy zatem napięcie $nU$.

Jednym z najtańszych w produkcji ogniw jest ogniwo Leclanchégo wytwarzające napięcie 1,5 V. To właśnie z takich ogniw zbudowane są popularne baterie (ryc. 9.7) i dlatego mają one napięcie będące wielokrotnością 1,5 V. Na przykład z trzech takich ogniw połączonych szeregowo otrzymamy baterię o napięciu 4,5 V. Z tego też powodu nazw *ogniwo* i *bateria* w języku potocznym używa się zamiennie.

s. 338 Na stronie 338 znajduje się scenariusz doświadczenia 2, w którym badamy napięcie na układzie baterii połączonych szeregowo.

**Ryc. 9.7.** Baterie mogą składać się z wielu ogniw

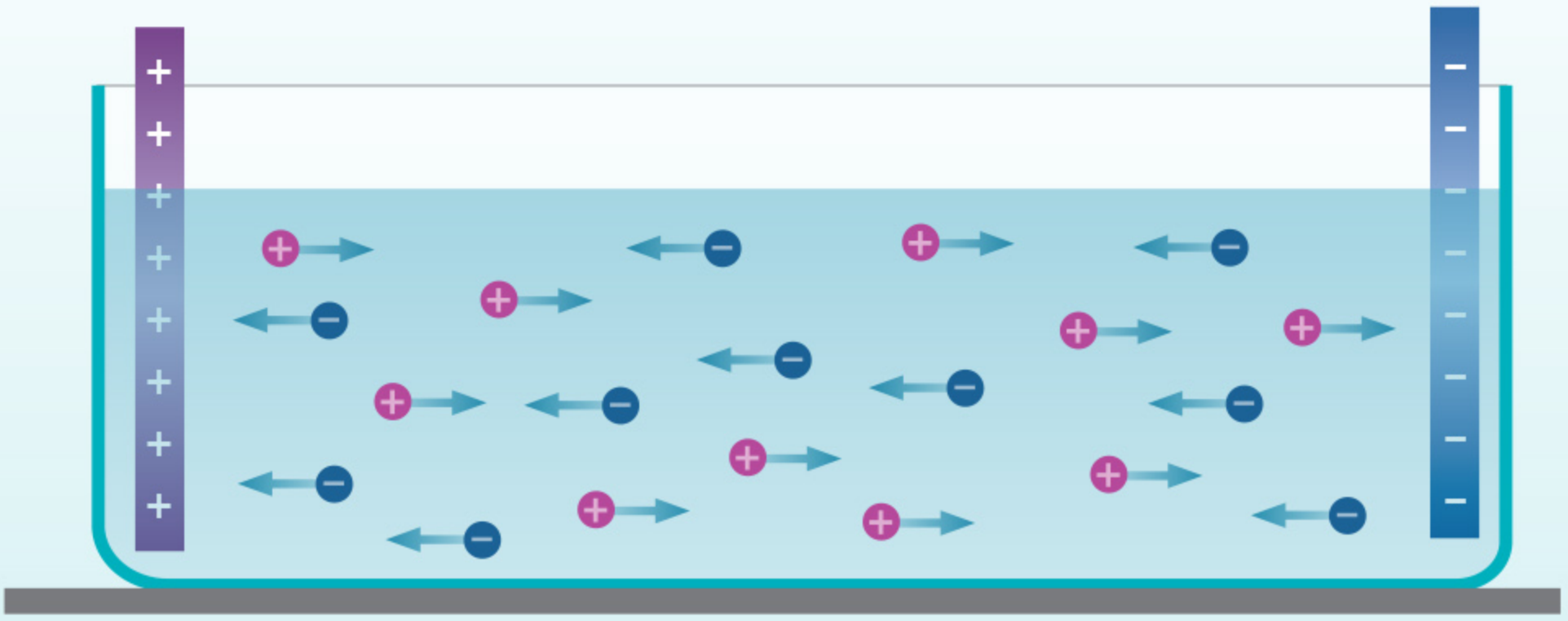
## WARTO WIEDZIEĆ

### Malapterurus electricus

Sum elektryczny (*Malapterurus electricus*) to ryba wytwarzająca pole elektryczne dzięki komórkom nazywanych elektrocytami. Pojedynczy elektrocyt wytwarza pole o napięciu ułamka wolta. W ciele ryby są jednak tysiące tych komórek połączonych w szeregi, więc całkowite napięcie sięga 300–400 V. Dzięki temu sum elektryczny może porazić nawet duże stworzenie (choć nie zanotowano żadnego przypadku śmiertelnego porażenia człowieka). Skutki porażenia zależą od przekazanej energii, ta zaś zależy od iloczynu napięcia i przepływającego ładunku. Przy małych ładunkach nawet duże napięcie może być niegroźne.
Sum elektryczny żyje w Nilu i w jeziorze Czad (Afryka).

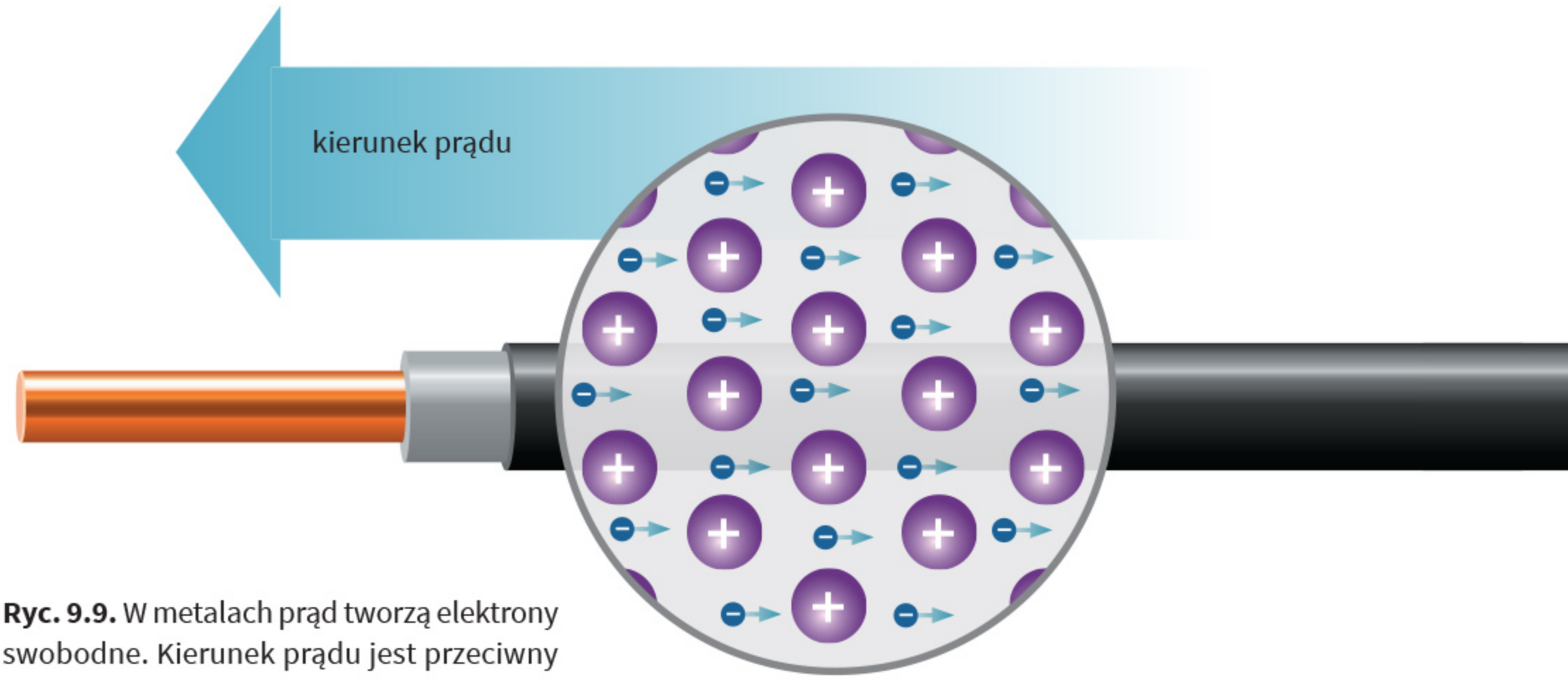
## Natężenie prądu

Gdy przyłożymy napięcie elektryczne do cieczy z jonami (np. do wody z kranu), prąd będą tworzyć zarówno jony dodatnie, jak i ujemne (ryc. 9.8). Jony dodatnie są unoszone zgodnie ze zwrotem linii pola elektrycznego. Taki jest – umowny – kierunek prądu. Jony ujemne również współtworzą ten prąd, chociaż płyną w przeciwną stronę.



**Ryc. 9.8.** Prąd w cieczach tworzą jony ujemne i dodatnie

W metalach prąd tworzą elektrony swobodne, czyli elektrony, które oderwały się od macierzystych atomów. Same atomy (a raczej pozbawione części elektronów jony dodatnie) nieustannie drgają, ale się nie przemieszczają (ryc. 9.9).




**Ryc. 9.9.** W metalach prąd tworzą elektrony swobodne. Kierunek prądu jest przeciwny do kierunku ruchu elektronów

Elektrony są bezustannie przyspieszane przez pole elektryczne, ale również oddziałują z dodatnimi jonami tworzącymi strukturę metalu i oddają im część uzyskanej energii kinetycznej. W efekcie elektrony są unoszone przez pole elektryczne z prędkością kilku milimetrów na sekundę. Nie oznacza to jednak, że po włączeniu zasilania trzeba długo czekać, by elektrony dopłynęły np. do żarówki. Przyłożone pole elektryczne rozchodzi się praktycznie natychmiast (z prędkością światła). Wobec tego w każdej części obwodu obecne tam elektrony swobodne od razu zaczynają płynąć.
Wielkością charakteryzującą prąd elektryczny jest jego natężenie.

**Natężenie prądu elektrycznego** $I$ to stosunek ładunku $q$ przepływającego przez dowolny przekrój poprzeczny przewodnika do czasu $t$ tego przepływu.

$$I = \frac{q}{t} \tag{1}$$

Jednostką natężenia prądu jest amper:

$$1\ \mathrm{A} = \frac{1\ \mathrm{C}}{1\ \mathrm{s}}$$

Prąd ma natężenie 1 A, jeśli w ciągu sekundy przez wybrany przekrój poprzeczny przewodnika przepływa ładunek 1 C.

**PRZYKŁAD 1.**

Przez świecącą lampkę płynie prąd o natężeniu $0{,}04\ \mathrm{A}$. Obliczmy, ile elektronów wpływa do lampki w ciągu 1 minuty.

Ładunek wpływający do lampki w ciągu danego czasu można obliczyć z przekształconego wzoru (1).

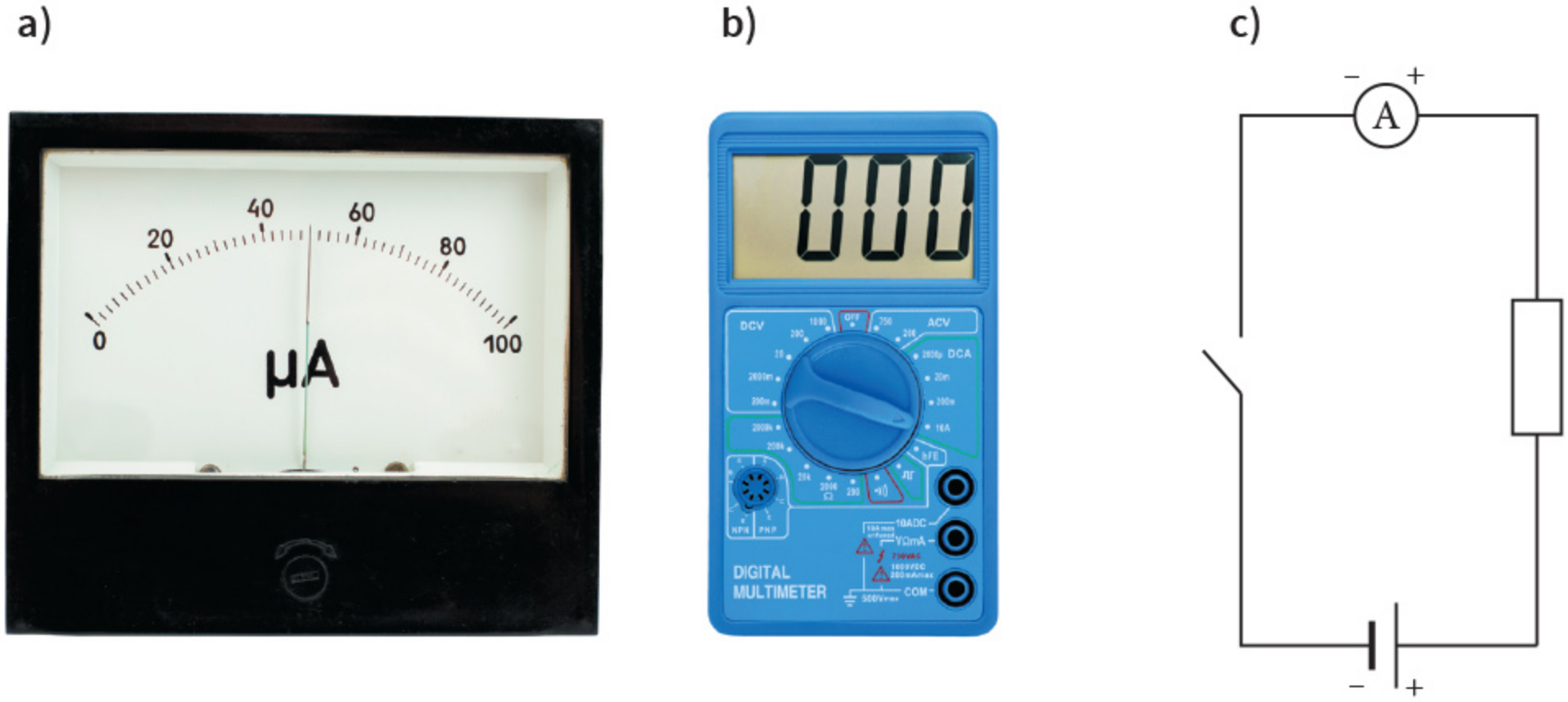
$$q = I \cdot t = 0{,}04\ \mathrm{A} \cdot 60\ \mathrm{s} = 2{,}4\ \mathrm{C}$$

Jeden elektron przenosi ładunek elementarny $e$, zatem liczba elektronów, które wpływają do lampki w czasie 1 minuty, wynosi:

$$n = \frac{q}{e} = \frac{2{,}4\ \mathrm{C}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}} = 1{,}5 \cdot 10^{19}$$

Do lampki wpływa $1{,}5 \cdot 10^{19}$ elektronów. Tyle samo elektronów musi z niej wypływać, gdyż w przeciwnym razie w bardzo krótkim czasie lampka zostałaby silnie naelektryzowana.

Natężenie prądu mierzymy za pomocą **amperomierza**.
Ładunek nie gromadzi się w żadnej części obwodu elektrycznego, a z zasady zachowania ładunku wynika, że w obwodzie ładunku ani nie przybywa, ani nie ubywa. Wobec tego **natężenie prądu jest takie samo w każdym miejscu obwodu bez rozgałęzień.** Jeśli chcemy zmierzyć natężenie prądu w takim właśnie obwodzie, możemy umieścić amperomierz w dowolnym miejscu obwodu (ryc. 9.10c).




**Ryc. 9.10. a)** Amperomierz analogowy, **b)** amperomierz cyfrowy, **c)** schemat włączenia amperomierza do obwodu

Natężenie prądu elektrycznego można porównać do natężenia przepływu wody, czyli do objętości wody przepływającej przez dowolny przekrój poprzeczny rury w ciągu sekundy. W naszym modelu wodnym (ryc. 9.4) przez każdy przekrój poprzeczny rury przepływa w ciągu sekundy tyle samo wody, bo jest ona nieściśliwa i nigdzie po drodze nie ginie.

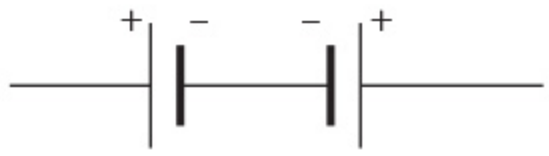
## PODSUMOWANIE

- **Prąd elektryczny** to uporządkowany przepływ cząstek naładowanych.
- **Źródło napięcia** to element obwodu, którego zadaniem jest wytworzenie pola elektrycznego wewnątrz obwodu.
- **Natężenie prądu elektrycznego** to stosunek ładunku elektrycznego przepływającego przez przekrój poprzeczny przewodnika do czasu jego przepływu:

$$I = \frac{q}{t}$$

## PYTANIA I ZADANIA

1. Czy przewodnik z prądem jest naelektryzowany? Jeśli tak, to dodatnio czy ujemnie?
2. Ile baterii AA (tzw. paluszków) o napięciu 1, 5 V trzeba połączyć, by zadziałał pilot wymagający napięcia 4,5 V? Narysuj schemat połączonych baterii.
3. Patryk postanowił zasilać zbudowany przez siebie obwód dwiema jednakowymi bateriami, połączonymi jak na rysunku. Czy w obwodzie popłynie prąd? Uzasadnij odpowiedź.




4. Natężenie prądu płynącego przez żarówkę wynosi 0,3 A. Jak długo trzeba czekać, żeby przepłynął przez nią ładunek 1 C?
5. Na ilustracji przedstawiono wskazania amperomierza (wyrażone w amperach) po podłączeniu do obwodu elektrycznego. Oszacuj liczbę elektronów przepływających w ciągu sekundy przez ten amperomierz.

# 10. Opór elektryczny

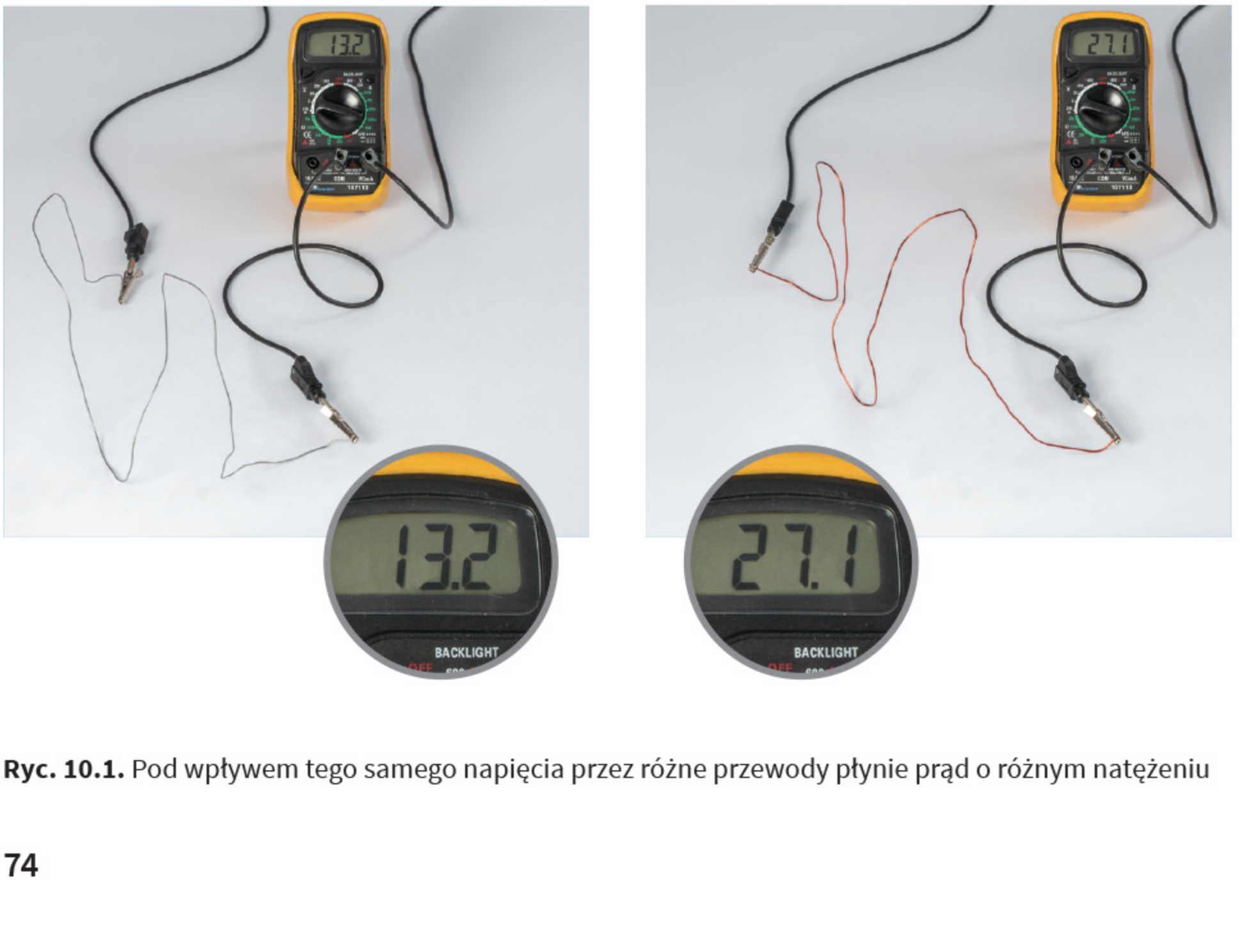
- Opór elektryczny
- Prawo Ohma
- Zależność oporu od temperatury

➔ **Przypomnij sobie**, co to jest napięcie elektryczne i natężenie prądu.

W niektórych materiałach ładunki elektryczne mogą płynąć prawie swobodnie, a w innych ich ruch jest mniej lub bardziej utrudniony przez oddziaływanie z atomami. Aby porównać ciała pod względem zdolności przewodzenia prądu, wprowadzamy pojęcie oporu elektrycznego.

## Opór elektryczny

Wielkością charakteryzującą związek między napięciem przyłożonym do przewodu a natężeniem prądu płynącego w tym przewodzie jest opór elektryczny. Opór elektryczny danego przewodu zależy od jego wymiarów i rodzaju materiału, z którego jest zbudowane. Gdy podłączymy do tego samego źródła napięcia przewody elektryczne o jednakowych rozmiarach, lecz wykonane z różnych substancji (ryc. 10.1), to płynący przez nie prąd będzie miał różne natężenie. Im większy jest opór przewodu, tym mniejsze będzie natężenie prądu.



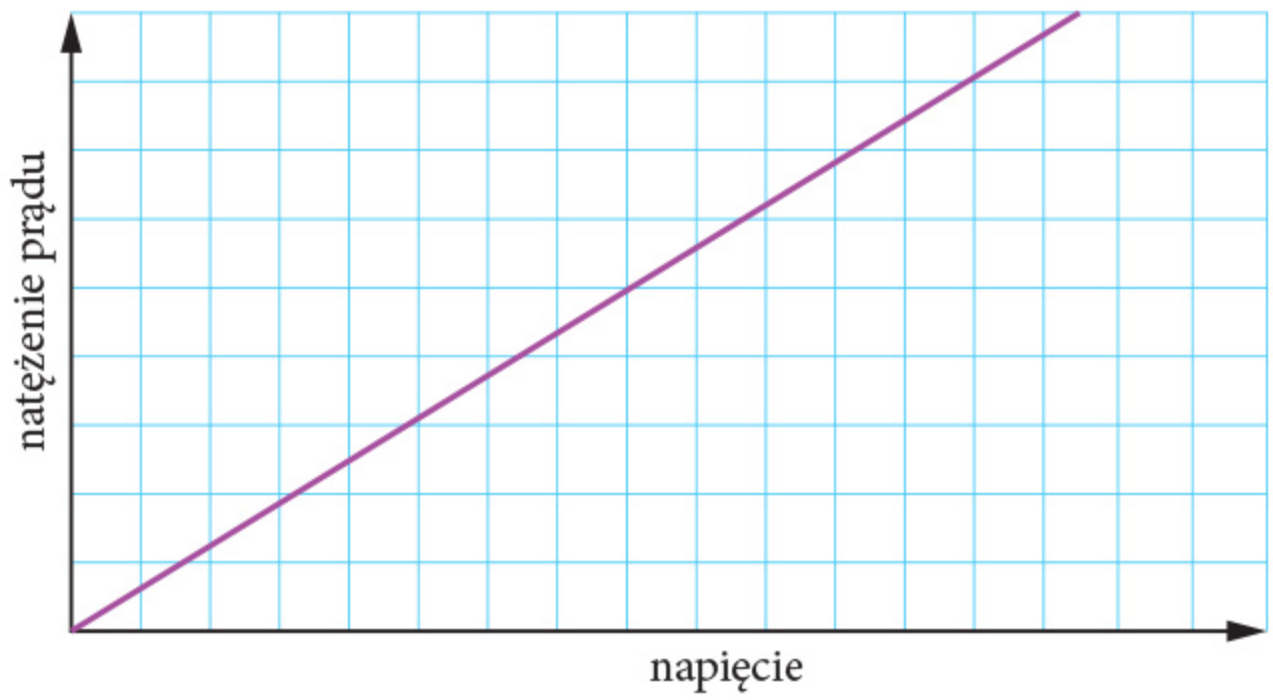

**Ryc. 10.1.** Pod wpływem tego samego napięcia przez różne przewody płynie prąd o różnym natężeniu

Przewody w obwodach elektrycznych wykonane są z metali. W metalach pod wpływem pola elektrycznego przemieszczają się elektrony swobodne. Elektrony podczas ruchu oddziałują z dodatnimi jonami, które w ciałach stałych tworzą gęstą strukturę. Oddziaływania te możemy potraktować jako przeszkody w ruchu elektronów wzdłuż linii pola elektrycznego wewnątrz przewodnika. Im dłuższy jest przewodnik, tym przeszkód w ruchu elektronów jest więcej, zatem opór przewodnika jest większy. Z kolei im większy jest przekrój poprzeczny przewodnika, tym więcej elektronów przez niego przepływa – czyli jego opór jest mniejszy. Podobnie jest z przepływem wody w rzekach: głęboka i szeroka rzeka niesie więcej wody niż płytka i wąska.

## Prawo Ohma

W pierwszej połowie XIX wieku niemiecki fizyk Georg Simon Ohm badał zależność natężenia prądu elektrycznego płynącego przez różne przewodniki od przyłożonego napięcia. Okazało się, że w przypadku, gdy prąd elektryczny nie powodował żadnych zmian w danym przewodniku (np. zmian temperatury), natężenie prądu było wprost proporcjonalne do napięcia (ryc. 10.2). Dziś to odkrycie nazywamy prawem Ohma.

**Prawo Ohma**
Natężenie prądu w przewodniku jest wprost proporcjonalne do napięcia przyłożonego między jego końcami.




**Ryc. 10.2.** Zależność natężenia prądu w obwodzie od napięcia zasilającego

Zależność przedstawioną na wykresie (ryc. 10.2) można zapisać za pomocą równania:

$$I = \frac{1}{R} \cdot U \qquad (1)$$

gdzie:
$I$ – natężenie prądu przepływającego przez opornik,
$U$ – napięcie między końcami opornika,
$R$ – opór elektryczny.

Opór elektryczny możemy zatem określić jako iloraz napięcia i natężenia prądu będącego skutkiem tego napięcia:

$$R = \frac{U}{I} \qquad (2)$$

Jednostką oporu elektrycznego jest om (Ω):

$$1\ \Omega = \frac{1\ \mathrm{V}}{1\ \mathrm{A}}$$

Ciało ma opór 1 Ω, gdy pod wpływem napięcia 1 V przepływa przez nie prąd o natężeniu 1 A.

Prawo Ohma nie jest uniwersalnym prawem przyrody. Obowiązuje ono tylko dla ciał z niektórych materiałów, np. z metali lub ich stopów. Takie elementy obwodu nazywamy **opornikami**. Nawet oporniki spełniają prawo Ohma tylko wówczas, gdy ich temperatura znacząco się nie zmienia.

## WARTO WIEDZIEĆ

**Budowa oporników**

Aby uzyskać opornik, wystarczy zwinąć długi drut wykonany z tzw. stopu oporowego (stop metali). Im większa będzie długość drutu, tym większy będzie opór opornika. Istnieją również oporniki ceramiczne. Oporniki te wykonuje się przez napylenie cienkiej warstwy metalu na ceramiczny walec. Na końcach walca przymocowuje się przewody łączące opornik z resztą obwodu, a całość pokrywa się lakierem ochronnym z odpowiednimi oznaczeniami.

opornik ceramiczny

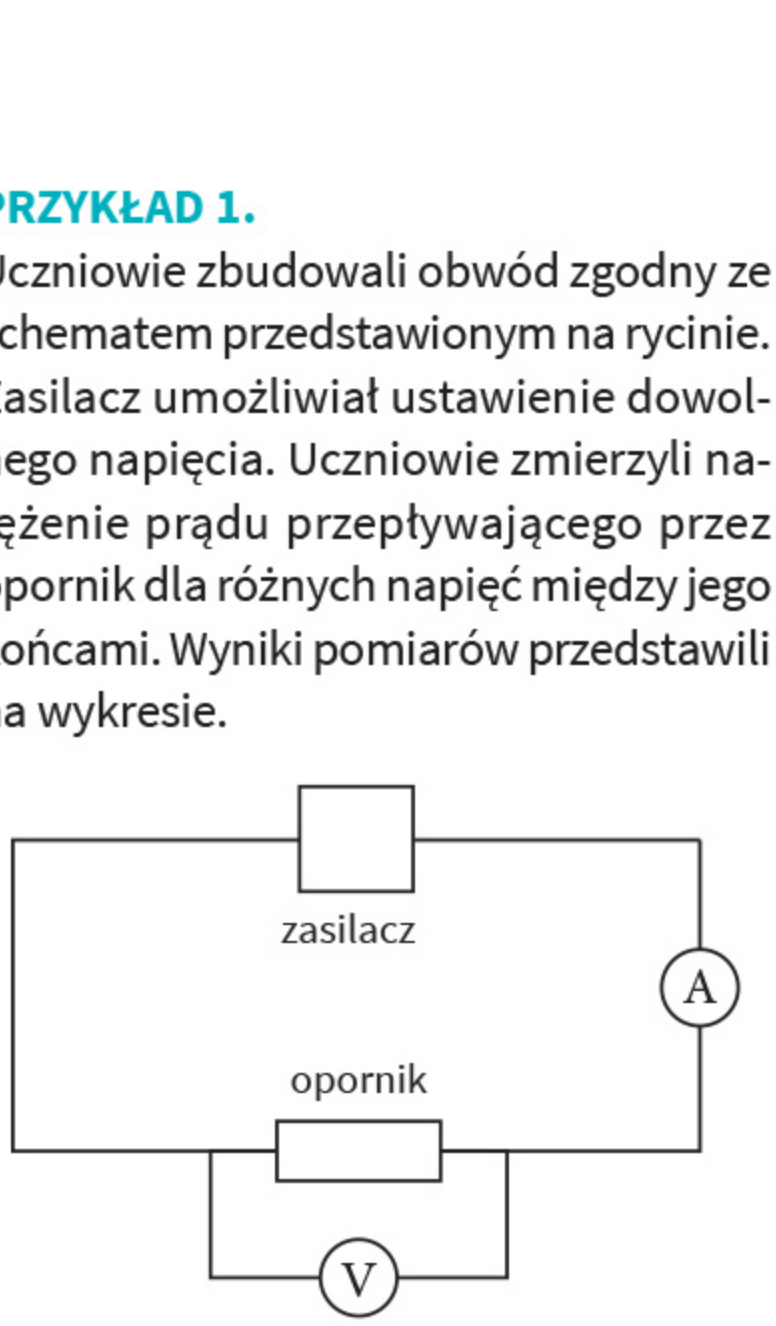
opornik wykonany z drutu nawiniętego na walec

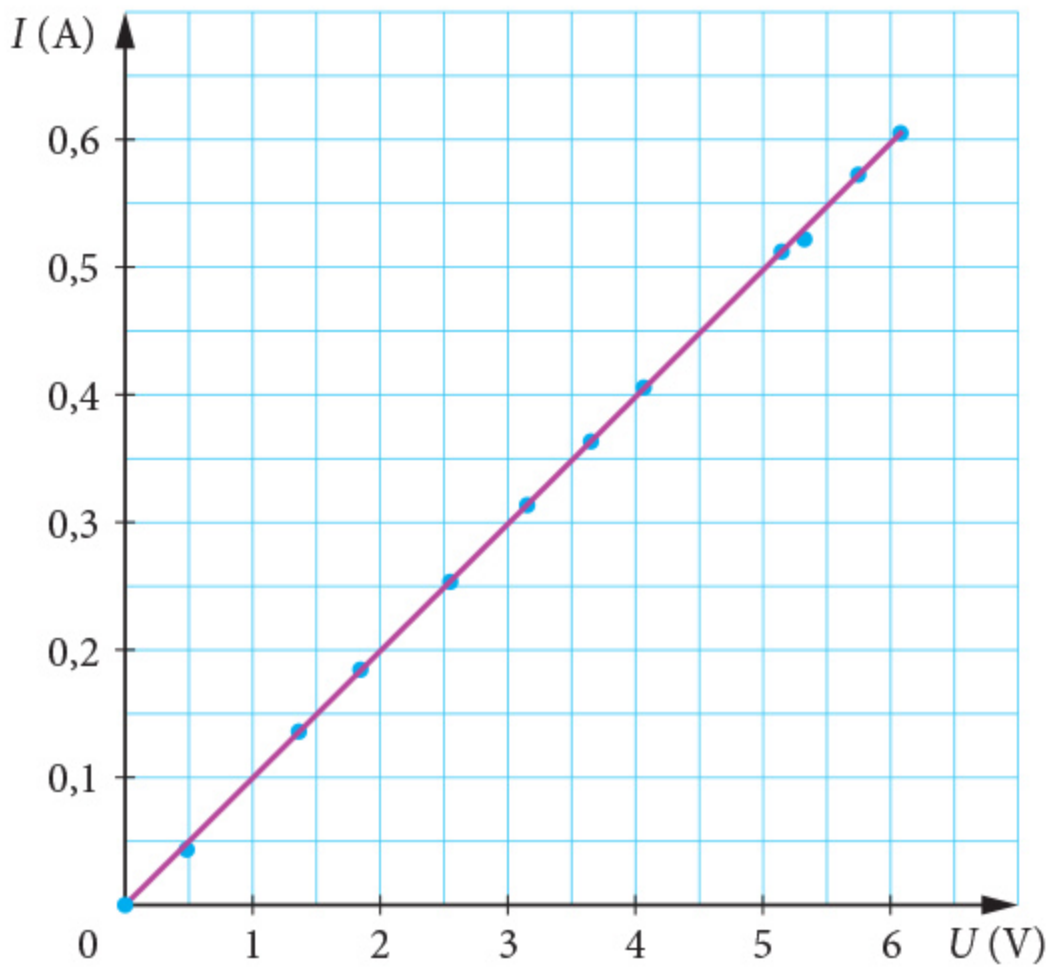
s. 352

Ze względu na zdolność przewodzenia prądu substancje można podzielić na: przewodniki, półprzewodniki oraz izolatory. Opór elektryczny półprzewodników (np. krzem, german) w temperaturze pokojowej jest miliony razy większy od oporu przewodników (np. miedź, aluminium) o tych samych wymiarach geometrycznych. Wynika to z budowy wewnętrznej półprzewodników – liczba elektronów swobodnych jest w nich znacznie mniejsza niż w metalach. Jeszcze większym oporem charakteryzują się izolatory, w których praktycznie nie ma swobodnych elektronów.

**PRZYKŁAD 1.**

Uczniowie zbudowali obwód zgodny ze schematem przedstawionym na rycinie. Zasilacz umożliwiał ustawienie dowolnego napięcia. Uczniowie zmierzyli natężenie prądu przepływającego przez opornik dla różnych napięć między jego końcami. Wyniki pomiarów przedstawili na wykresie.



Na podstawie wykresu wyznaczmy opór opornika użytego w doświadczeniu.

Z wykresu odczytujemy, że przy napięciu $U = 4{,}5\ \mathrm{V}$ przez opornik przepływał prąd o natężeniu $I \approx 0{,}45\ \mathrm{A}$. Podstawiamy te dane do wzoru (1):

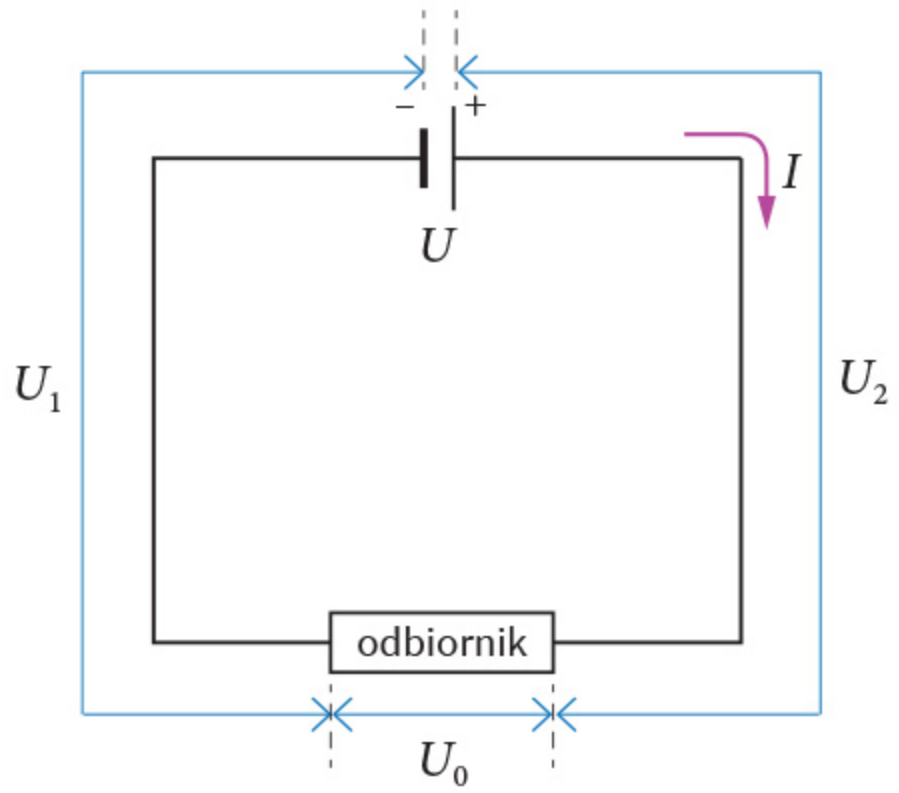
$$R = \frac{U}{I} \approx \frac{4{,}5\ \mathrm{V}}{0{,}45\ \mathrm{A}} = 10\ \Omega$$

Użyty opornik miał opór ok. 10 Ω.

## Napięcia w obwodzie prądu

Odbiornik jest połączony ze źródłem napięcia za pomocą przewodów. Zwykle przyjmujemy, że napięcie na odbiorniku jest równe napięciu źródła, ponieważ przewody mają bardzo mały opór w porównaniu z odbiornikiem.

Na rycinie 10.3 zaznaczono napięcia na końcach każdego elementu obwodu, również na końcach przewodów. Praca wykonana przez pole elektryczne podczas przemieszczania ładunku $q$ w całym obwodzie jest sumą prac wykonanych w każdej jego części:




**Ryc. 10.3.** Gdy napięcie na przewodach zasilających jest bardzo małe, to napięcie na odbiorniku jest równe napięciu źródła

$$Uq = U_1q + U_0q + U_2q$$

Po podzieleniu obu stron równania przez $q$ otrzymujemy:

$$U = U_1 + U_0 + U_2 \tag{3}$$

Napięcie na przewodach można zgodnie z prawem Ohma wyrazić wzorami:

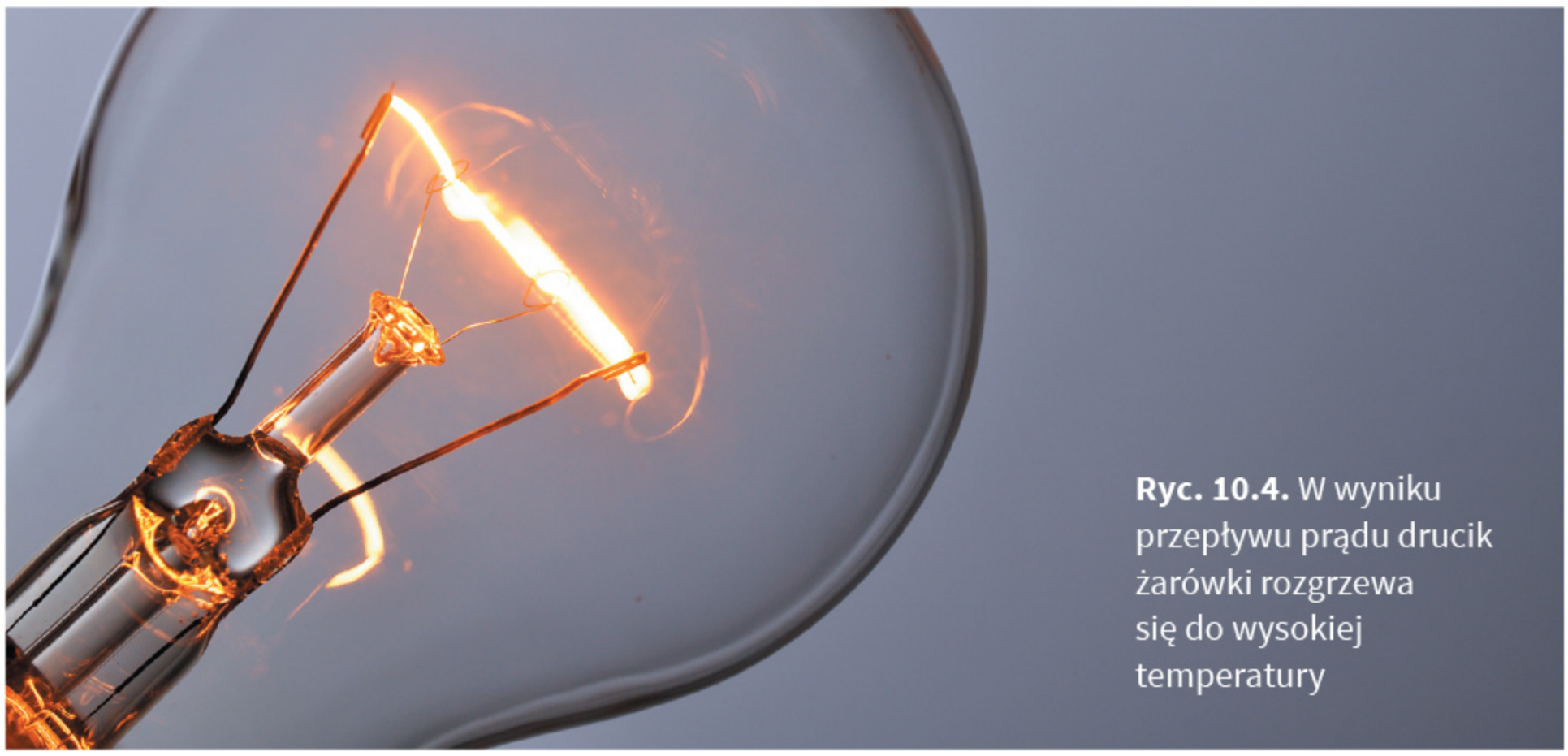
$$U_1 = R_1I \quad \text{oraz} \quad U_2 = R_2I$$

Opór przewodów jest bardzo mały, zatem napięcie na nich również jest bardzo małe. Wobec tego we wzorze (2) można je pominąć. Na przykład przez grzałkę czajnika elektrycznego pod wpływem napięcia 230 V płynie prąd o natężeniu 6 A, przewody łączące ten czajnik z gniazdkiem mają opór 0,03 Ω, a więc napięcie na przewodach wynosi zaledwie 0,18 V.

Pamiętajmy jednak, że opór przewodów zależy od ich długości. Gdy przewody łączące źródło napięcia z odbiornikiem są bardzo długie, to napięcie na tych przewodach jest już znaczące.

## Zależność oporu od temperatury

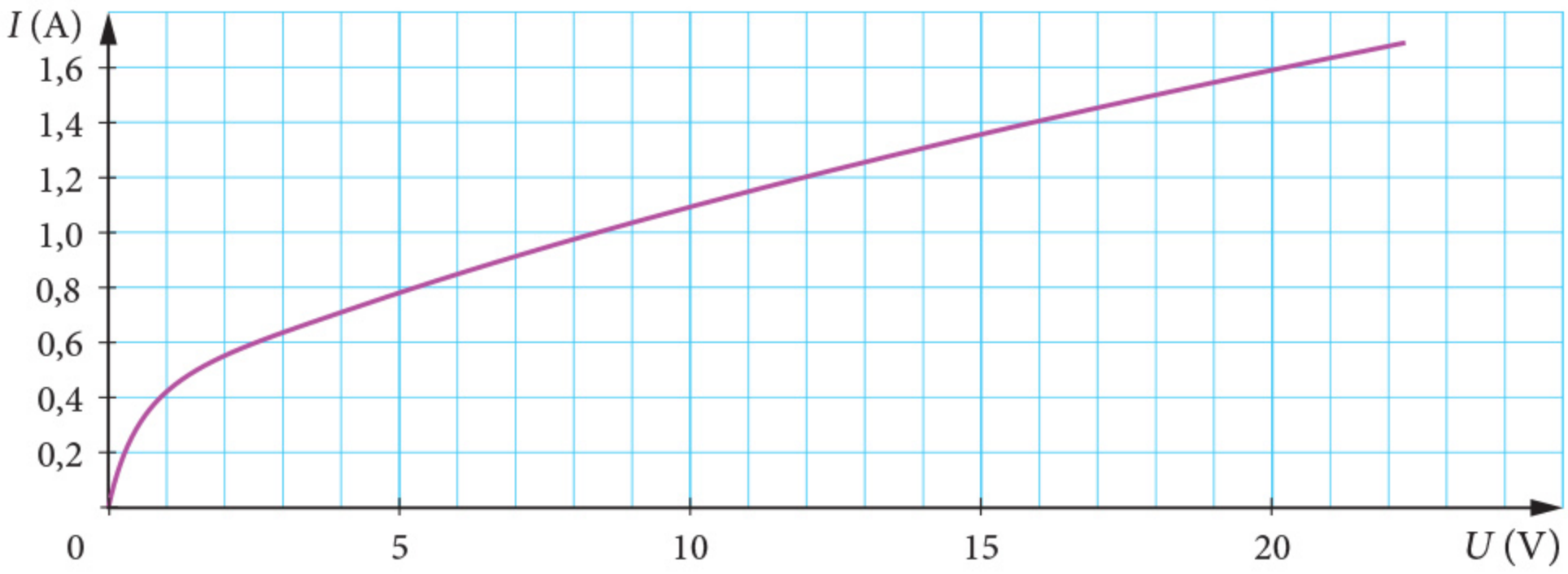
Jednym ze skutków przepływu prądu jest nagrzewanie się elementów przewodzących, a to może powodować zmianę ich oporu elektrycznego. Zmiany te są różne dla różnych materiałów. W przypadku oporników, wykonanych najczęściej z tzw. stopów oporowych, zmiana oporu jest niewielka, dlatego natężenie prądu jest wprost proporcjonalne do napięcia w szerokim zakresie napięć, do których są podłączane.



**Ryc. 10.4.** W wyniku przepływu prądu drucik żarówki rozgrzewa się do wysokiej temperatury

Gdyby w doświadczeniu opisanym w przykładzie 1. w miejsce opornika wstawić tradycyjną żarówkę z żarzącym się drucikiem wolframowym (ryc. 10.4), wykres zależności natężenia prądu od napięcia wyglądałby inaczej (ryc. 10.5).

W tym przypadku punkty pomiarowe nie układają się wzdłuż linii prostej. W miarę wzrostu napięcia drucik zaczyna się żarzyć i staje się coraz jaśniejszy. Istnieje bezpośredni związek między jasnością i barwą świecenia drucika a jego temperaturą. Im wyższa jest temperatura drucika, tym jaśniej on świeci. Z wykresu na rycinie 10.5 wynika, że zwiększaniu napięcia towarzyszą coraz mniejsze wzrosty natężenia prądu, zatem w tym przypadku prawo Ohma nie obowiązuje. Możemy jednak nadal stosować wzór (1). Wynika z niego, że opór drucika żarówki rośnie wraz z jego temperaturą.

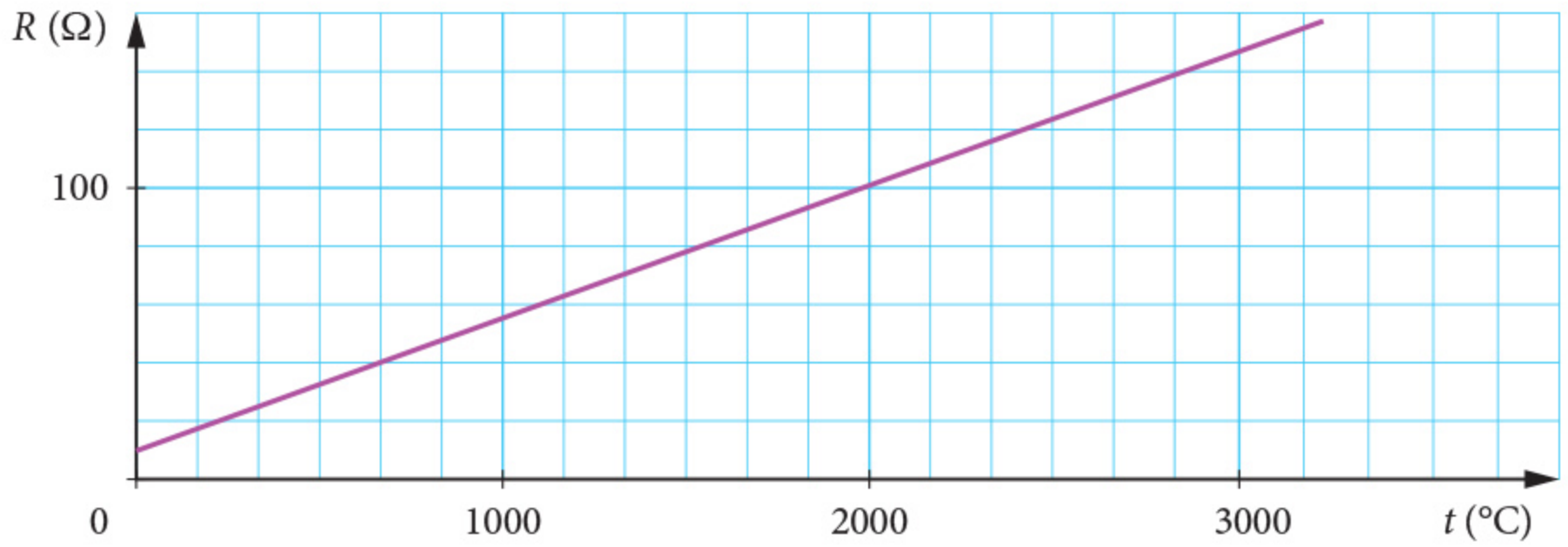



**Ryc. 10.5.** Zależność natężenia prądu płynącego przez drucik żarówki od napięcia

**Opór elektryczny metali rośnie wraz ze wzrostem temperatury**. W wyższej temperaturze drgania atomów (a w zasadzie jonów) są silniejsze, co utrudnia ruch elektronów swobodnych, czyli powoduje wzrost oporu elektrycznego.

F

F Rycina 10.6 przedstawia zależność oporu wolframowego drucika żarówki od temperatury. Z wykresu wynika, że w temperaturze 0 °C opór drucika wynosi około 10 Ω, a podczas świecenia, gdy jego temperatura sięga około 2500 °C, jest ponad 10 razy większy.




**Ryc. 10.6.** Zależność oporu drucika wolframowego żarówki od temperatury

## WARTO WIEDZIEĆ

**Nadprzewodniki**

Na początku XX wieku odkryto, że niektóre przewodniki – np. rtęć, ołów, cyna – po schłodzeniu do temperatury kilku kelwinów osiągają tzw. stan nadprzewodnictwa. Wzbudzony w nich prąd nie zanika nawet po odłączeniu źródła napięcia, gdyż ich opór jest równy zeru. W latach pięćdziesiątych XX wieku przeprowadzono eksperyment, w którym sprawdzano, co się stanie z natężeniem prądu elektrycznego w pętli wykonanej z nadprzewodnika. Eksperyment trwał ponad dwa lata. W tym czasie prąd o natężeniu kilkuset amperów pozostawał stały, czyli nie następowały straty energii elektrycznej. Eksperyment przerwano ze względu na wysokie koszty utrzymywania nadprzewodnika w bardzo niskiej temperaturze.

Ciągle trwają prace nad odkryciem materiału, który wykazywałby właściwości nadprzewodzące w temperaturze około 20 °C, czyli w warunkach, z którymi najczęściej mamy do czynienia. W marcu 2019 roku otrzymano materiał, który staje się nadprzewodnikiem w temperaturze 280 K (7 °C), jednak uzyskanie tego stanu wymaga skrajnie wysokich ciśnień. Droga do wykorzystania nadprzewodników w urządzeniach wokół nas jest jeszcze daleka.

F Opór elektryczny półprzewodników również zależy od temperatury, ale w inny sposób niż opór metali. W półprzewodnikach w temperaturach bliskich 0 K praktycznie nie ma swobodnych elektronów, gdyż wszystkie związane są z atomami, choć niektóre bardzo słabo. Wraz ze wzrostem temperatury niektóre elektrony uzyskują energię umożliwiającą oderwanie się od atomów. Liczba tych elektronów swobodnych jest zdecydowanie mniejsza niż w przewodnikach. Im wyższa jest temperatura półprzewodnika, tym więcej elektronów może oderwać się od atomów. Im więcej jest elektronów swobodnych, tym większe jest natężenie prądu pod wpływem tego samego napięcia. Oznacza to, że **wraz ze wzrostem temperatury opór półprzewodników maleje**.

## PODSUMOWANIE

- **Prawo Ohma:** natężenie prądu w przewodniku jest wprost proporcjonalne do przyłożonego do niego napięcia elektrycznego:

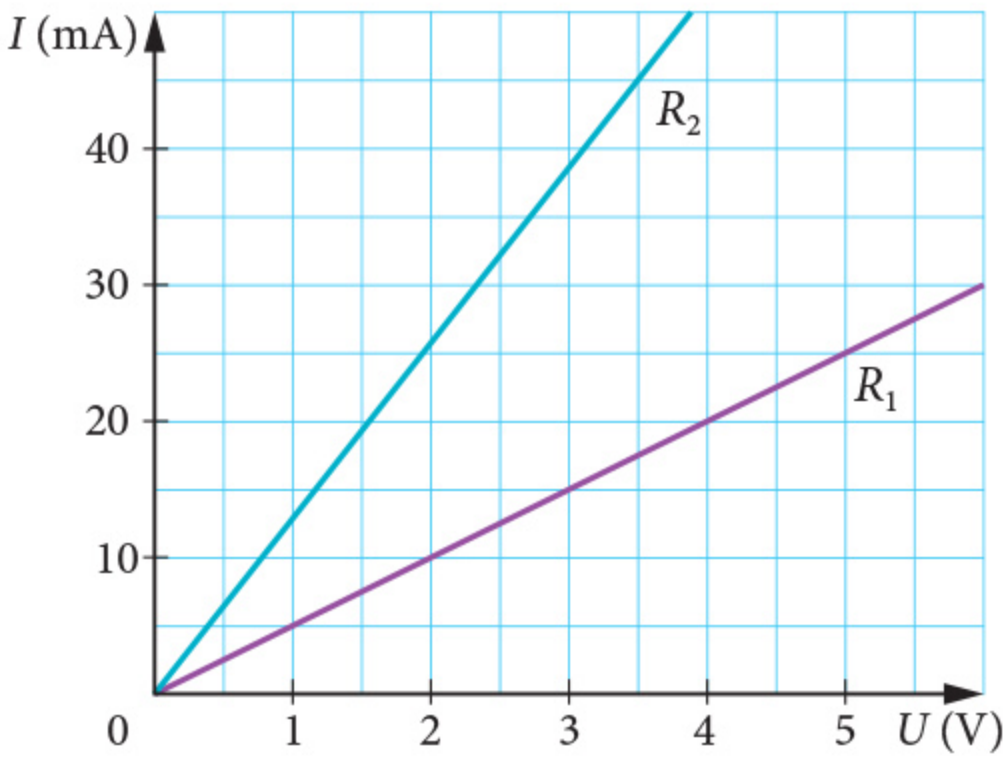
$$I = \frac{1}{R} \cdot U$$

- Im większy jest **opór elektryczny** ciała, tym mniejsze jest natężenie prądu płynącego przy danym napięciu elektrycznym.
- **Opór przewodników** rośnie wraz ze wzrostem ich temperatury.
- **Opór półprzewodników** maleje wraz ze wzrostem ich temperatury.

## PYTANIA I ZADANIA

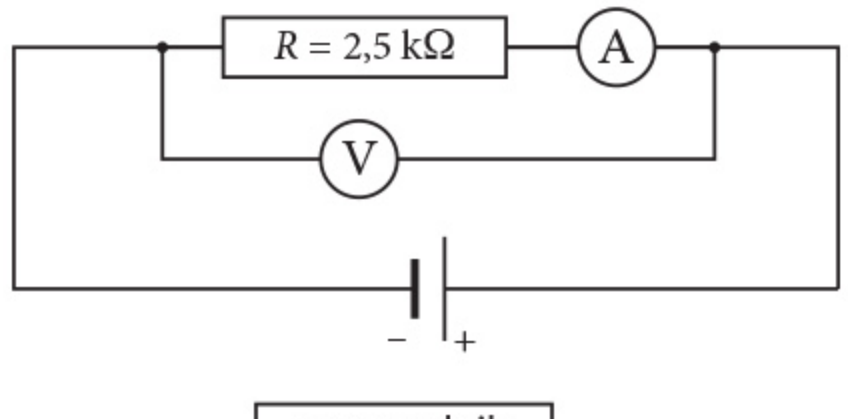
**1.** Do baterii, na której zaciskach jest napięcie 4,5 V, podłączono opornik o oporze 2 kΩ. Oblicz natężenie prądu przepływającego przez ten opornik.

**2.** Na wykresie przedstawiono zależność natężenia prądu płynącego przez dwa oporniki od przyłożonego do nich napięcia. Który z oporników ma większy opór i ile razy większy?

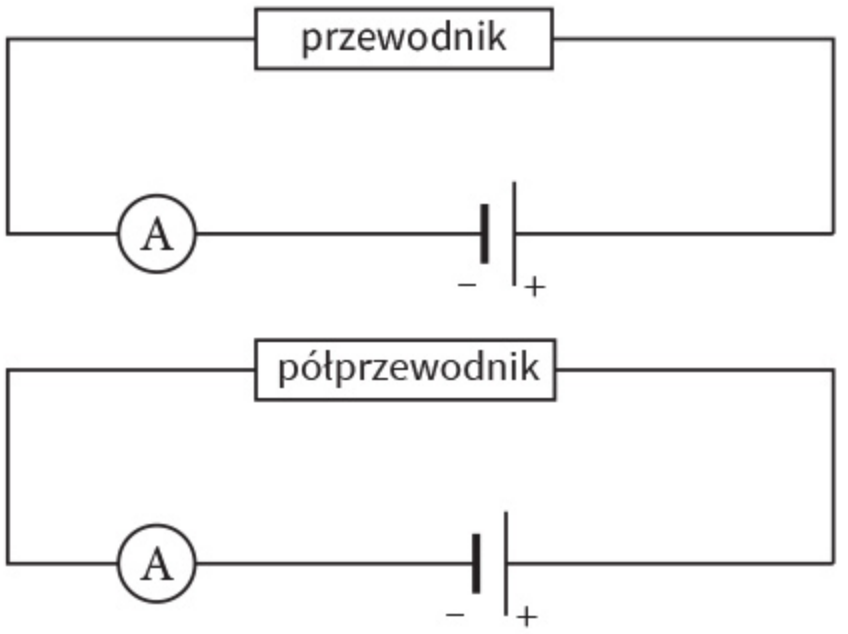



**3.** Przez pewien opornik pod wpływem napięcia 12 V płynie prąd o natężeniu 23 mA. Co się stanie z oporem tego opornika, gdy napięcie na jego końcach zmaleje do 6 V? Uzasadnij odpowiedź.

**4.** Amperomierz włączony do obwodu, który przedstawiono na schemacie obok, wskazywał natężenie prądu $I = 18$ mA. Oblicz napięcie, jakie wskazywał woltomierz.




**5.** Dwa elementy oporowe wykonano z różnych materiałów. Jeden z nich to przewodnik, a drugi to półprzewodnik. Oba elementy podłączono do takiego samego źródła napięcia, jak pokazano na schematach. Początkowo amperomierze wskazywały jednakowe natężenie prądu. Następnie oba przewody ogrzano o 200 °C. Który z amperomierzy będzie wskazywał większe natężenie? Uzasadnij odpowiedź.



# 11. Prąd jako nośnik energii elektrycznej

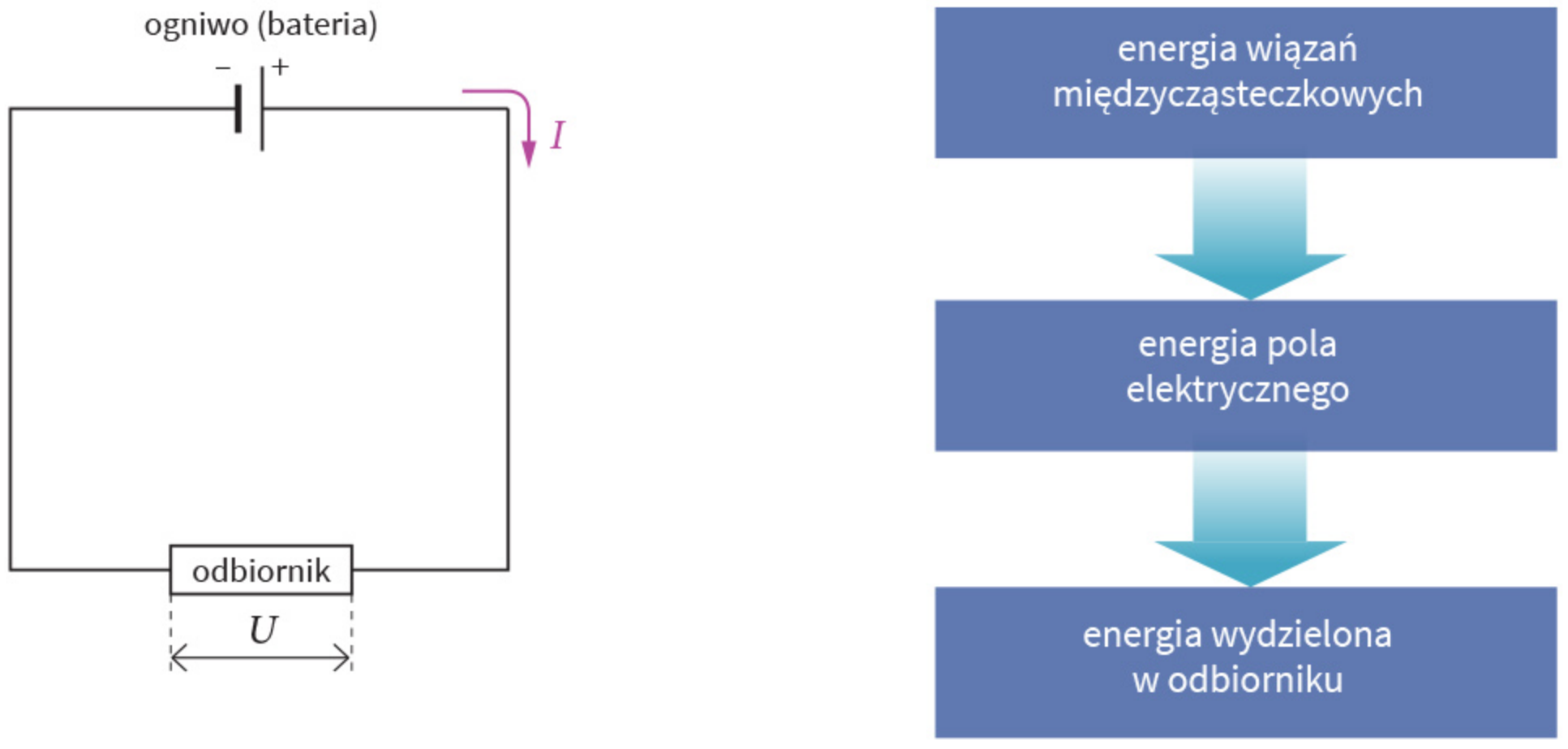
- Prąd jako nośnik energii elektrycznej
- Moc prądu elektrycznego

➔ **Przypomnij sobie**, jak oblicza się pracę wykonaną podczas przemieszczania ładunku w polu elektrycznym oraz jak definiuje się moc.

Jednym z fundamentalnych praw przyrody jest zasada zachowania energii. Omawialiśmy ją wielokrotnie przy okazji różnych zjawisk obserwowanych w życiu codziennym. Tym razem zastosujemy ją do opisu zjawisk zachodzących podczas przepływu prądu w obwodach elektrycznych.

## Prąd jako nośnik energii elektrycznej

Za pomocą prądu możemy przekształcać energię elektryczną w postać dla nas użyteczną (ryc. 11.1). Źródło napięcia wytwarza w obwodzie pole elektryczne, które swoją energię przekazuje ładunkom tworzącym prąd. Wobec tego prąd jest nośnikiem energii elektrycznej i dzięki niemu zostaje ona zamieniona w odbiornikach na inne formy energii. W grzałkach elektrycznych jest to ciepło, w silnikach elektrycznych – energia ruchu obrotowego, a podczas ładowania akumulatorów – energia wiązań chemicznych. Energię, która wydziela się w odbiorniku wskutek przepływu prądu, nazywa się pracą prądu elektrycznego.




**Ryc. 11.1.** Przemiany energii w obwodzie elektrycznym zasilanym ogniwem

Energia wydzielona w odbiorniku prądu jest równa pracy wykonanej przez pole elektryczne podczas przemieszczania ładunku (rozdział 5):

$$E = U \cdot q$$

Ładunek, który przepłynął przez odbiornik, to zgodnie z definicją natężenia prądu:

$$q = I \cdot t$$

Wobec tego energia wydzielona w odbiorniku prądu wynosi:

$$E = U \cdot I \cdot t \tag{1}$$

**PRZYKŁAD 1.**

Oszacujmy czas potrzebny do zagotowania 1,5 litra wody w czajniku elektrycznym podłączonym do napięcia 230 V. Przez grzałkę czajnika przepływa prąd o natężeniu 6,8 A. Temperatura początkowa wody jest równa 20 °C.

Zakładamy, że energia elektryczna zamienia się w ciepło, które w całości jest zużywane na ogrzanie wody, zatem:

$$E = Q$$

$$U \cdot I \cdot \tau = c_{\mathrm{w}} \cdot m \cdot \Delta t$$

Symbolem $\tau$ oznaczyliśmy czas pracy czajnika.

Ciepło właściwe wody jest równe $4200 \ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot {}^{\circ}\mathrm{C}}$, przyrost jej temperatury jest równy 80 °C.

Przekształcamy wzór, by obliczyć czas ogrzewania wody:

$$\tau = \frac{c_{\mathrm{w}} \cdot m \cdot \Delta t}{U \cdot I} = \frac{4200 \ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot {}^{\circ}\mathrm{C}} \cdot 1{,}5 \ \mathrm{kg} \cdot 80 \ {}^{\circ}\mathrm{C}}{230 \ \mathrm{V} \cdot 6{,}8 \ \mathrm{A}} \approx 322 \ \mathrm{s} = 5 \ \mathrm{min} \ 22 \ \mathrm{s}$$

Podczas ogrzewania woda oddaje energię do otoczenia. Z tego powodu należy się spodziewać, że w rzeczywistości czas zagotowania wody w opisanych warunkach będzie nieco dłuższy od obliczonego.

## Moc prądu

Moc to szybkość przekazywania energii. Prąd przenosi energię ze źródła napięcia do odbiornika, zatem moc prądu elektrycznego to szybkość przekazu energii elektrycznej. Z kolei moc urządzenia elektrycznego (odbiornika) podłączonego do źródła napięcia jest równa mocy prądu, który przez nie przepływa.

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

Gdy podstawimy do tego wzoru zależność (1), uzyskamy wzór na moc prądu:

$$P = U \cdot I \tag{2}$$

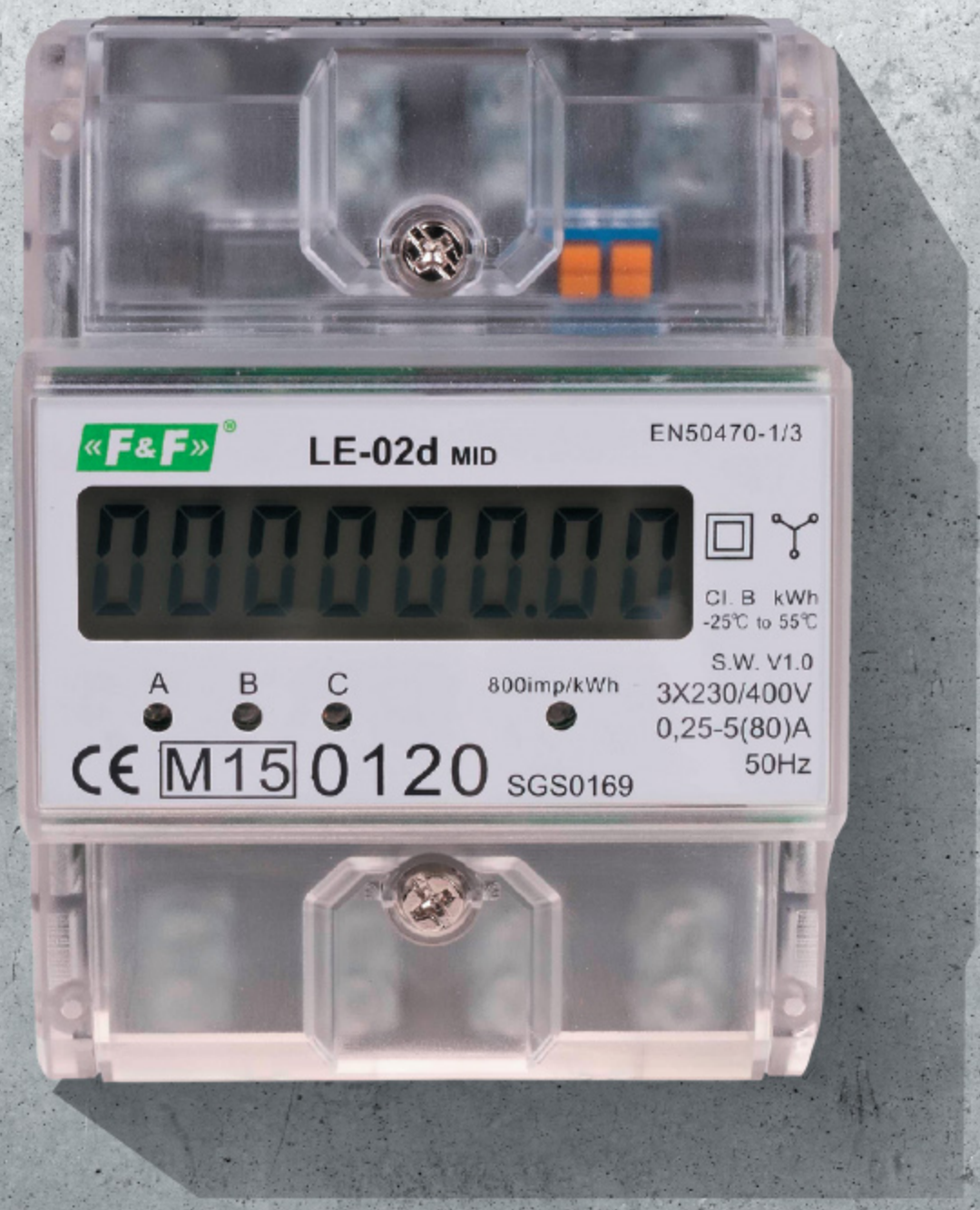
**Moc prądu elektrycznego** jest równa iloczynowi przyłożonego napięcia elektrycznego oraz natężenia prądu.

Podstawową jednostką mocy jest wat (W).
Ze wzoru (2) nie należy wyciągać wniosku, że moc prądu jest wprost proporcjonalna do przyłożonego napięcia. Natężenie prądu również zależy od napięcia, zatem zależność mocy od napięcia jest bardziej skomplikowana.

Liczniki energii elektrycznej pokazują energię przekazaną przez prąd, wyrażoną w kilowatogodzinach (ryc. 11.2). Jedna kilowatogodzina (1 kWh) to energia wydzielona w odbiorniku o mocy jednego kilowata (1 kW) w ciągu 1 godziny. Oznacza to, że:

$$1\ \text{kWh} = 1000\ \text{W} \cdot 3600\ \text{s} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J}$$

Jak widać, 1 kWh to prawie 4 mln J. Koszt takiej energii w Polsce w 2023 roku dla odbiorców indywidualnych wynosił ok. 1 zł 40 gr. Jedna kilowatogodzina to energia, która wystarczy np. do wniesienia plecaka o masie ok. 40 kg na Mount Everest lub do zagotowania ok. 10 litrów wody o temperaturze początkowej 20 °C.




**Ryc. 11.2.** Domowy licznik energii elektrycznej

**PRZYKŁAD 2.**

Piekarnik elektryczny ma moc 2500 W. Napięcie w domowej sieci elektrycznej jest równe 230 V. Obliczmy natężenie prądu przepływającego przez grzałkę piekarnika podczas ogrzewania.

Przekształcamy wzór (2) do postaci:

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

Po podstawieniu danych do wzoru otrzymujemy:

$$I = \frac{2500\ \text{W}}{230\ \text{V}} \approx 11\ \text{A}$$

Podczas pracy piekarnika elektrycznego przepływa przez niego prąd o natężeniu około 11 A.

## WARTO WIEDZIEĆ

**Ładowanie samochodu elektrycznego**

Tradycyjne samochody osobowe tankujemy do pełna nie dłużej niż 2–3 minuty, natomiast ładowanie samochodów elektrycznych z wykorzystaniem opcji szybkiego ładowania trwa ok. godziny. Z czego wynika tak długi czas ładowania tych samochodów i czy nie można go skrócić?

Akumulatory samochodów elektrycznych gromadzą ok. 60 kWh energii. Moc stacji szybkiego ładowania wynosi ok. 50 kW, więc w ciągu godziny akumulatory ładowane są do 80 % pojemności. Podczas ładowania akumulatory podłączone są do napięcia 480 V, zatem prąd płynący w obwodzie stacja ładowania–akumulator wynosi:

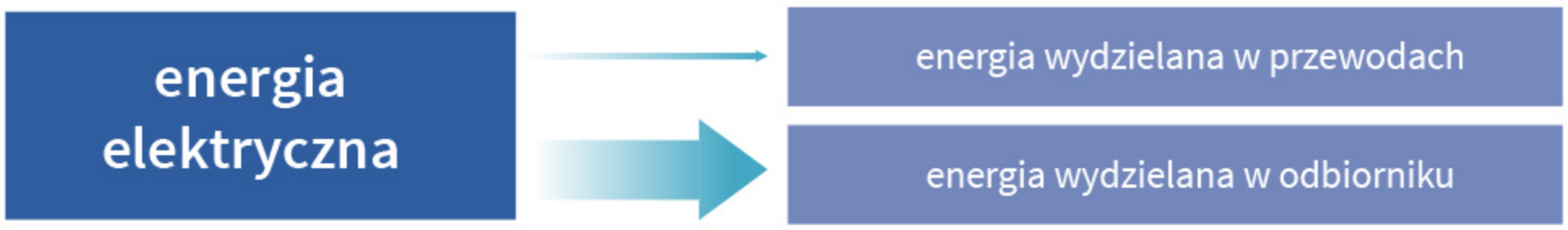
$$I = \frac{P}{U} = \frac{50\,000\ \text{W}}{480\ \text{V}} \approx 100\ \text{A}$$

Aby ograniczyć straty energii w przewodach, należy stosować przewody o małym oporze – i dlatego przewody łączące samochód z ładowarką mają prawie centymetr średnicy.

Czy można skrócić czas ładowania do kilku minut? Gdybyśmy chcieli naładować akumulator samochodu elektrycznego np. w 5 minut, to przy tym samym napięciu zasilającym natężenie prądu musiałoby wynosić aż 1200 A . Przewody łączące ładowarkę z samochodem dostosowane do takich prądów musiałyby mieć średnicę około 3 cm i ważyłyby kilkadziesiąt kilogramów!

## Straty energii elektrycznej

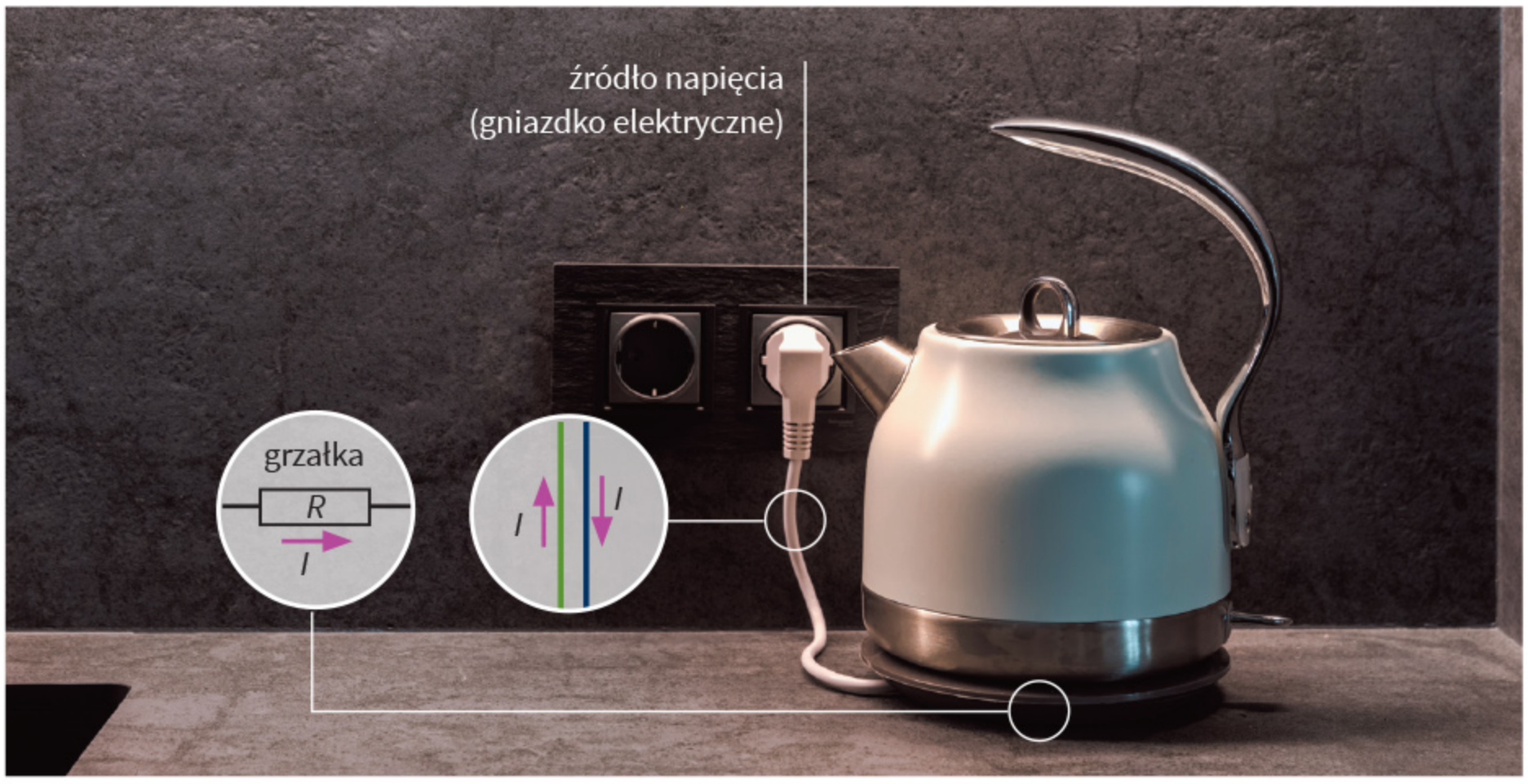
Podczas przesyłania energii za pomocą prądu elektrycznego część tej energii wydziela się w przewodach łączących odbiornik energii ze źródłem napięcia (ryc. 11.3). Energię wydzieloną w przewodach należy traktować jako straty energii. Straty są tym większe, im większe jest natężenie prądu płynącego przez przewód oraz im większy jest opór elektryczny przewodów.




**Ryc. 11.3.** Część energii elektrycznej wydziela się w odbiorniku energii, a część w przewodach zasilających

### PRZYKŁAD 3.

Przez czajnik podłączony do sieci przepływa prąd o natężeniu 5,2 A. Napięcie na przewodach zasilających jest równe 1 V, a napięcie na grzałce czajnika wynosi 229 V. Porównajmy moc wydzieloną na grzałce oraz na przewodach łączących czajnik ze źródłem napięcia.




Przez grzałkę czajnika oraz przewody zasilające płynie ten sam prąd. Moc prądu obliczamy ze wzoru:

$$P = U \cdot I$$

Jeśli znamy napięcie i natężenie prądu, możemy obliczyć moc wydzieloną na grzałce oraz moc wydzieloną na przewodach łączących:

$$P_g = U_g \cdot I = 229\ \text{V} \cdot 5{,}2\ \text{A} \approx 1191\ \text{W}$$

$$P_p = U_p \cdot I = 1\ \text{V} \cdot 5{,}2\ \text{A} \approx 5\ \text{W}$$

Moc wydzielona na grzałce jest około 240 razy większa od mocy wydzielonej na przewodach, zatem nic dziwnego, że gdy grzałka staje się bardzo gorąca, przewody pozostają zimne.

Moc prądu elektrycznego zależy od iloczynu napięcia i natężenia prądu. Im większa jest moc urządzenia podłączonego do danego napięcia (w przypadku domowej sieci elektrycznej to 230 V), tym większe jest natężenie prądu płynącego przez to urządzenie. Jeśli chcemy ograniczać opór przewodów, to musimy zwiększać ich średnice. Urządzenia elektryczne o dużej mocy są podłączane za pomocą przewodów o większych średnicach niż urządzenia o niewielkiej mocy.

## PODSUMOWANIE

- Energia przekazana w czasie *t* przez prąd elektryczny o natężeniu *I* płynący pod wpływem napięcia *U* wyraża się wzorem:

$$E = U \cdot I \cdot t$$

- **Moc prądu elektrycznego** jest równa iloczynowi napięcia elektrycznego *U* oraz natężenia prądu *I*:

$$P = U \cdot I$$

## PYTANIA I ZADANIA

1. W USA napięcie w domowej sieci elektrycznej jest dwa razy mniejsze niż w Europie. Czy natężenie prądu płynącego przez czajnik o mocy 800 W podłączony do gniazdka w Nowym Jorku jest takie samo jak natężenie prądu płynącego przez czajnik o tej samej mocy (ale dostosowanego do napięcia w Polsce) podłączony w Krakowie? Uzasadnij odpowiedź.
2. Opisz przemiany energii prowadzące do naładowania akumulatora zasilającego ogrodową lampę solarną (fot.).

3. Oszacuj moc czajnika elektrycznego, w którym w czasie 5 minut można zagotować 0,8 litra wody. Przyjmij, że podgrzewanie wody rozpoczyna się od temperatury pokojowej. Ciepło właściwe wody jest równe $4200\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot {}^{\circ}\mathrm{C}}$.
4. Czajnik elektryczny przystosowany do napięcia 230 V ma moc 1800 W. Oblicz natężenie prądu płynącego przez czajnik podczas pracy.
5. Monika używa komputera, którego średnia moc jest równa 60 W. Dzienny czas pracy tego komputera to około 8 godzin. Oszacuj miesięczny koszt energii elektrycznej pobieranej przez ten komputer przy założeniu, że koszt 1 kWh energii wynosi 1,40 zł, a miesiąc ten ma 30 dni.

# 12. Obwody elektryczne rozgałęzione

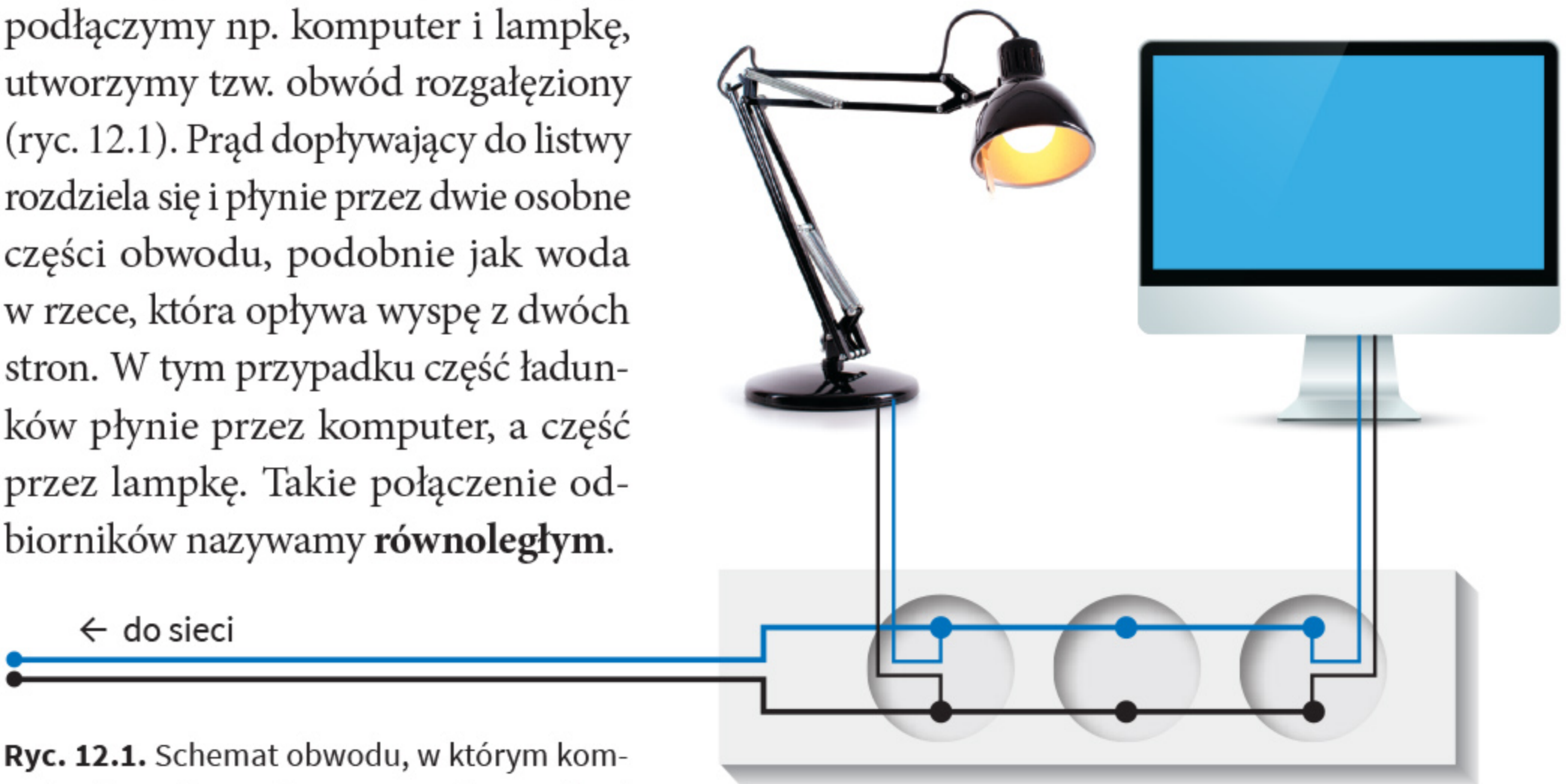
- I prawo Kirchhoffa
- Połączenie równoległe odbiorników

➔ **Przypomnij sobie** zasadę zachowania ładunku oraz definicję natężenia prądu.

Podstawowymi elementami obwodu elektrycznego są źródło napięcia i odbiornik prądu. Do jednego źródła możemy jednak podłączyć wiele odbiorników. Tak postępujemy choćby wówczas, gdy do jednego gniazda elektrycznego podłączamy listwę zasilającą, a do niej kilka urządzeń. Z kolei w instalacji elektrycznej samochodu jeden akumulator zasila wszystkie urządzenia elektryczne. To przykłady bardziej złożonych obwodów elektrycznych.

## Obwody rozgałęzione

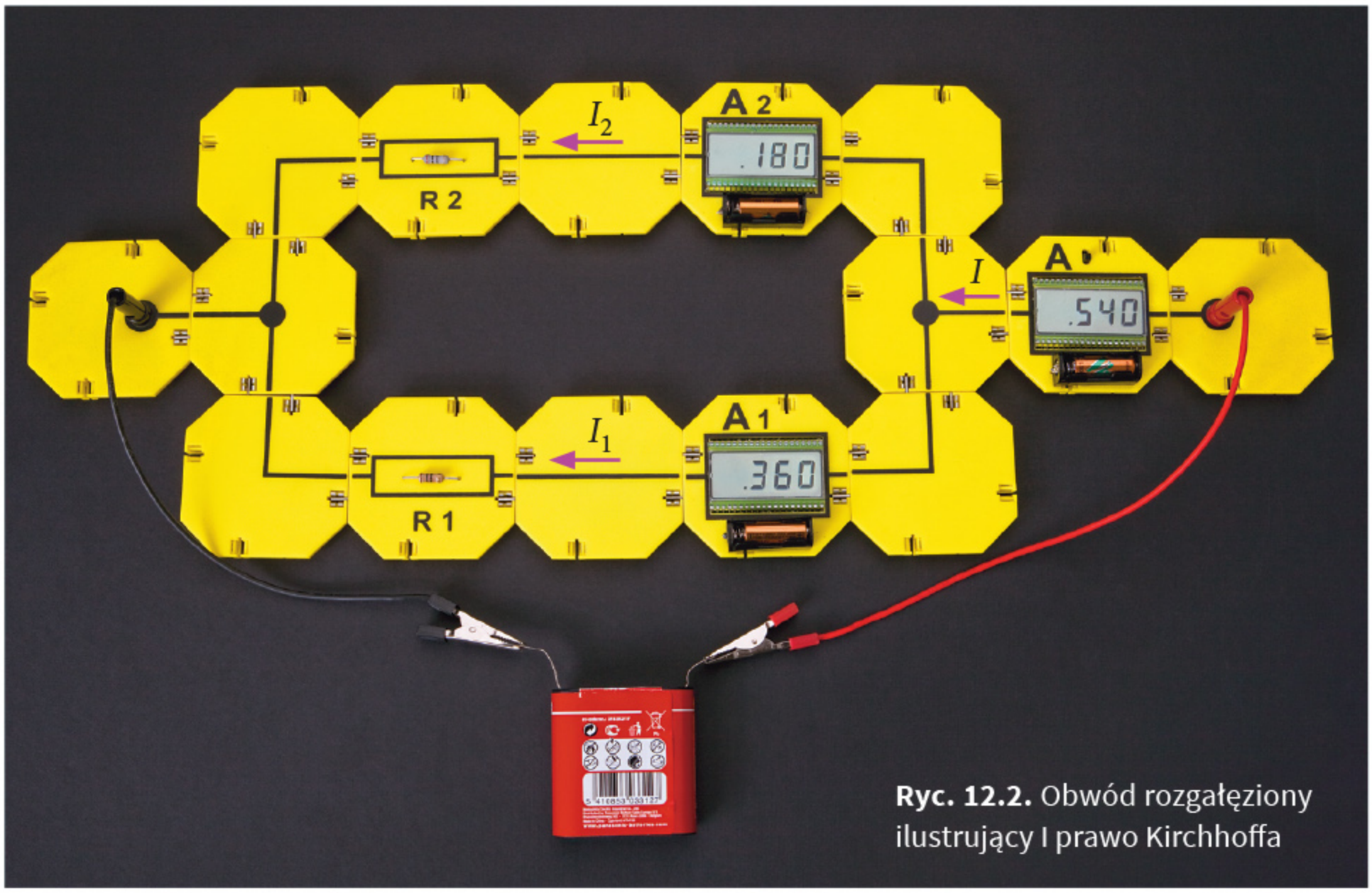
Gdy do gniazdek listwy zasilającej podłączymy np. komputer i lampkę, utworzymy tzw. obwód rozgałęziony (ryc. 12.1). Prąd dopływający do listwy rozdziela się i płynie przez dwie osobne części obwodu, podobnie jak woda w rzece, która opływa wyspę z dwóch stron. W tym przypadku część ładunków płynie przez komputer, a część przez lampkę. Takie połączenie odbiorników nazywamy **równoległym**.




**Ryc. 12.1.** Schemat obwodu, w którym komputer i lampka podłączone są do wspólnej listwy zasilającej

## I prawo Kirchhoffa

Na rycinie 12.2 przedstawiono zdjęcie obwodu, w którym amperomierze wskazują natężenie prądu płynącego w poszczególnych gałęziach obwodu. Miejsce, w którym prąd dzieli się lub łączy, nazywamy **węzłem.** W przedstawionym obwodzie są zatem dwa węzły.




**Ryc. 12.2.** Obwód rozgałęziony ilustrujący I prawo Kirchhoffa

Na zdjęciu widzimy, że wskazania amperomierza A są sumą wskazań amperomierzy $A_1$ oraz $A_2$. Wynik ten jest zgodny z zasadą zachowania ładunku elektrycznego, gdyż suma ładunków dopływających do węzła obwodu jest równa sumie ładunków wypływających z niego w tym samym czasie (scenariusz doświadczenia 3, s. 340).

s. 340

Z zasady zachowania ładunku dla rozgałęzień obwodów wynika I prawo Kirchhoffa.

**I prawo Kirchhoffa**
Suma natężeń prądów wpływających do węzła obwodu jest równa sumie natężeń prądów z niego wypływających.

Dla obwodu z ryciny 12.2 zapiszemy:

$$I = I_1 + I_2$$

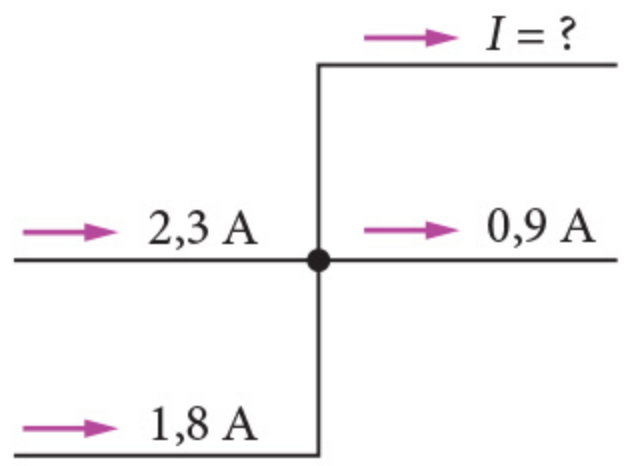
Rozgałęzienie obwodu elektrycznego można przyrównać do sytuacji, w której woda płynąca początkowo w jednej rurze rozdziela się i wpływa do dwóch rur (ryc. 12.3). Wówczas tyle wody wypływa z rozgałęzienia rur, ile do niego wpływa.




**Ryc. 12.3.** Wodociągowa analogia rozgałęzienia obwodu

**PRZYKŁAD 1.**

Do węzła obwodu, w którym łączą się cztery przewody, dopływają prądy o natężeniach $2{,}3\ \mathrm{A}$ i $1{,}8\ \mathrm{A}$, a wypływa prąd o natężeniu $0{,}9\ \mathrm{A}$ oraz prąd o nieznanym natężeniu. Obliczmy to natężenie.



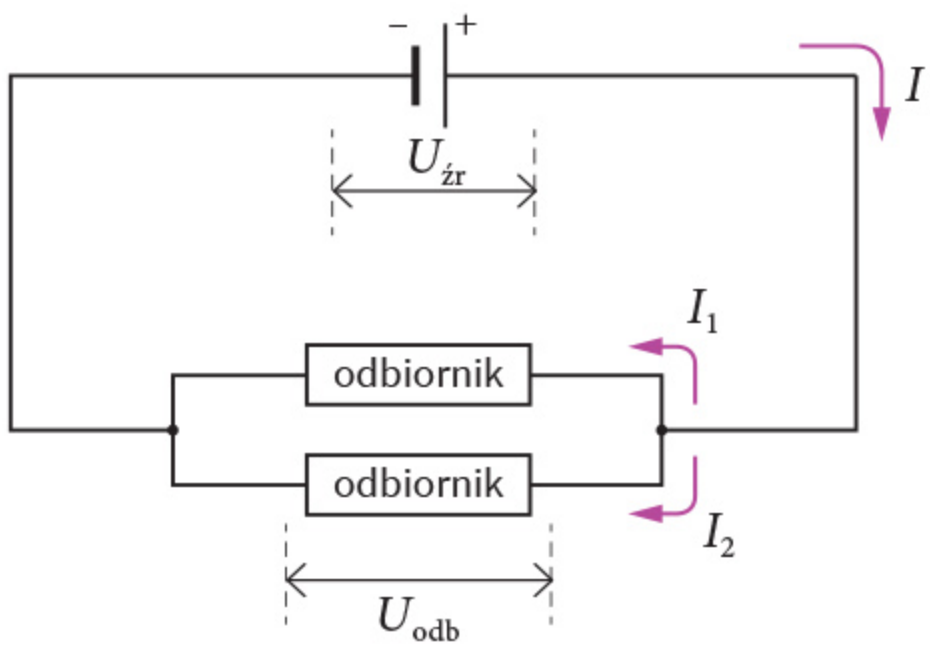

Korzystamy z I prawa Kirchhoffa. W tym przypadku:

$$2{,}3\ \mathrm{A} + 1{,}8\ \mathrm{A} = 0{,}9\ \mathrm{A} + I$$

Wobec tego szukane natężenie prądu jest równe $I = 3{,}2\ \mathrm{A}$.

## Napięcie i moc w połączeniu równoległym odbiorników

Na rycinie 12.4 przedstawiono obwód, w którym dwa odbiorniki są podłączone równolegle do jednego źródła napięcia.




**Ryc. 12.4.** Dwa odbiorniki podłączone równolegle do jednego źródła napięcia

Napięcie na obu odbiornikach jest takie samo i równe napięciu źródła (pomijamy napięcie na przewodach łączących). W związku z tym przez każdy z odbiorników płynie prąd o natężeniu takim, jak gdyby odbiornik był samodzielnie podłączony do źródła. To cecha łączenia równoległego. Dzięki temu każdy odbiornik działa, niezależnie od tego, ile jeszcze różnych urządzeń połączonych jest równolegle. Wyłączenie jednego z nich nie ma wpływu na pracę pozostałych.

Natężenie prądu $I$ w przewodzie łączącym odbiorniki ze źródłem napięcia jest sumą natężeń prądów w obu odbiornikach (I prawo Kirchhoffa):

$$I = I_1 + I_2$$

Gdy pomnożymy to równanie stronami przez $U$ (napięcie jest takie samo na każdym odbiorniku), uzyskamy:

$$U \cdot I = U \cdot I_1 + U \cdot I_2$$

Ponieważ iloczyn napięcia i natężenia to moc prądu, można zapisać, że:

$$P = P_1 + P_2$$

Oznacza to, że moc czerpana ze źródła napięcia jest równa sumie mocy odbieranych przez poszczególne odbiorniki. Ten sam wniosek można też wyciągnąć bezpośrednio z zasady zachowania energii.

**PRZYKŁAD 2.**

Latarka wyposażona w trzy jednakowe diody LED ma dwa tryby pracy: można włączyć jedną diodę albo wszystkie diody równocześnie (są one połączone równolegle). Diody mają moc 0,4 W każda, a napięcie baterii latarki wynosi 3 V. Obliczmy natężenie prądu płynącego w obwodzie w jednym i drugim trybie pracy.

Diody w latarce można włączać niezależnie, gdyż są połączone równolegle. Napięcie na każdej z nich wynosi zatem 3 V. Moc jednej diody to:

$$P_1 = UI_1$$

stąd natężenie prądu przepływającego przez jedną diodę wynosi:

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{0{,}4\ \text{W}}{3\ \text{V}} \approx 0{,}13\ \text{A}$$

Gdy świecą trzy diody równocześnie, natężenie prądu płynącego w obwodzie jest trzykrotnie większe:

$$I_3 = 3 \cdot I_1 \approx 3 \cdot 0{,}13\ \text{A} \approx 0{,}4\ \text{A}$$

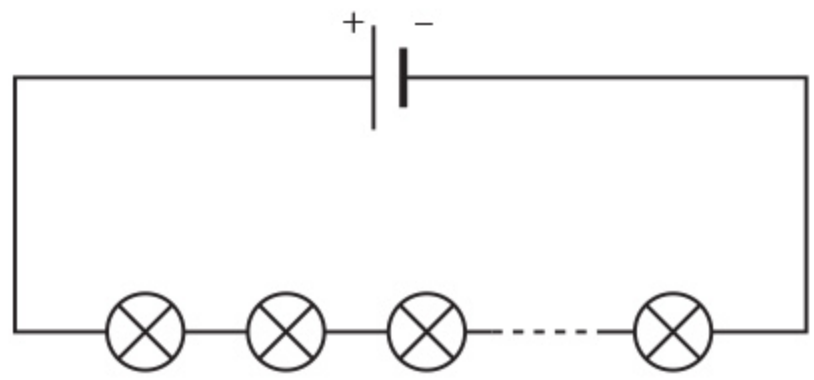
Ten sam wynik otrzymamy, gdy podzielimy sumę mocy trzech diod przez napięcie:

$$I_3 = \frac{P_3}{U} = \frac{1{,}2\ \text{W}}{3\ \text{V}} = 0{,}4\ \text{A}$$

## WARTO WIEDZIEĆ

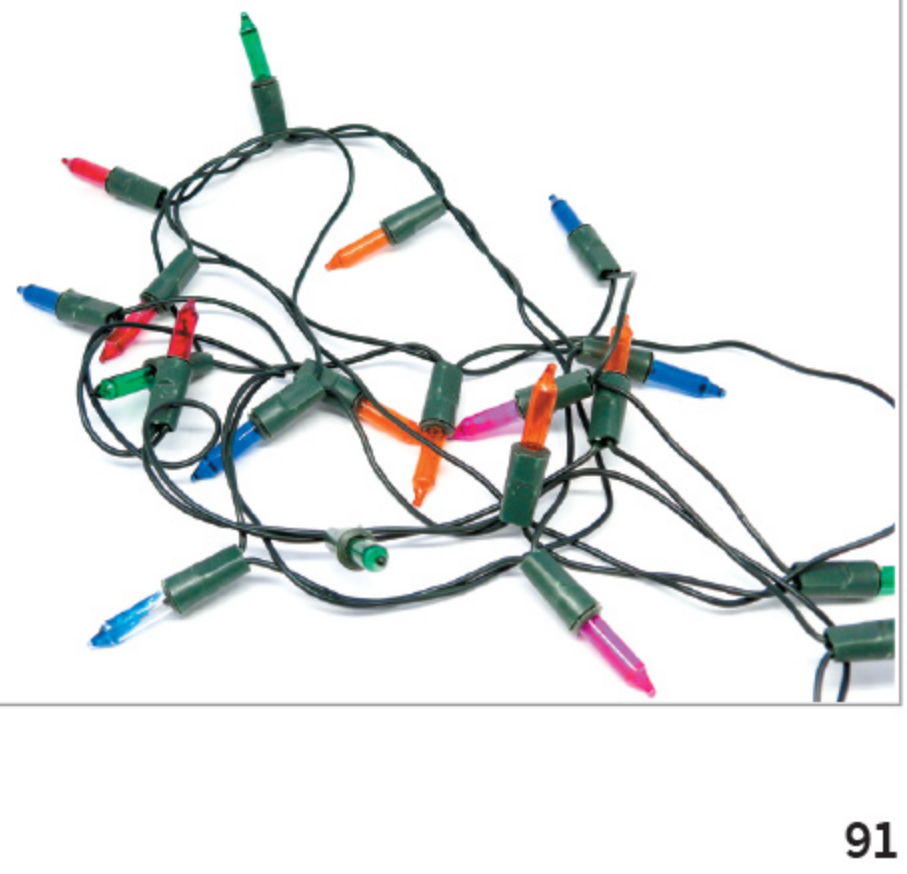
**Połączenie szeregowe**

Odbiorniki energii elektrycznej można łączyć w inny sposób niż tylko równolegle. Przykładem są niektóre rodzaje lampek choinkowych, gdzie poszczególne żarówki połączone są jedna za drugą, więc w obwodzie nie ma rozgałęzień (ryc.). Takie połączenie nazywamy szeregowym.




Schemat układu szeregowego połączenia lampek choinkowych

Każda z żarówek takiego kompletu jest przeznaczona do pracy pod napięciem kilku woltów, natomiast cały zestaw jest podłączony do napięcia 230 V. W połączeniu szeregowym napięcie zasilania dzieli się po równo na poszczególne żarówki, jeżeli są one jednakowe. Jeśli żarówek jest np. 230, to napięcie na każdej z nich jest równe 1 V.

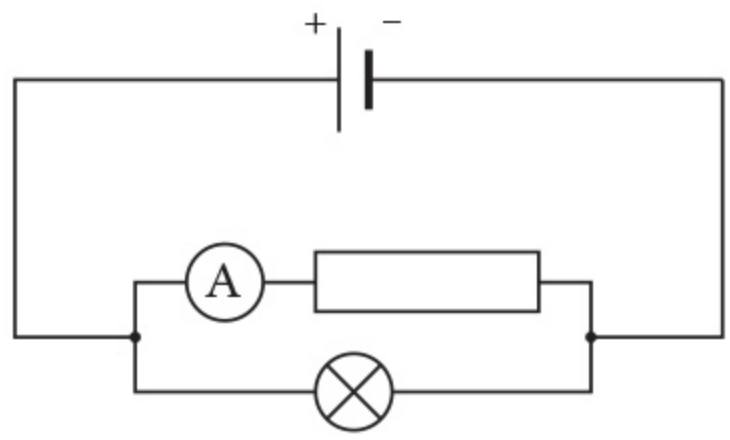


## PODSUMOWANIE

- **I prawo Kirchhoffa:** suma natężeń prądów wpływających do węzła obwodu jest równa sumie natężeń prądów z niego wypływających.
- Napięcie elektryczne na wszystkich odbiornikach połączonych równolegle jest takie samo.
- Moc czerpana ze źródła napięcia jest równa sumie mocy odbieranych przez poszczególne odbiorniki.

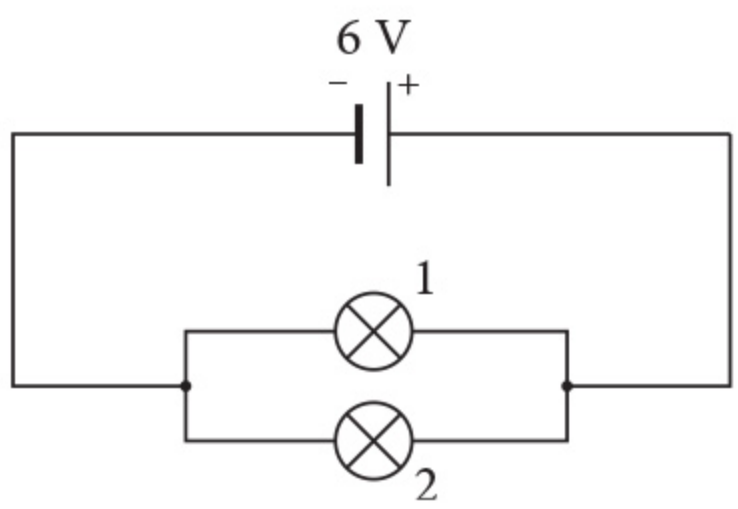
## PYTANIA I ZADANIA

**1.** Czy amperomierz włączony do obwodu tak jak na schemacie obok pokaże natężenie prądu wypływającego ze źródła napięcia? Uzasadnij odpowiedź.

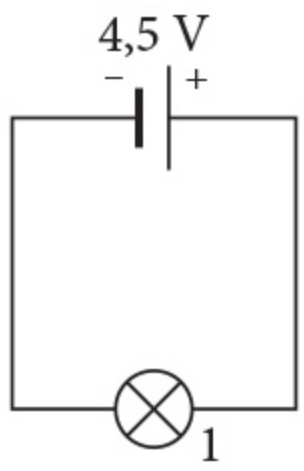


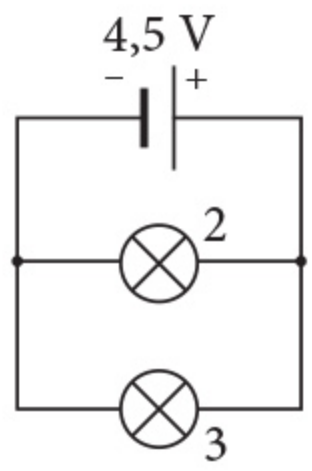

**2.** Natężenie prądu dopływającego do układu trzech identycznych oporników połączonych równolegle jest równe 1,28 A. Jakie będzie natężenie prądu płynącego przez każdy z nich?

**3.** Dwie żarówki podłączono równolegle do baterii 6 V. Żarówka 1 ma moc 1,25 W, a żarówka 2 ma moc 2,5 W. Przez którą z tych żarówek będzie płynął prąd o większym natężeniu? Uzasadnij odpowiedź przez wykonanie odpowiednich obliczeń.

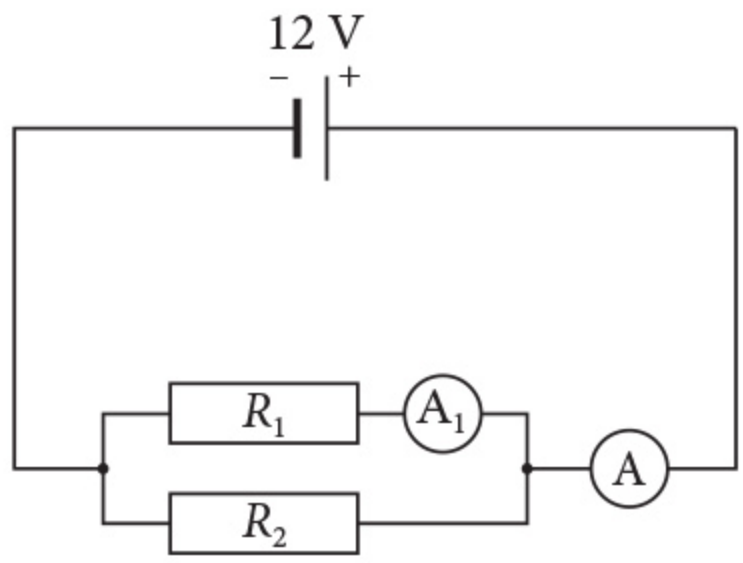


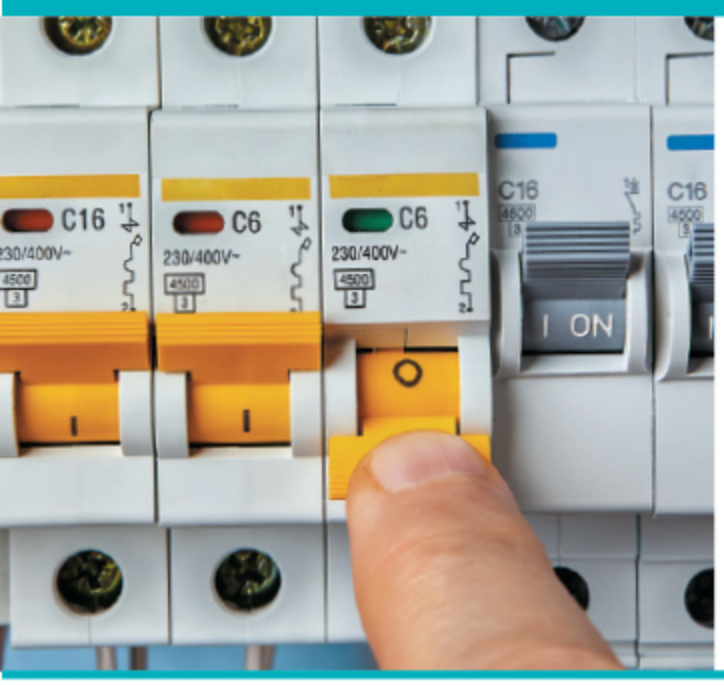

**4.** Justyna podłączyła trzy identyczne żarówki do takich samych baterii w sposób przedstawiony na schematach. Czy wszystkie będą świecić jednakowo? Uzasadnij odpowiedź.




**5.** W obwodzie przedstawionym na schemacie amperomierz A wskazał 120 mA, natomiast amperomierz $A_1$ wskazał 80 mA. Napięcie źródła było równe 12 V. Oblicz opór każdego z oporników.






# 13. Domowa sieć elektryczna

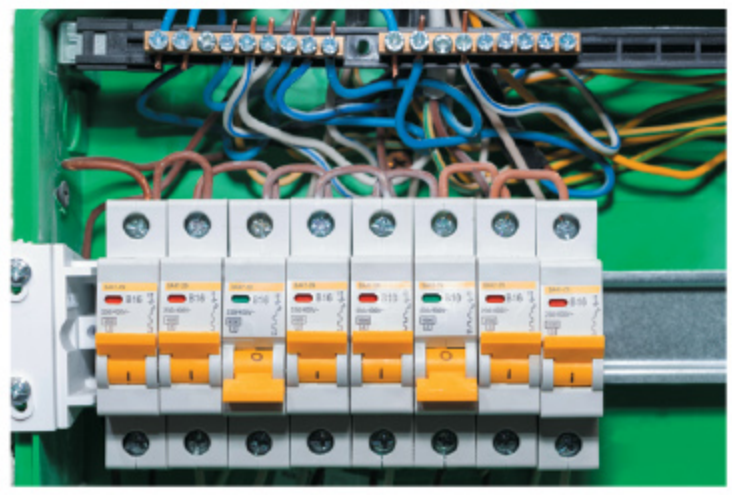
- Instalacja elektryczna w domu
- Bezpieczeństwo korzystania z energii elektrycznej
- Porażenie prądem elektrycznym

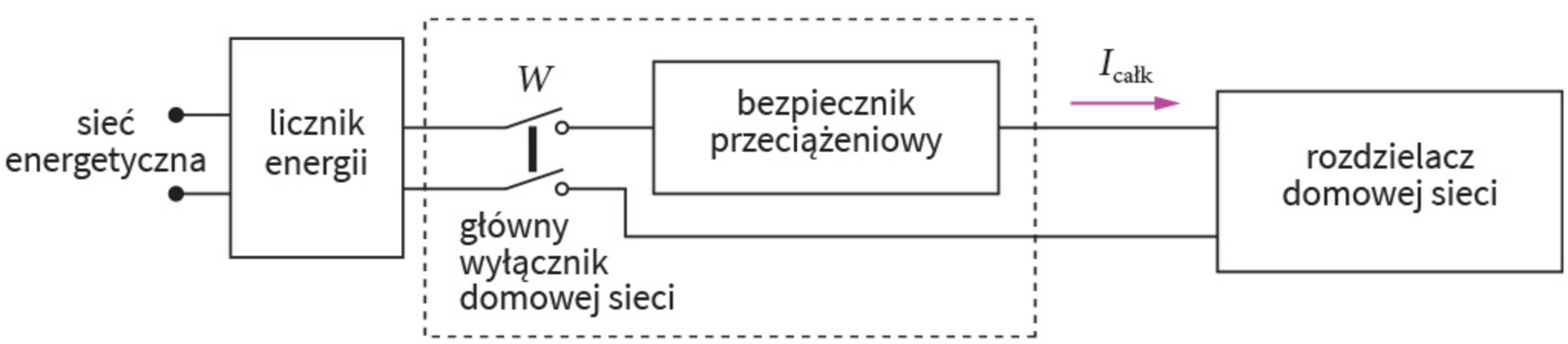
➔ **Przypomnij sobie**, na czym polega połączenie równoległe odbiorników oraz od czego zależy moc prądu.

Dziś w każdym domu znajduje się instalacja elektryczna. Na co dzień dostrzegamy tylko niewielkie jej fragmenty, takie jak gniazdka, wyłączniki światła, a czasem kostkę elektryczną, do której podłącza się żyrandol. Mamy też dostęp do bezpieczników – elementów instalacji bardzo ważnych ze względu na bezpieczeństwo jej użytkowania.

## Domowa sieć elektryczna

Energia elektryczna dostarczana do naszych domów pochodzi z elektrowni i jest przesyłana przez sieci energetyczne. Możemy zatem przyjąć, że bezpośrednim źródłem napięcia zasilającego domową instalację elektryczną jest tzw. **przyłącze**, czyli miejsce, w którym sieć energetyczna łączy się z instalacją w domu. Tuż za przyłączem znajdują się: licznik wykorzystanej energii elektrycznej, główny wyłącznik napięcia oraz główny bezpiecznik sieci (ryc. 13.1). Cały prąd elektryczny w naszych mieszkaniach przepływa przez te urządzenia.






**Ryc. 13.1.** Elementy przyłączeniowe domowej sieci elektrycznej

F Główny bezpiecznik sieci jest tzw. **bezpiecznikiem przeciążeniowym**. Bezpiecznik tego typu odcina zasilanie, gdy natężenie prądu przekracza wartość bezpieczną dla całego obwodu. W zależności od instalacji może to być 25 A lub 40 A. Bezpieczniki przeciążeniowe są zintegrowane z głównym wyłącznikiem domowej sieci, stanowią jedno urządzenie.

Domowa sieć elektryczna najczęściej składa się z kilku niezależnych obwodów, odpowiedzialnych za zasilanie różnych urządzeń domowych. Każdy z nich zabezpieczony jest osobnym bezpiecznikiem, odcinającym prąd przy mniejszym natężeniu niż główny bezpiecznik.

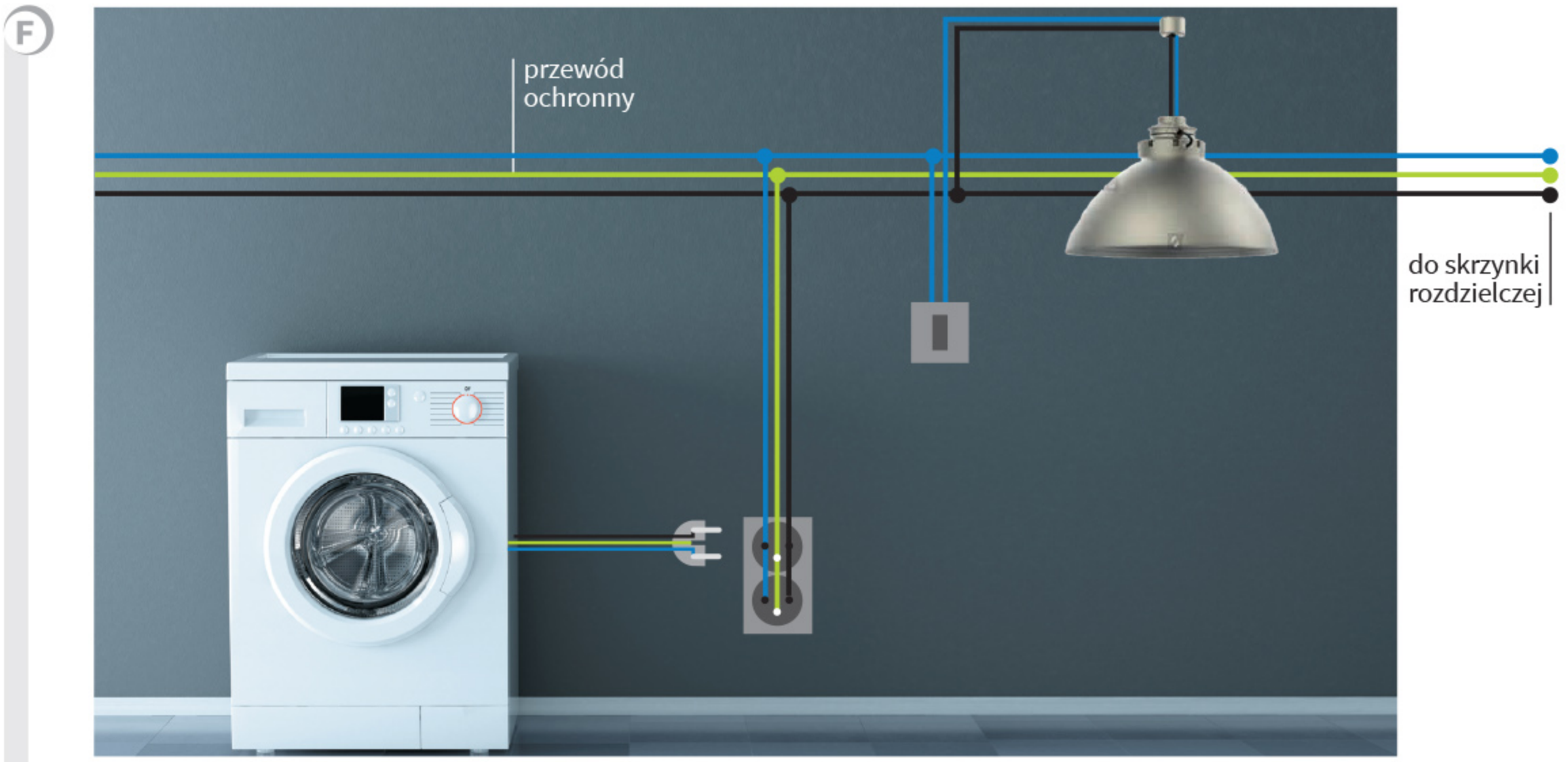
Wszystkie urządzenia elektryczne w naszych domach dostosowane są do napięcia 230 V, dlatego są podłączone do przyłącza równolegle. Dzięki temu na każdym odbiorniku jest takie samo napięcie (230 V), a dodatkowo każde z tych urządzeń może pracować niezależnie od pozostałych.

> W domowej sieci elektrycznej odbiorniki energii są podłączone do przyłącza równolegle.

Urządzenia elektryczne są podłączone do sieci dwoma przewodami, tak by powstał obwód zamknięty. W instalacji elektrycznej znajduje się także przewód ochronny, najczęściej zielono-żółty. Jest on połączony z bolcem wystającym z gniazdek elektrycznych i stanowi uziemienie urządzeń elektrycznych, które tego wymagają. Jego zadaniem jest odprowadzanie prądów, które mogą pojawić się na skutek uszkodzenia danego odbiornika energii elektrycznej. Każda pralka, zmywarka czy lodówka jest podłączona do sieci elektrycznej za pomocą wtyczki z trzema złączami: dwoma w postaci bolców oraz jednego w postaci otworu służącego do połączenia z wystającym z gniazdka bolcem.

Na rycinie 13.2 przedstawiono uproszczony schemat fragmentu domowej instalacji elektrycznej. Lampy na stałe przymocowane do ścian i sufitów najczęściej są podłączane za pomocą dwóch przewodów, bez uziemienia. Na jednym z nich umieszczany jest wyłącznik. Natomiast urządzenia takie, jak czajnik, ekspres do kawy czy pralka podłączamy do gniazdka elektrycznego.

W Europie istnieje wiele typów gniazdek oraz wtyczek do tych gniazdek. Jeśli wyjeżdżamy za granicę i zabieramy ze sobą jakieś urządzenie elektryczne, należy zaopatrzyć się w odpowiednią przejściówkę, umożliwiającą podłączenie urządzenia do miejscowej sieci. Gdy udajemy się poza nasz kontynent, możemy spotkać nie tylko inny typ gniazdek, ale również inne napięcie w sieci. Warto w takim przypadku sprawdzić, czy nasze urządzenie elektryczne będzie prawidłowo pracować po podłączeniu do takiej sieci.




**Ryc. 13.2.** Schematyczne podłączenie dwóch przykładowych domowych urządzeń elektrycznych

**PRZYKŁAD 1.**

Obliczmy, jaka może być maksymalna moc urządzeń elektrycznych włączonych równocześnie do części instalacji domowej zabezpieczonej bezpiecznikiem 16 A.

Napięcie w sieci wynosi 230 V, a całkowity prąd w obwodzie (i płynący przez bezpiecznik) nie może mieć natężenia większego od 16 A. Maksymalna moc urządzeń elektrycznych włączonych równocześnie do instalacji elektrycznej wynosi zatem:

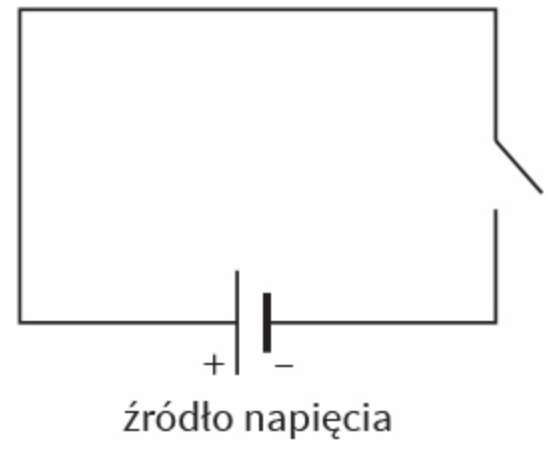
$$P = UI = 230\ \text{V} \cdot 16\ \text{A} = 3680\ \text{W}$$

Nie jest to dużo, bo np. moc pralki podczas podgrzewania wody to około 2500 W, a podobną moc ma również piekarnik elektryczny.

## Bezpieczeństwo korzystania z energii elektrycznej

Napięcie w domowej sieci elektrycznej jest na tyle duże, że w połączeniu z dużym natężeniem prądu może stanowić śmiertelne zagrożenie. Na szczęście wystarczy przestrzegać kilku podstawowych zasad bezpieczeństwa, aby bez obaw korzystać z energii elektrycznej. Do projektowania oraz wykonania sieci elektrycznej należy zatrudniać osoby o odpowiednich kwalifikacjach. Również ewentualne naprawy powinny być wykonywane przez fachowców.

Uszkodzona instalacja elektryczna może być przyczyną tzw. **zwarcia**. O zwarciu mówimy wówczas, gdy zaciski źródła napięcia są połączone wyłącznie przewodem, bez odbiornika (ryc. 13.3).




**Ryc. 13.3.** Obwód bez odbiornika prądu

F Gdy zamkniemy obwód przedstawiony na rycinie 13.3, pojawi się prąd. Zgodnie z prawem Ohma:

$$I = \frac{U}{R}$$

Ponieważ opór metalowego drutu (przewodu) jest bardzo mały, natężenie prądu będzie bardzo duże. Moc wydzielana w obwodzie również będzie bardzo duża, gdyż:

$$P = U \cdot I$$

Gdy doprowadzimy do zwarcia zacisków baterii, napięcie na niej szybko spadnie, gdyż bateria się rozładuje, może się nawet zapalić z powodu nagłego wydzielenia nagromadzonej w niej energii. Jednak gdy źródłem napięcia jest domowe przyłącze sieci elektrycznej, sytuacja jest znacznie poważniejsza. Napięcie w sieci jest dużo większe niż w baterii i jest utrzymywane na stałym poziomie. Duża moc prądu utrzymywana przez dłuższy czas powoduje silne rozgrzanie przewodów, co jest często przyczyną pożarów. Do zwarcia może dojść np. podczas zetknięcia się dwóch przewodów biegnących tuż obok siebie w jednym kablu. Wystarczy uszkodzenie izolacji wskutek przetarcia lub nadtopienia. Jedną z funkcji bezpieczników montowanych w obwodach jest odcięcie zasilania w przypadku wystąpienia zwarcia i dlatego są one tak ważnymi elementami instalacji elektrycznej w domach.

Przewody domowej sieci elektrycznej są najczęściej ukryte w ścianach budynków, dlatego podczas wykonywania drobnych napraw domowych należy uważać, aby ich nie uszkodzić. Należy chronić urządzenia elektryczne od zalania wodą, która jest przewodnikiem (dlatego nie wolno używać suszarek elektrycznych podczas kąpieli!). Poza tym nie należy używać urządzeń elektrycznych, które są w złym stanie technicznym. **I przede wszystkim w żadnym przypadku nie wolno dotykać przewodów elektrycznych pozbawionych izolacji!**

**Ryc. 13.4.** Domowe urządzenia elektryczne powinny być utrzymywane w dobrym stanie technicznym

WARTO WIEDZIEĆ

**Podłączenie tramwajów i trolejbusów do zasilania**

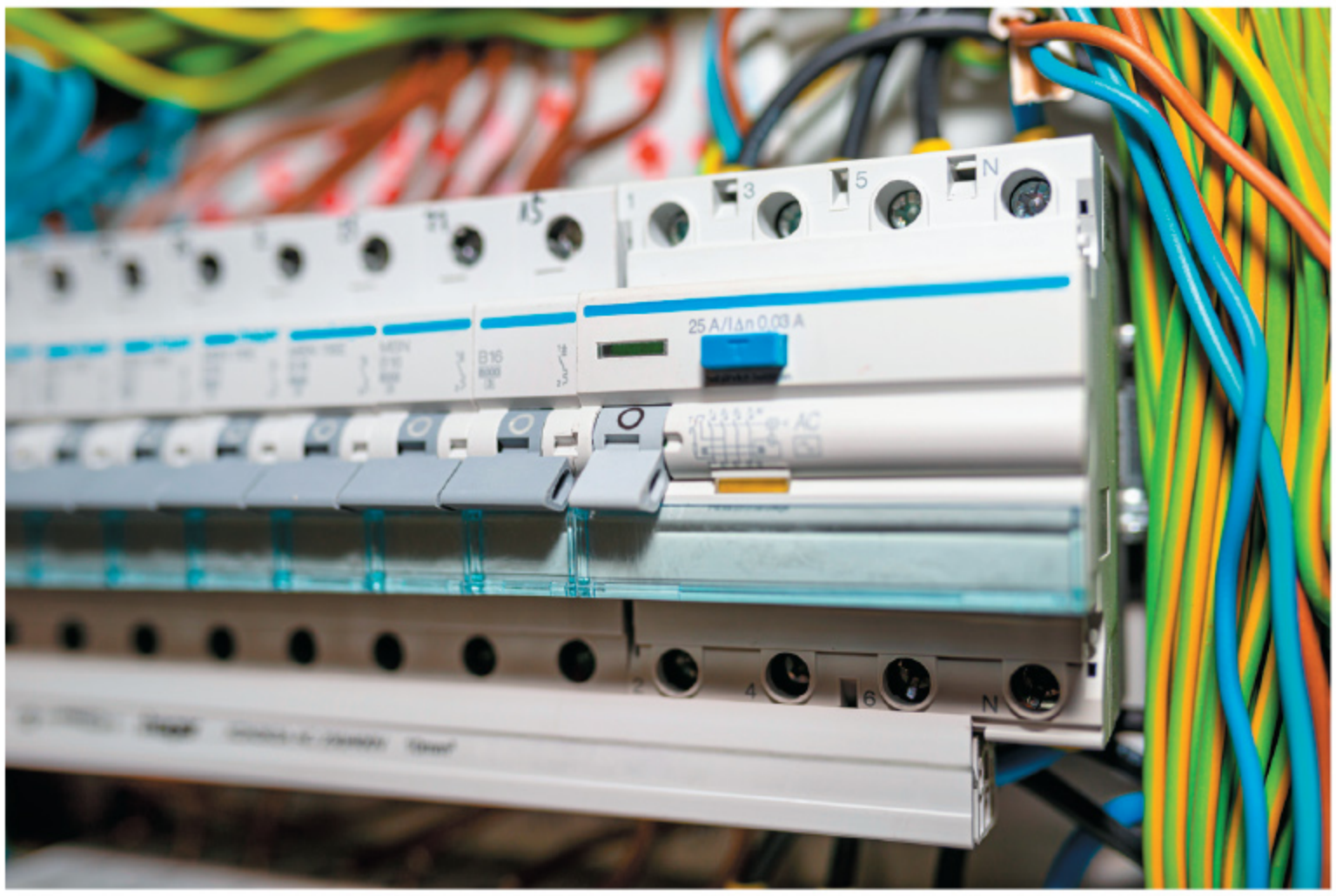
Każdy odbiornik elektryczny wymaga zasilania dwoma przewodami – jednym prąd wpływa, drugim wypływa. Nie inaczej jest w przypadku tramwajów czy trolejbusów, które są zasilane napięciem stałym 600 V. W przypadku tramwajów jest to napięcie między przewodami wiszącymi nad torowiskiem a torami. Z przewodu zasilającego prąd wpływa przez pantograf do układu elektrycznego tramwaju, a wypływa przez metalowe koła do szyn. Szyny podłączone są do rozdzielni, z której wypływa prąd do przewodów sieci trakcyjnej. W ten sposób obwód sieci zasilania tramwajów jest zamknięty. Z kolei sieć zasilania trolejbusów składa się z dwóch przewodów, między którymi jest napięcie 600 V.

Czy można bez obaw stanąć na szynach tramwajowych? Oczywiście tak. Szyny tramwajowe są uziemione, więc napięcie między szyną a ziemią wynosi 0 V. Gdy staniemy jedną nogą na szynie, a drugą na ziemi, prąd nie będzie płynął przez nasze ciało.

## Porażenie prądem elektrycznym

Wiele tkanek ciała człowieka dobrze przewodzi prąd elektryczny. Nasza aktywność sterowana jest wewnętrznymi elektrycznymi impulsami nerwowymi, dlatego prąd elektryczny płynący w naszym ciele, a spowodowany czynnikiem zewnętrznym, nie jest dla nas obojętny. Zwykle nie zauważamy przepływu przez nasze ciało prądów o natężeniu poniżej 1 mA, ale każde większe natężenie odbieramy raczej jako nieprzyjemne czy nawet bolesne doznania (szczypanie, niekontrolowane skurcze mięśni). Prąd o natężeniu powyżej 20 mA płynący przez całe ciało przez kilkanaście sekund może być niebezpieczny dla zdrowia, a powyżej 70 mA – nawet dla życia. Prąd o natężeniu większym niż kilka amperów, płynący np. tylko w obrębie dłoni, może powodować oparzenia, a nawet martwicę tkanek.

W przypadku kontaktu ze źródłem napięcia szczególnie niebezpieczny jest skurcz mięśni, uniemożliwiający porażonej osobie samodzielne oderwanie się od elementów będących pod napięciem. W takiej sytuacji przez całe ciało przez dłuższy czas może płynąć prąd o natężeniu niebezpiecznym dla życia. Efektem może być utrata przytomności lub zatrzymanie akcji serca. Dlatego **najważniejszą rzeczą w przypadku porażenia prądem jest szybkie odłączenie poszkodowanego od źródła napięcia**.




**Ryc. 13.5.** Bezpieczniki różnicowoprądowe w domowej instalacji elektrycznej

Aby zminimalizować ryzyko porażenia, w instalacjach elektrycznych w domach stosuje się automatyczne **bezpieczniki różnicowoprądowe** (ryc. 13.5), których zadaniem jest odcięcie zasilania, gdy w instalacji pojawią się nieprawidłowości w przepływie prądu. Porównują one natężenie prądu wpływającego do obwodu elektrycznego z natężeniem prądu z tego obwodu wypływającego. Podczas normalnej pracy sieci natężenia te są jednakowe, ale w przypadku awarii lub kontaktu człowieka z przewodami część prądu wypływa z obwodu w innym miejscu. Gdy różnica natężeń prądów wpływającego i wypływającego jest większa niż 30 mA, bezpiecznik odłącza zasilanie. Bezpieczniki różnicowoprądowe montuje się oprócz bezpieczników przeciążeniowych.

## PODSUMOWANIE

- **Domowa sieć elektryczna** jest obwodem odbiorników energii elektrycznej połączonych równolegle.
- **Bezpieczniki przeciążeniowe** odcinają zasilanie, gdy natężenie prądu przekracza wartość bezpieczną dla całego obwodu.
- **Bezpieczniki różnicowoprądowe** odcinają zasilanie, gdy nastąpi przepływ prądu poza sieć elektryczną.

## PYTANIA I ZADANIA

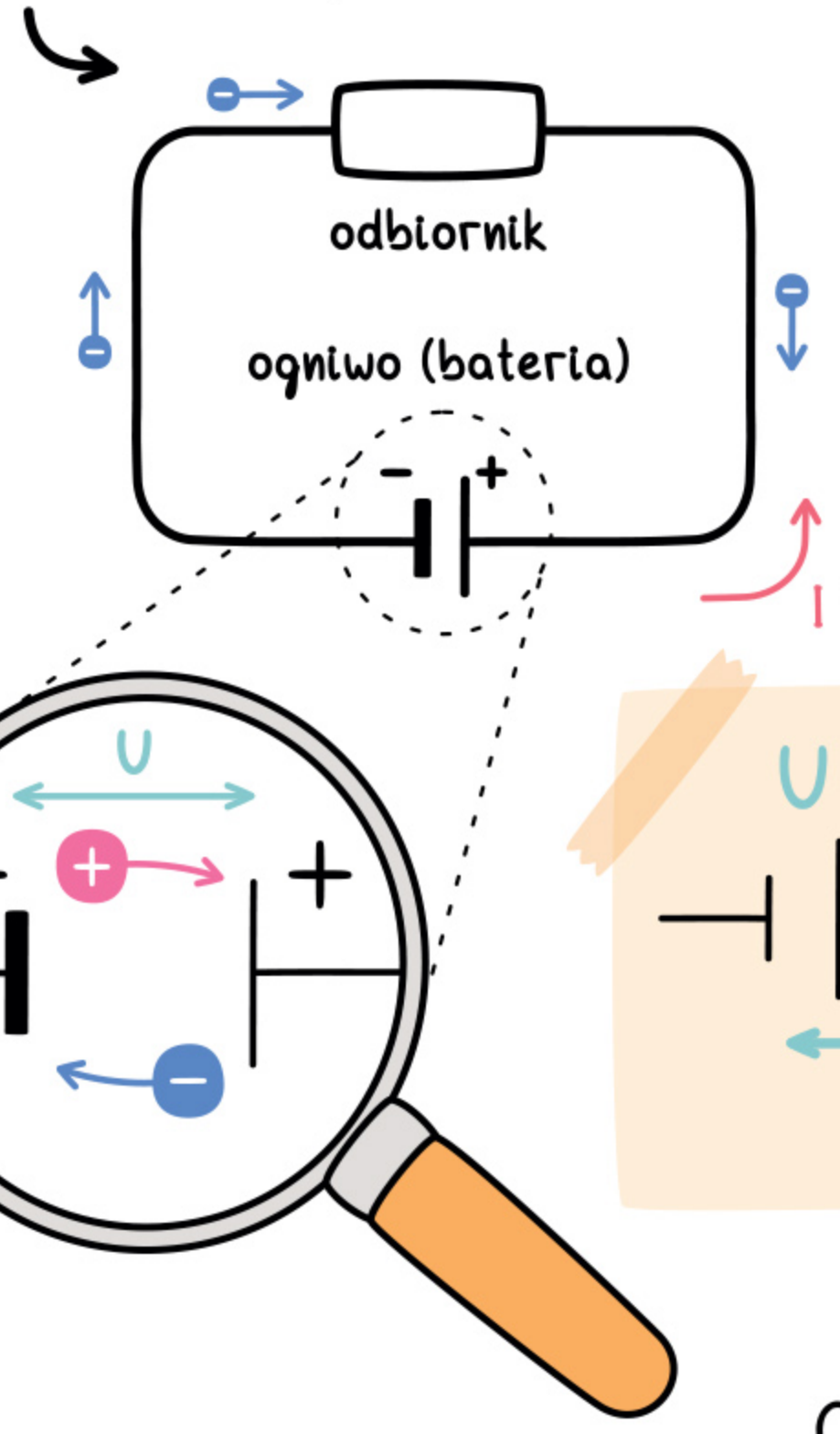
F

1. Zosia zauważyła, że w czasie 3 godzin sobotniego poranka licznik pokazał wykorzystanie 9 kWh energii elektrycznej. Oblicz średnie natężenie prądu płynącego w tym czasie przez licznik w domu Zosi.
2. Jeden z obwodów domowej instalacji elektrycznej jest zabezpieczony bezpiecznikiem przeciążeniowym 10 A. Czy do tego obwodu można podłączyć piekarnik elektryczny o mocy 2800 W? Uzasadnij odpowiedź.
3. Wyjaśnij różnice w działaniu bezpieczników przeciążeniowych oraz różnicowoprądowych.
4. Naszkicuj schemat instalacji elektrycznej w łazience swojego mieszkania (patrz ryc. 13.2).
5. Listwa zasilająca do komputerów zabezpieczona jest bezpiecznikiem 10 A. Wiktor podłączył do niej komputer, którego pobór mocy wynosi 250 W, oraz monitor, którego moc wynosi 70 W. Wieczorem podłączył do listwy jeszcze lampę o mocy 60 W i w tym momencie bezpiecznik odłączył zasilanie. Czy z tego wynika, że w lampie jest zwarcie? Uzasadnij odpowiedź.

# PRĄD ELEKTRYCZNY

**PRĄD ELEKTRYCZNY** to uporządkowany przepływ cząstek naładowanych.

ruch elektronów w przewodzie

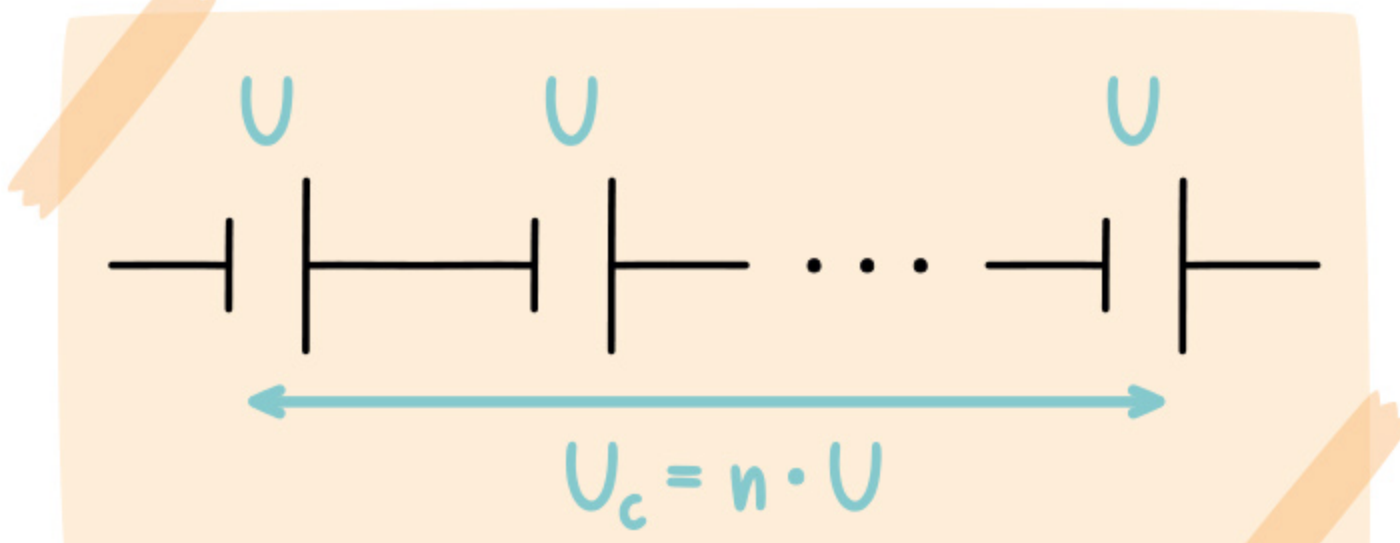



**natężenie prądu**

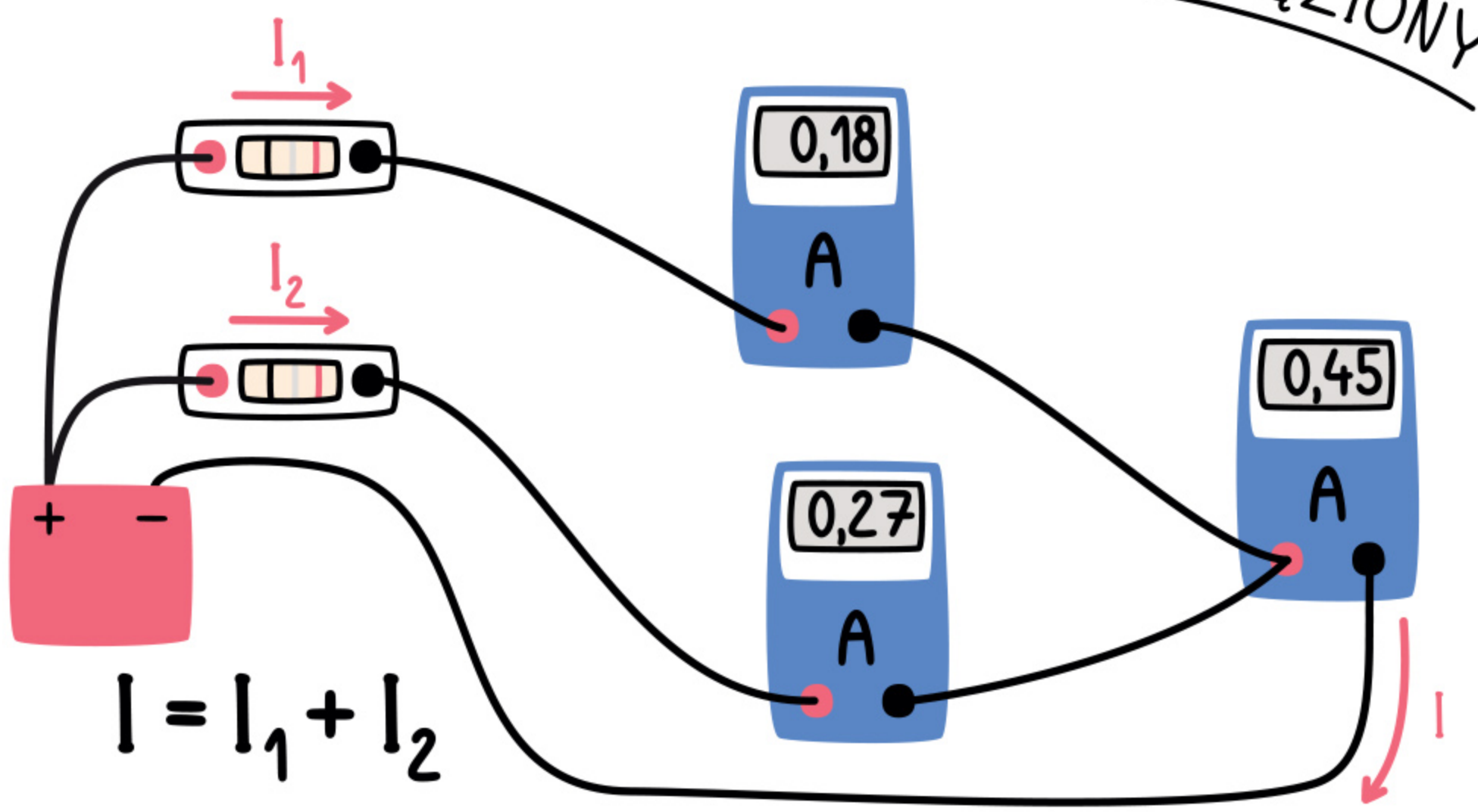
$$I = \frac{q}{t}$$

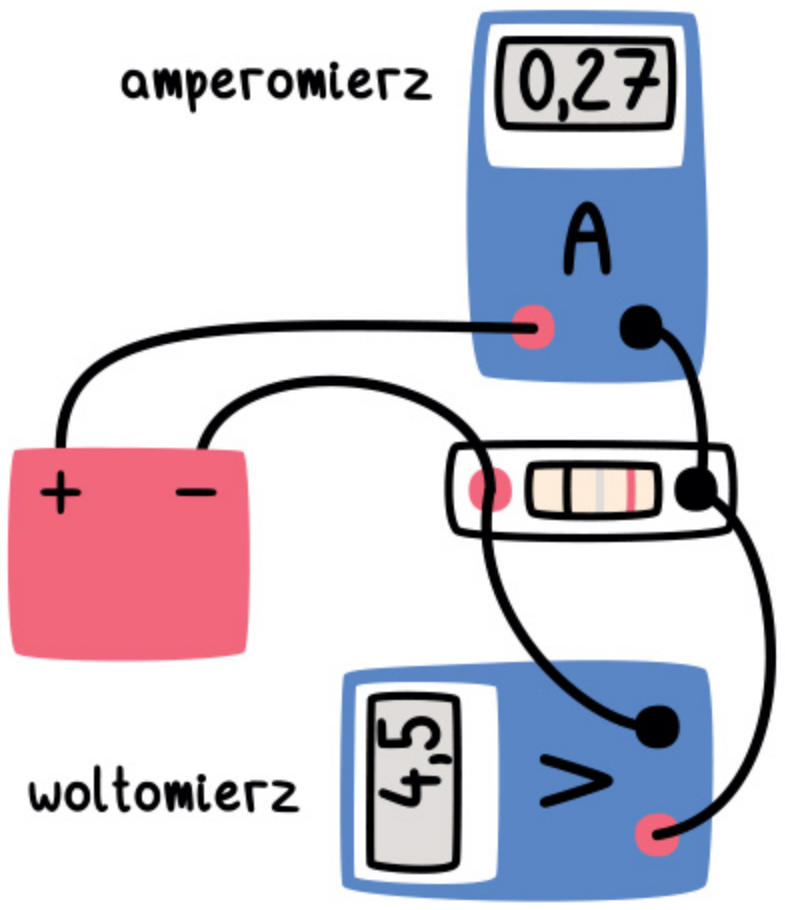
q – ładunek przepływający przez przekrój poprzeczny przewodu

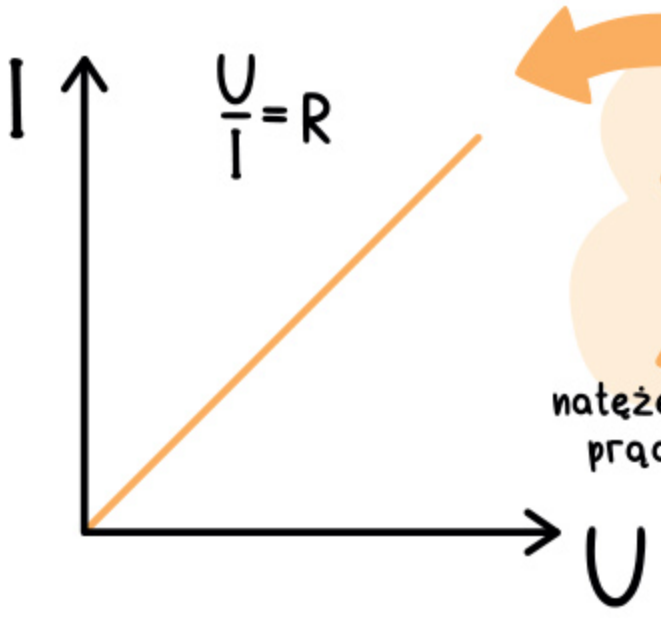
t – czas

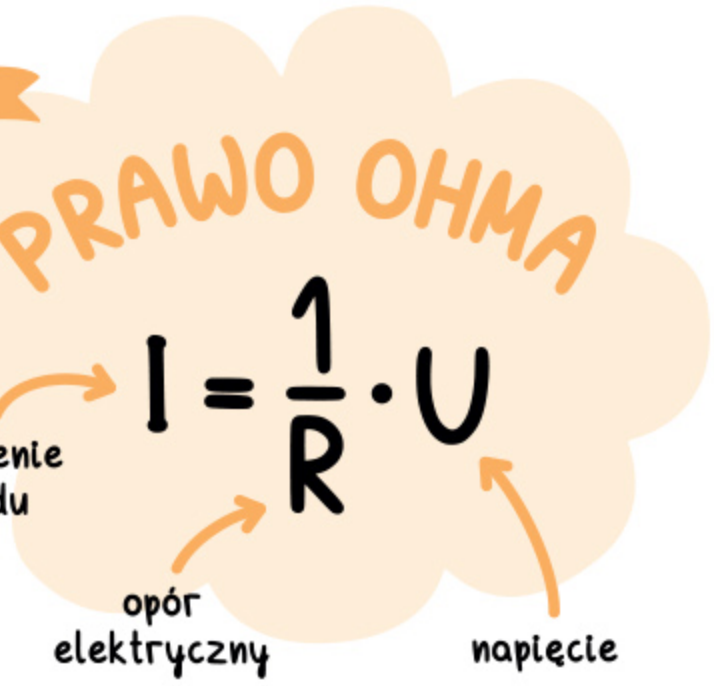



## OBWÓD ROZGAŁĘZIONY





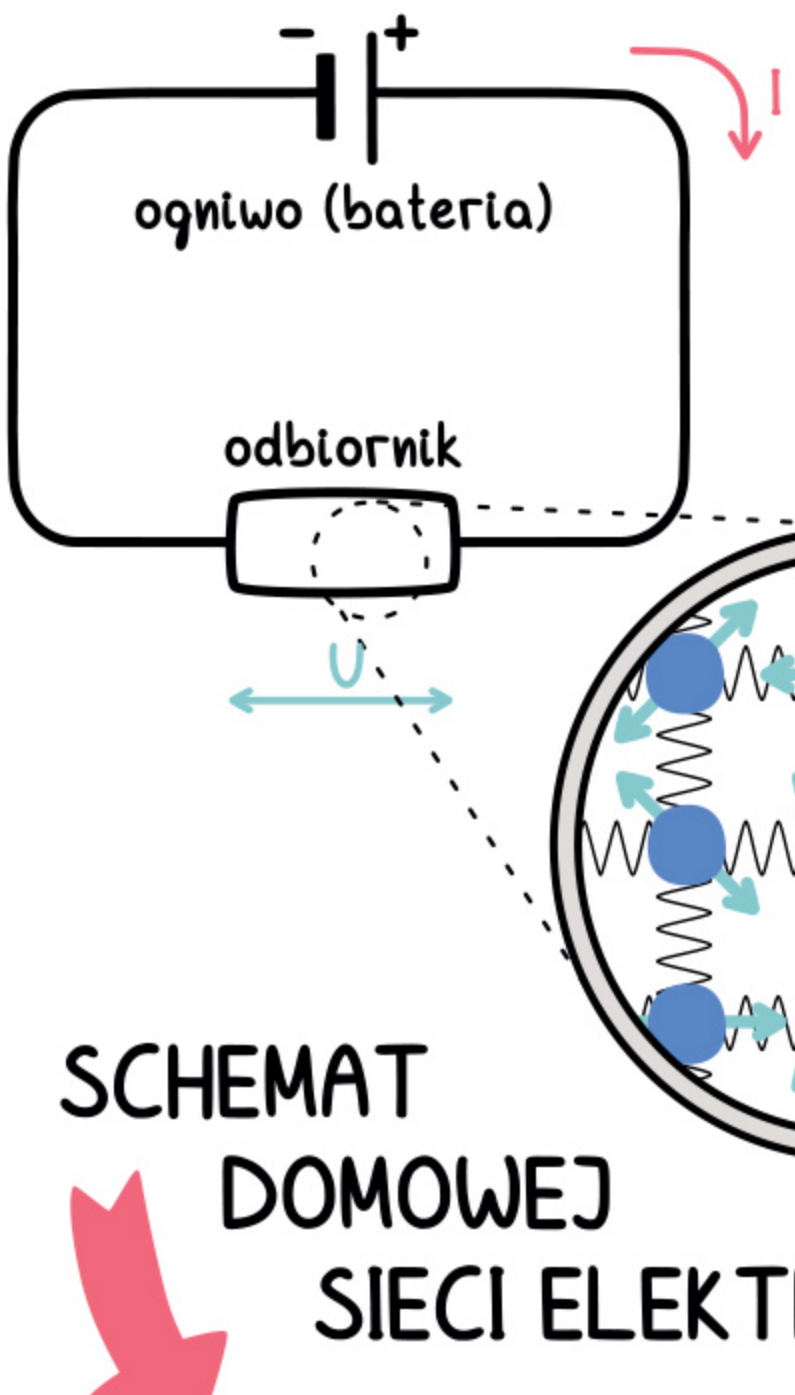



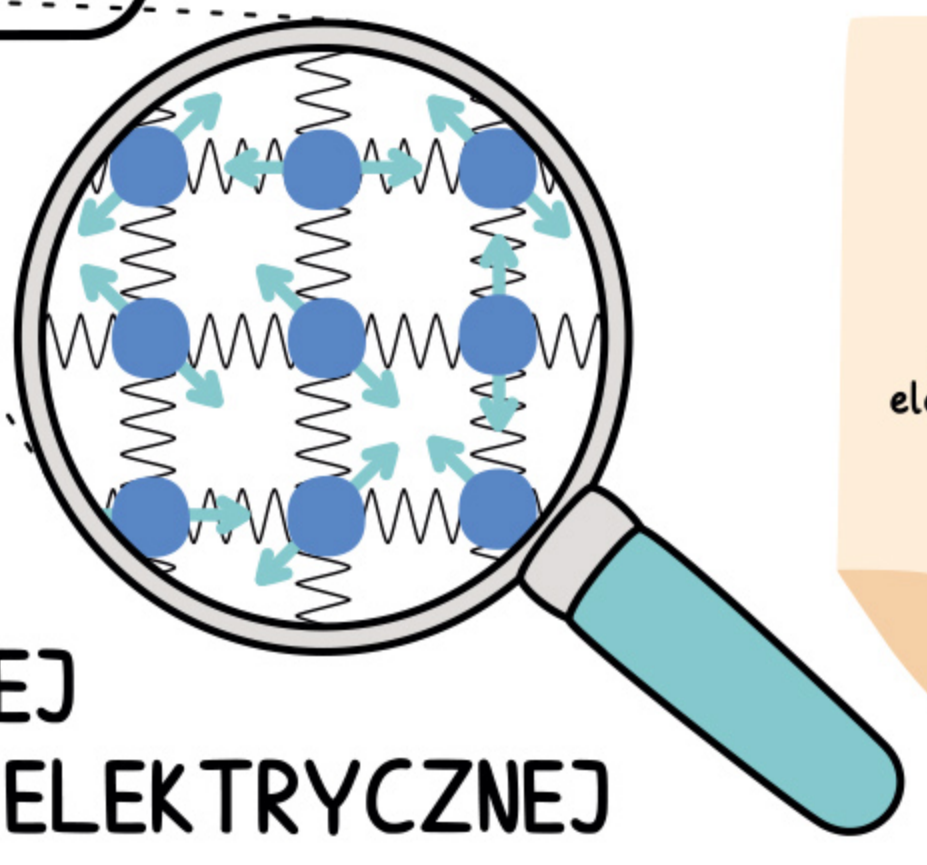

energia wiązań międzycząsteczkowych → energia pola elektrycznego → energia wydzielona w odbiorniku → energia wydzielona w odbiorniku

energia wydzielona w odbiorniku

$$E = U \cdot I \cdot t$$

napięcie; natężenie prądu; czas



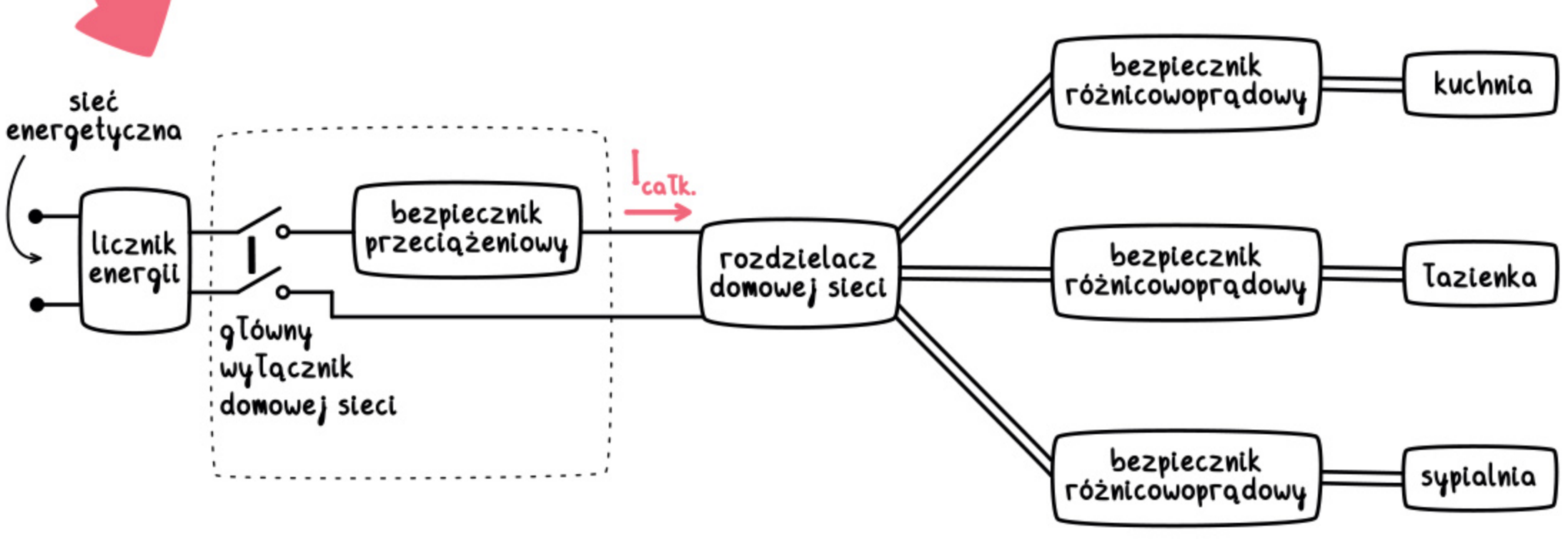



**Moc prądu** – szybkość przekazywania energii elektrycznej.

$$P = \frac{E}{t} = U \cdot I$$

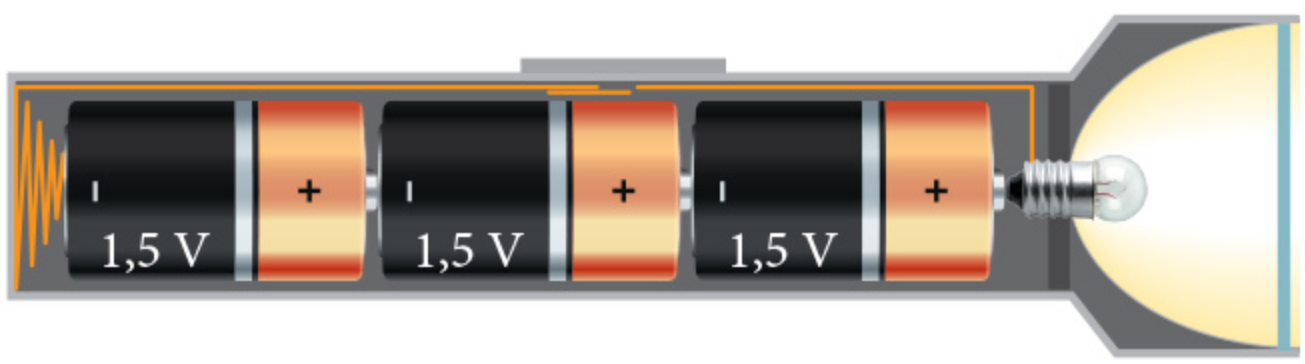
energia elektryczna; czas

# SCHEMAT DOMOWEJ SIECI ELEKTRYCZNEJ



## PYTANIA I ZADANIA

**1.** Na schematycznym rysunku przedstawiono przekrój poprzeczny latarki starego typu.



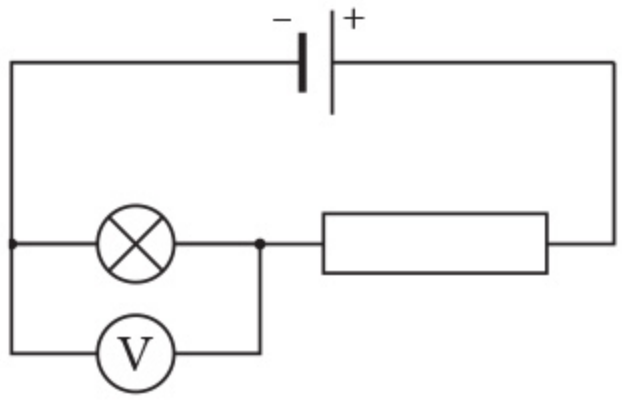

a) Narysuj schemat obwodu elektrycznego w tej latarce.
b) Jakim napięciem była zasilana żarówka?

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

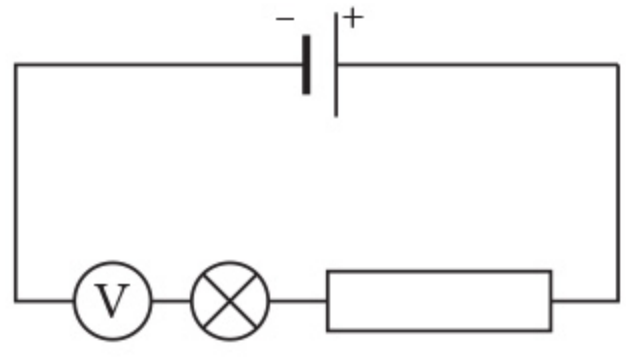
| | | | |
|---|---|---|---|
| **1.** | Gdy opór elektryczny przewodu będzie coraz mniejszy w wyniku skracania tego przewodu, to pod wpływem tego samego napięcia przez przewód będzie płynął prąd o coraz większym natężeniu. | **P** | **F** |
| **2.** | Jeśli opór elektryczny przewodów zasilających odbiornik jest mały w porównaniu z oporem odbiornika, to można przyjąć, że napięcie na odbiorniku jest równe napięciu źródła. | **P** | **F** |
| **3.** | Wraz ze wzrostem napięcia przyłożonego do opornika rośnie ładunek przepływający przez ten opornik w jednostce czasu. | **P** | **F** |

**3.** Patryk chciał zmierzyć za pomocą woltomierza napięcie na żarówce w pewnym obwodzie prądu.
**Wybierz wszystkie poprawne schematy podłączenia woltomierza.**

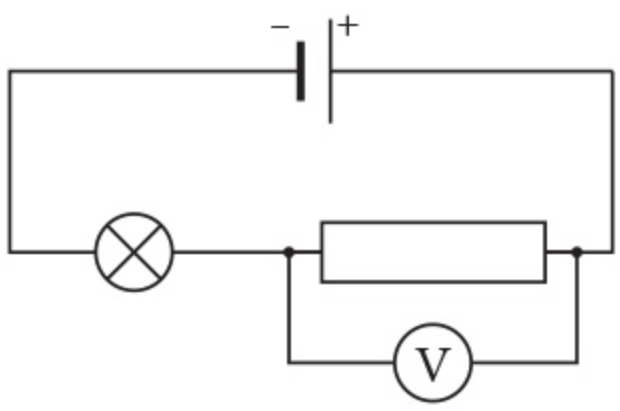
**A.**



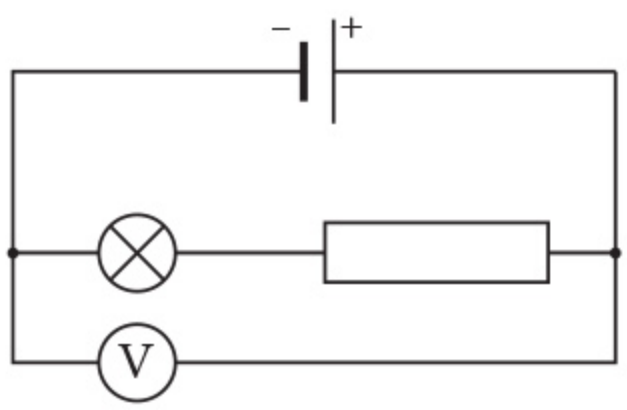

**B.**



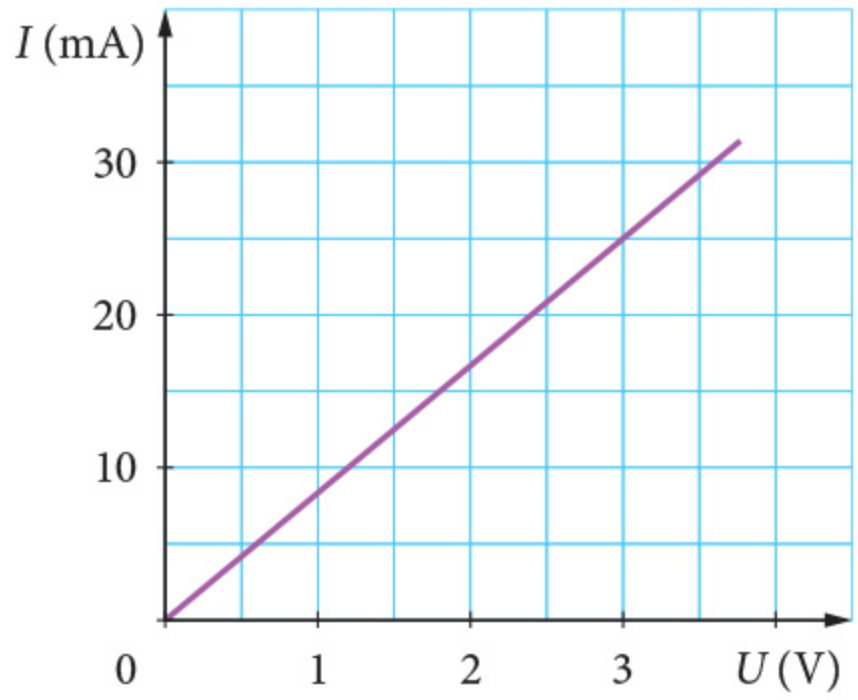

**C.**




**D.**

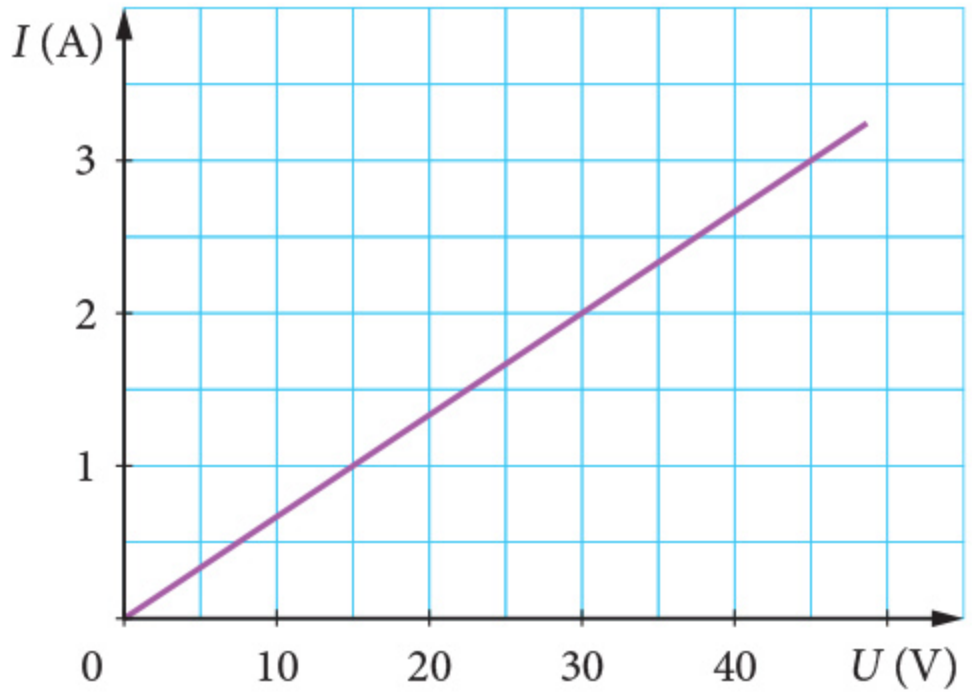


**4.** Na wykresie przedstawiono zależność natężenia prądu płynącego przez opornik od przyłożonego do niego napięcia. Na podstawie wykresu wyznacz opór elektryczny opornika.




**5.** Czajnik elektryczny ma moc 1500 W, a moc piekarnika elektrycznego jest równa 2300 W. Oba urządzenia są przeznaczone do pracy pod napięciem 230 V. Które z tych urządzeń ma większy opór elektryczny? Ile razy większy?

**6.** Na wykresie przedstawiono zależność natężenia prądu płynącego przez grzałkę od przyłożonego napięcia.

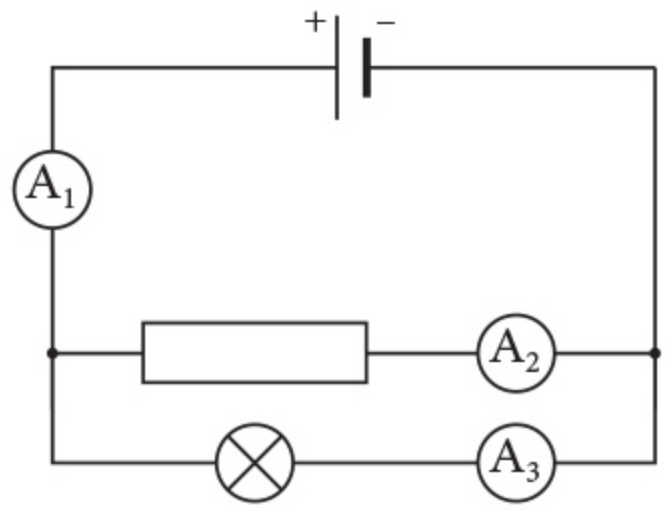



**Wybierz właściwe dokończenie zdania spośród A–C oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–3.**

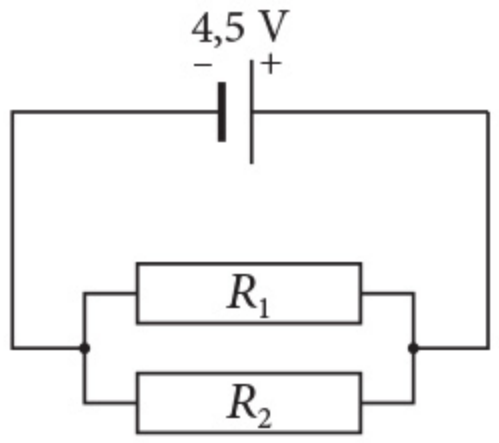
Gdy napięcie zasilające grzałkę wzrośnie dwukrotnie, to moc wydzielona na tej grzałce

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **A.** | również wzrośnie dwukrotnie, | ponieważ | **1.** | wraz z dwukrotnym wzrostem napięcia natężenie prądu także wzrośnie dwukrotnie. |
| **B.** | wzrośnie czterokrotnie, | | **2.** | moc grzałki jest jej cechą, niezależną od parametrów prądu. |
| **C.** | pozostanie stała, | | **3.** | natężenie prądu się nie zmienia. |

**7.** W obwodzie przedstawionym na schemacie amperomierz $A_1$ wskazał 230 mA, a amperomierz $A_2$ wskazał 170 mA. Jakie były wskazania amperomierza $A_3$?




**8.** Dwa oporniki podłączono do baterii o napięciu 4,5 V w sposób przedstawiony na schemacie. Oporniki te mają opory $R_1 = 150\ \Omega$ oraz $R_2 = 230\ \Omega$.
Na którym z tych oporników wydzieli się większa moc? Ile razy większa?




**9.** W pokoju Julii odbiornikami energii elektrycznej są: komputer o mocy 150 W pracujący 8 godzin dziennie, oświetlenie o mocy 40 W pracujące 10 godzin dziennie oraz ładowarka o mocy 10 W pracująca 2 godziny dziennie. Cena 1 kWh energii elektrycznej jest równa 1,40 zł. Oblicz miesięczny koszt energii elektrycznej zużywanej w tym pokoju. Zakładamy, że miesiąc ma 30 dni.

**10.** Fragment domowej sieci elektrycznej jest zabezpieczony bezpiecznikiem 10 A. W obwodzie tym włączone są: lampa o mocy 50 W, telewizor o mocy 200 W oraz czajnik o mocy 1500 W. Wykonaj odpowiednie obliczenia i sprawdź, czy do tego obwodu można jeszcze podłączyć żelazko o mocy 1200 W.

## Najważniejsze pojęcia

- amperomierz [*ammeter*] 72
- bateria (ogniw) [*battery*] 69
- bezpiecznik przeciążeniowy [*circuit breaker*] 94
- bezpiecznik różnicowoprądowy [*residual-current device*] 98
- moc prądu elektrycznego [*electric power*] 83
- natężenie prądu [*current*] 71
- obwód elektryczny [*electrical circuit*] 67
- ogniwo (bateria) [*galvanic cell*] 67
- opornik [*resistor*] 76
- opór elektryczny [*electrical resistance*] 74
- półprzewodnik [*semiconductor*] 76, 80
- prawo Ohma [*Ohm's law*] 75
- prąd elektryczny [*electric current*] 66
- woltomierz [*voltmeter*] 68
- zwarcie [*short circuit*] 95
- źródło napięcia [*voltage source*] 67

# ELEKTROMAGNETYZM

Przed czym nas chroni pole magnetyczne Ziemi? Jak powstają zorze polarne? Jak wytwarzana i przesyłana jest energia elektryczna używana w naszych domach? Tymi zagadnieniami zajmuje się ELEKTROMAGNETYZM.

# 14. Pole magnetyczne

- Pole magnetyczne wokół magnesu
- Indukcja magnetyczna
- Ferromagnetyki

➔ **Przypomnij sobie**, czym są magnesy oraz jak działa kompas.

Zjawiska magnetyczne były znane już w starożytnej Grecji. Grecy wiedzieli, że występujący w pewnych rejonach na Ziemi minerał, zwany magnetytem, przyciąga kawałki żelaza, a dwa kawałki tego minerału przyciągają się lub odpychają w zależności od ich wzajemnego ustawienia. Zauważyli też, że podłużny, mogący się obracać kawałek magnetytu ustawia się wzdłuż linii północ–południe, zawsze tym samym końcem w kierunku północnym. Tak właśnie działają magnesy, a kawałki magnetytu były pierwszymi magnesami odkrytymi przez ludzkość. Ten koniec magnesu, który pokazuje północ geograficzną, nazwano jego biegunem północnym (N), a drugi – biegunem południowym (S). Magnes jest najważniejszym elementem kompasu magnetycznego. Mały podłużny magnes, który może się obracać, określa się mianem igły magnetycznej.

## Pole magnetyczne wokół magnesu

Oddziaływanie magnesów na odległość wyjaśniamy istnieniem **pola magnetycznego** (podobnie jak oddziaływanie ładunków elektrycznych – istnieniem pola elektrycznego). Każdy magnes jest źródłem pola magnetycznego, które oddziałuje na inne magnesy. Źródłem takiego pola jest również Ziemia.

W celu zobrazowania pola magnetycznego używamy pojęcia **linii pola**. Są to linie, zgodnie z którymi ustawia się igła magnetyczna. Przyjmuje się umownie, że biegun północny igły wskazuje zwrot linii pola, zatem igła magnetyczna pokazuje kierunek i zwrot linii pola w danym punkcie (ryc. 14.1). Z tego wynika, że gdy idziemy w kierunku wskazywanym przez igłę magnetyczną, poruszamy się wzdłuż linii pola magnetycznego (scenariusz doświadczenia 4, s. 342).

s. 342

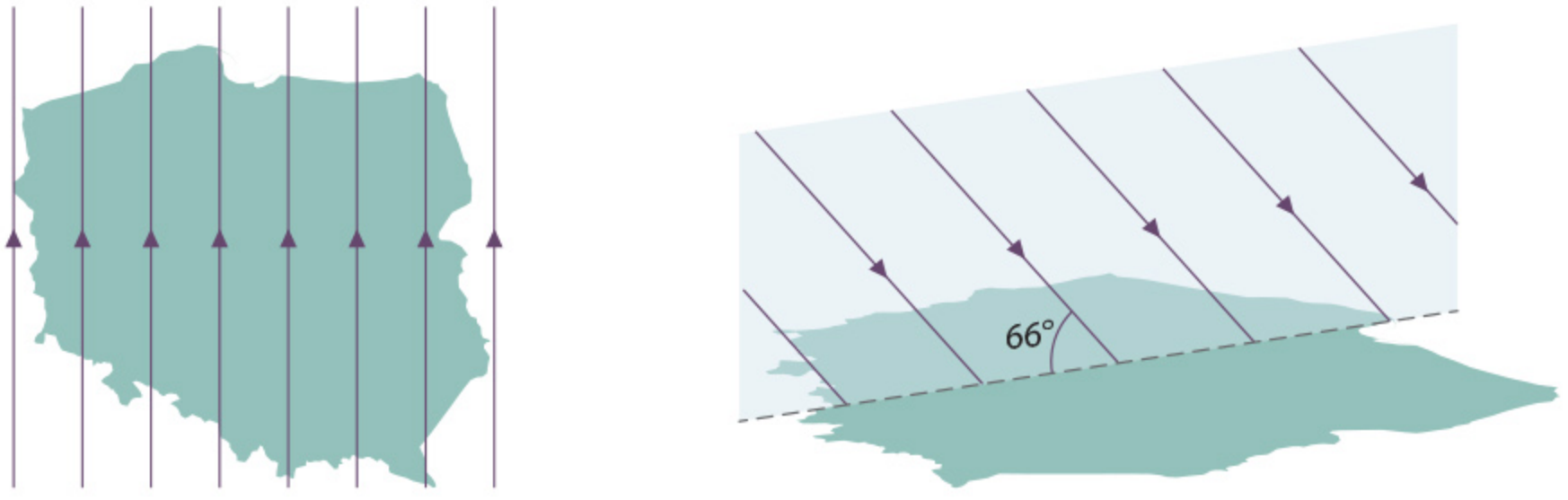
**DOŚWIADCZENIE 1.**

Magnes sztabkowy lub igłę magnetyczną połóż na kawałku styropianu. Styropian umieść w plastikowej misce z wodą, tak aby swobodnie pływał. Czy na magnes działa siła przesuwająca go w określoną stronę? Z obserwacji Słońca lub za pomocą smartfona ustal kierunki geograficzne. Wskaż, który koniec magnesu jest jego biegunem północnym.

## WARTO WIEDZIEĆ

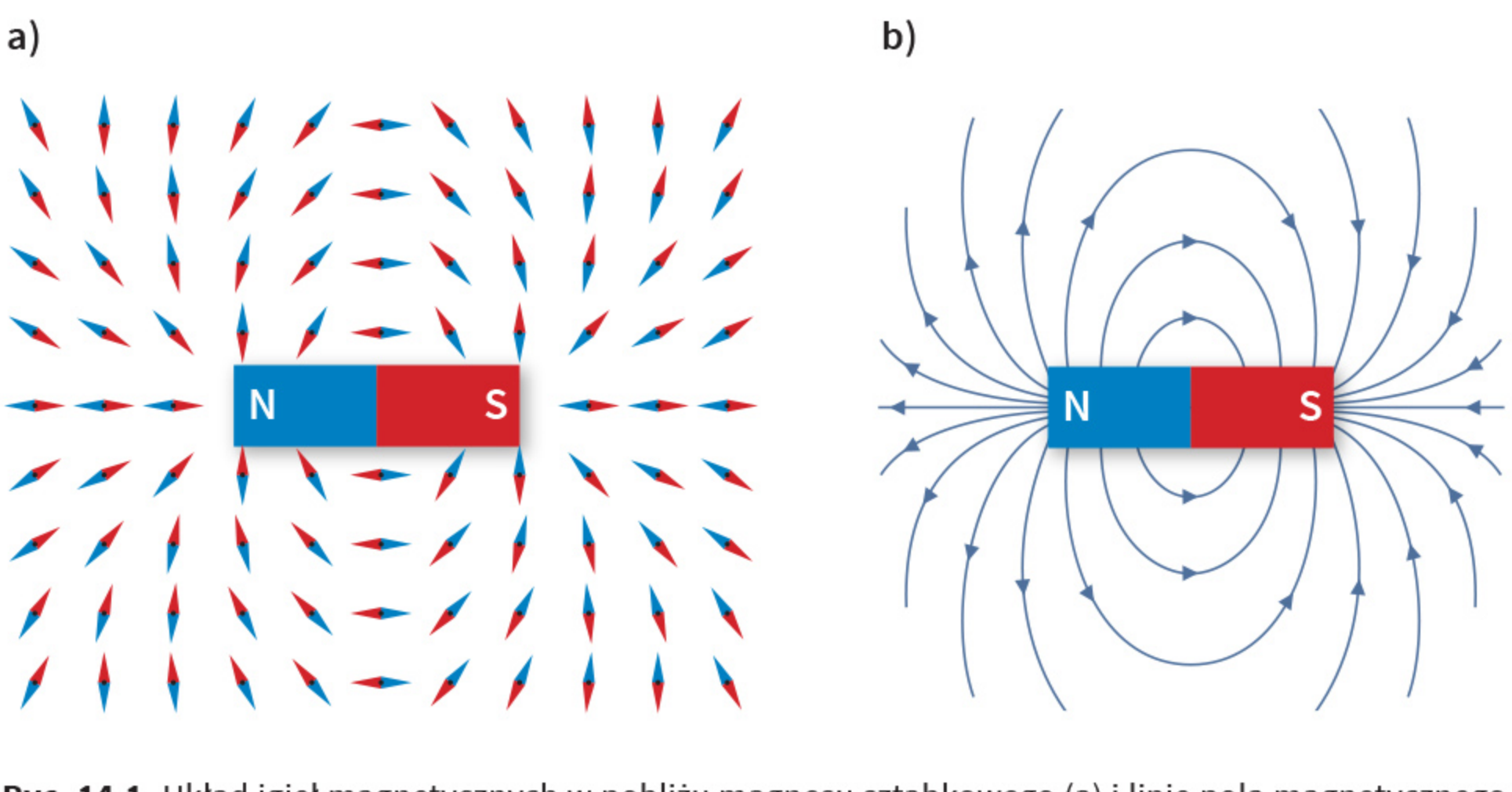
**Pole magnetyczne w Polsce**

Na terenie Polski kompasy magnetyczne wskazują północ geograficzną z dobrym przybliżeniem. Okazuje się, że w Polsce linie ziemskiego pola magnetycznego nachylone są pod kątem 66° do poziomu. Igła kompasu nie może się obracać w płaszczyźnie pionowej, dlatego kompas nie pokazuje tego nachylenia linii pola.




Linie ziemskiego pola magnetycznego na terenie Polski, widziane z góry i z boku

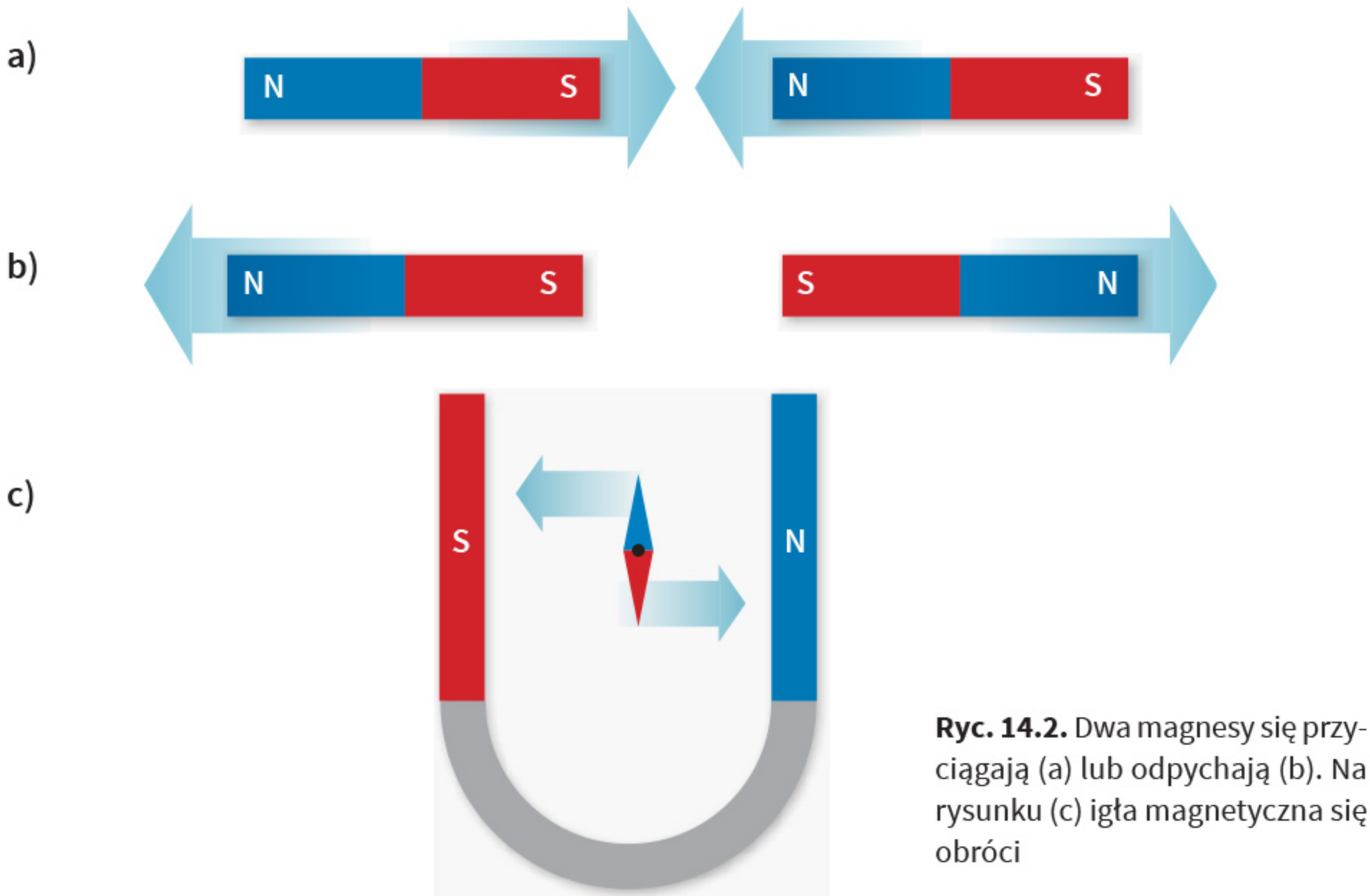
Jeśli użyjemy wielu igieł magnetycznych, możemy zobaczyć linie pola magnesu. Na rycinie 14.1a pokazano ułożenie igieł magnetycznych w pobliżu magnesu sztabkowego, a linie pola magnetycznego przedstawia rycina 14.1b.




**Ryc. 14.1.** Układ igieł magnetycznych w pobliżu magnesu sztabkowego (a) i linie pola magnetycznego takiego magnesu (**b**)

Linie pola magnetycznego wychodzą z bieguna północnego magnesu, a wchodzą do południowego. W pobliżu biegunów linie pola są najbliżej siebie. To znaczy, że w tych obszarach pole jest znacznie silniejsze niż w pozostałych.

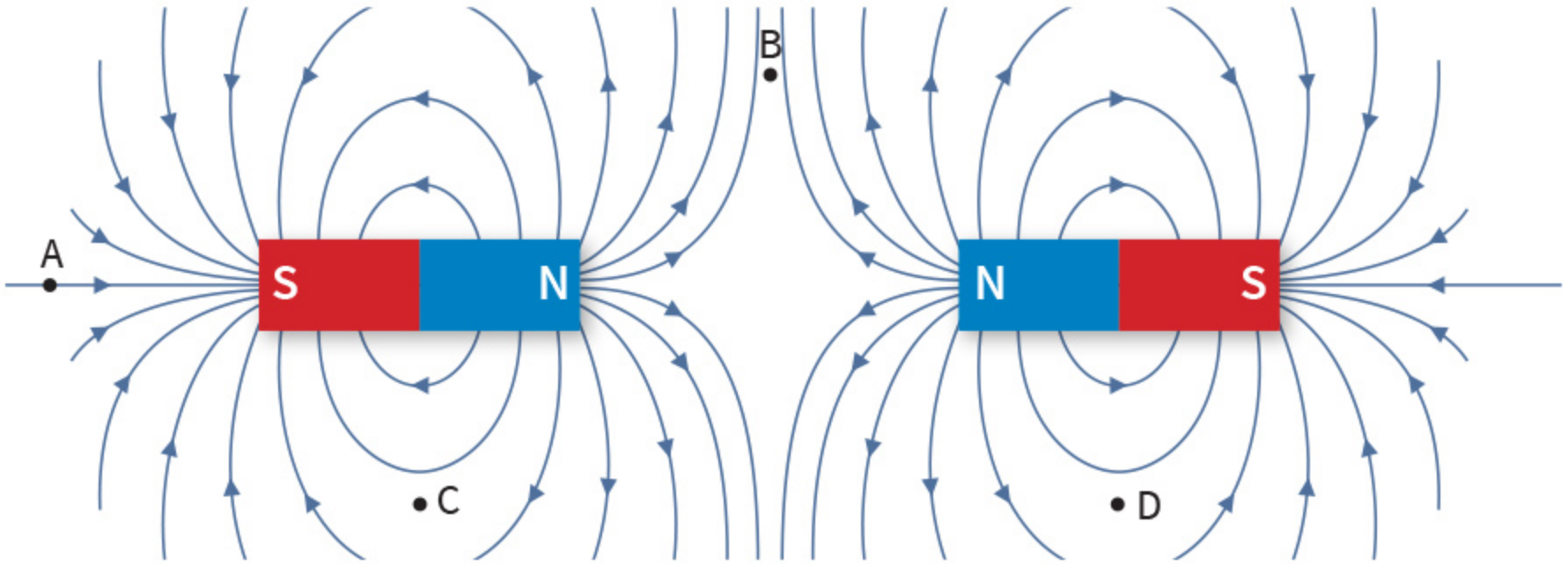
W zewnętrznym polu magnetycznym na magnes działają siły ustawiające go wzdłuż linii pola, a dodatkowo wciągające go w obszar silniejszego pola magnetycznego. Magnesy zwrócone do siebie przeciwnymi biegunami przyciągają się. Każdy z nich jest wciągany w obszar silniejszego pola, obecnego w pobliżu biegunów drugiego magnesu (ryc. 14.2a). Magnesy zwrócone do siebie tymi samymi biegunami odpychają się (ryc. 14.2b).




**Ryc. 14.2.** Dwa magnesy się przyciągają (a) lub odpychają (b). Na rysunku (c) igła magnetyczna się obróci

**PRZYKŁAD 1.**

Na rysunku przedstawiono linie pola magnetycznego, którego źródłem są dwa magnesy. Jak ustawi się igła kompasu w punktach A, B, C, D?




Igła magnetyczna ustawia się zgodnie z liniami pola magnetycznego. Przez punkt A przechodzi linia pola skierowana w prawo, więc igła kompasu będzie w tym miejscu skierowana w prawo. Linie pola w pobliżu punktu B biegną w górę i tak też ustawi się igła kompasu. Bez problemu możemy (w wyobraźni) uzupełnić rysunek o linie pola przechodzące przez punkty C i D – w punkcie C igła będzie skierowana w lewo, w punkcie D – w prawo.

## Indukcja magnetyczna

Do opisu pola magnetycznego potrzebna jest wielkość określająca, jak silne jest pole w danym miejscu. Taką wielkością jest **indukcja magnetyczna**, oznaczana symbolem $\vec{B}^*$. Jednostką indukcji magnetycznej jest **tesla** (T). Pole magnetyczne o indukcji 1 T jest bardzo silne. Indukcja pola magnetycznego na większości obszaru Ziemi wynosi zaledwie 30 μT. Indukcja pola magnesów na lodówkę (tuż przy ich powierzchni) jest rzędu 0,001 T.

Wielkością opisującą pole magnetyczne jest indukcja magnetyczna $\vec{B}$, a jej jednostką jest tesla (T).

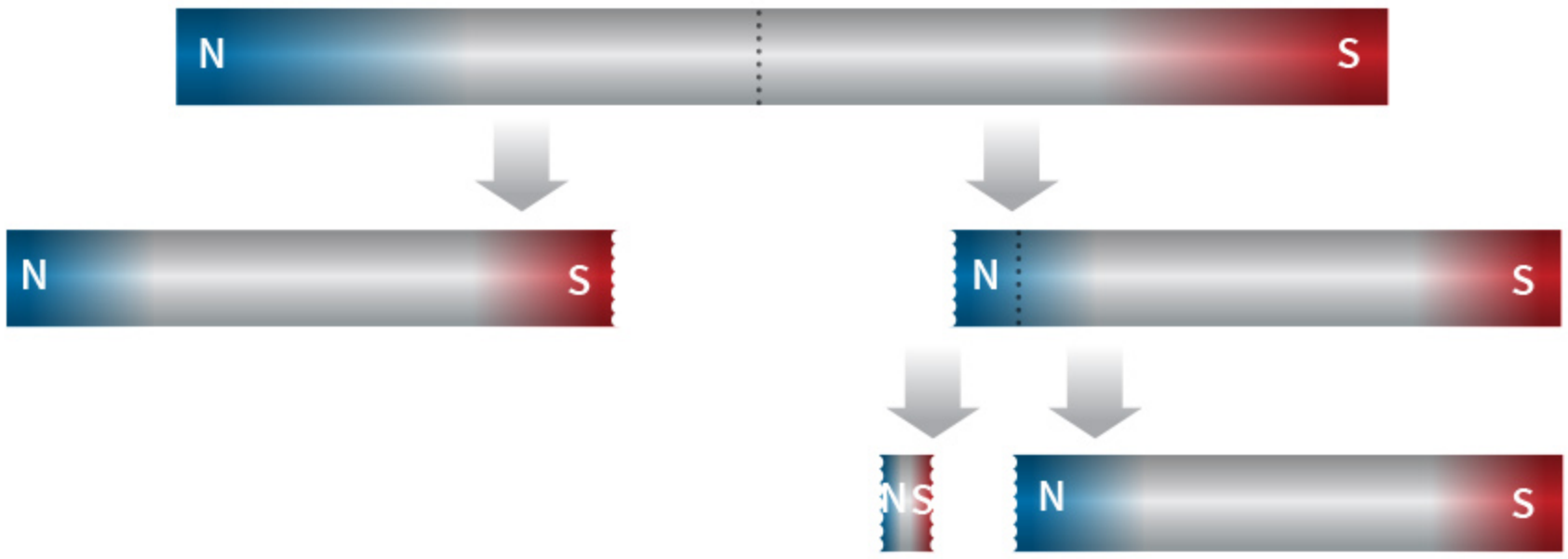
**DOŚWIADCZENIE 2.**

Niektóre smartfony są wyposażone w czujnik pola magnetycznego, więc umożliwiają bezpośredni pomiar indukcji magnetycznej.

1. Skorzystaj z aplikacji Phyphox zainstalowanej na tego typu smartfonie i zmierz indukcję ziemskiego pola magnetycznego.
2. Następnie ustaw magnes sztabkowy wzdłuż linii ziemskiego pola magnetycznego i zmierz indukcję wypadkowego pola magnesu i Ziemi w odległości 10 cm od jednego bieguna magnesu, a potem od drugiego. Czy odczytane wartości są podobne? Wyjaśnij wynik pomiarów.
3. Oszacuj indukcję pola magnetycznego magnesu w odległości 10 cm od jego biegunów.

## Ferromagnetyki

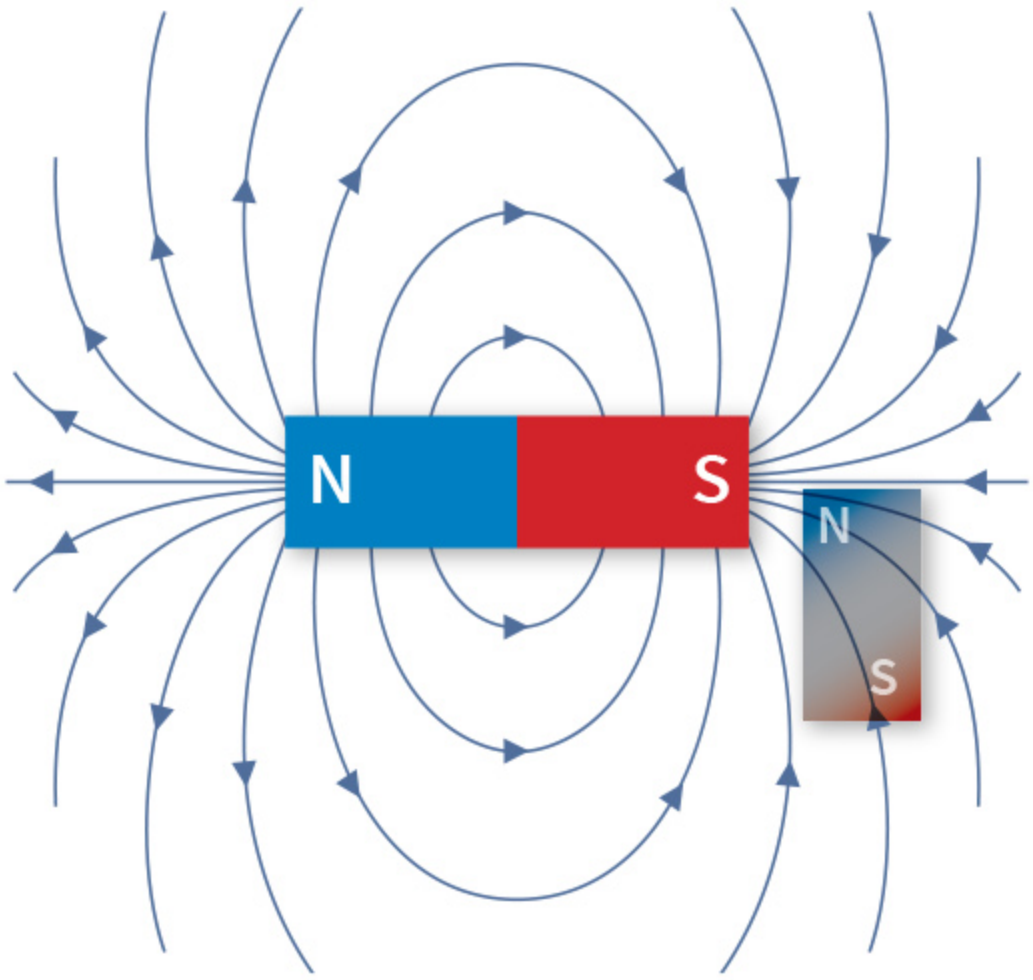
Jak mały może być magnes? Okazuje się, że nawet najdrobniejsze fragmenty magnesu są ciągle magnesami, tylko słabszymi. Nawet atomy wielu pierwiastków są miniaturowymi magnesami.



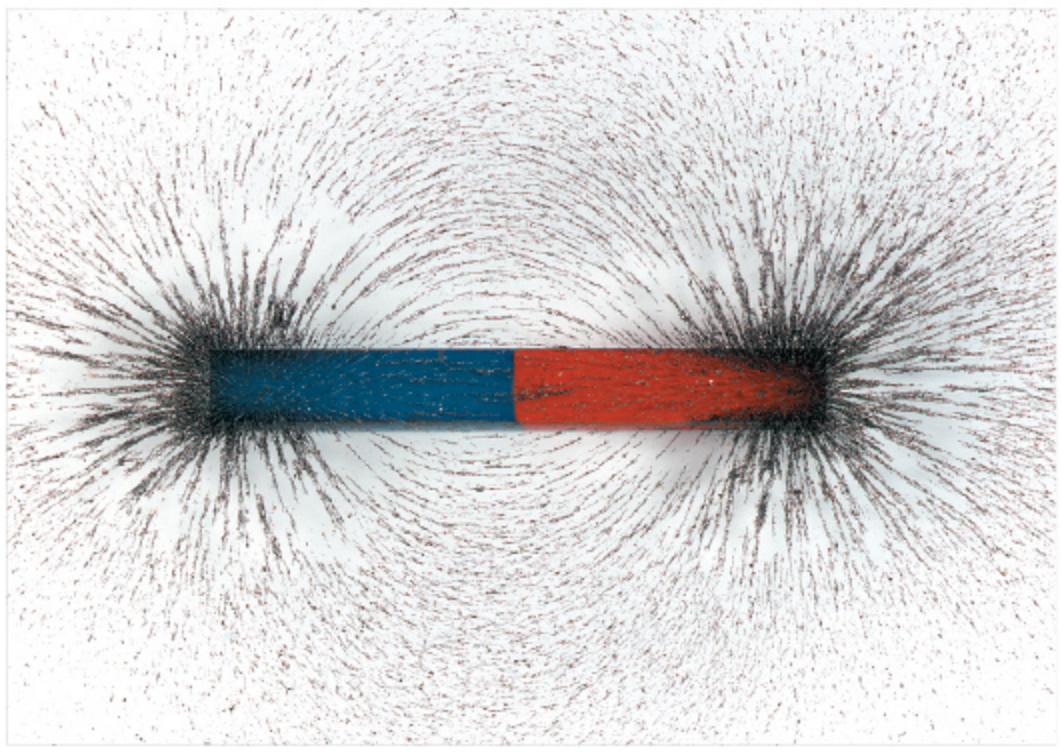

**Ryc. 14.3.** Jeśli podzielimy magnes na fragmenty, otrzymamy mniejsze magnesy. Nawet najmniejszy jego kawałek ma ciągle dwa bieguny

Zwykle ułożenie atomów w ciele stałym jest takie, że te „atomowe magnesy" są ustawione losowo. Jeśli jednak umieścimy ciało w polu magnetycznym, pole będzie wymuszać ustawienie atomowych magnesów zgodnie z liniami pola. W przypadku

* Kierunek wektora indukcji magnetycznej jest styczny do linii pola magnetycznego, a zwrot tego wektora jest zgodny z umownym zwrotem linii pola.




**Ryc. 14.4.** W polu magnetycznym żelazo (szary prostokąt) staje się magnesem



**Ryc. 14.5.** Pole magnetyczne magnesu zobrazowane za pomocą opiłków żelaza

materiałów nazywanych **ferromagnetykami** (należą do nich np. żelazo i niektóre jego stopy) nawet stosunkowo słabe pole magnetyczne tak porządkuje „atomowe magnesy", że wypadkowe pole magnetyczne pochodzące od wszystkich atomów jest silne. Oznacza to, że w zewnętrznym polu magnetycznym ferromagnetyk staje się magnesem. Wytworzone przez niego pole magnetyczne jest skierowane zgodnie z polem zewnętrznym. To dlatego magnes przyciąga kawałki żelaza (ryc. 14.4). Z tego też powodu opiłki żelaza w odpowiednio silnym polu magnetycznym układają się wzdłuż linii pola – każdy opiłek staje się malutką igłą magnetyczną (ryc. 14.5).

Ferromagnetyki „zapamiętują" namagnesowanie – w różnym stopniu, w zależności od składu chemicznego i budowy wewnętrznej. Po wyjęciu z zewnętrznego pola magnetycznego niektóre ferromagnetyki cały czas wytwarzają silne pole magnetyczne. W ten sposób powstały magnesy w skorupie ziemskiej (magnetyt) i tak samo wytwarza się magnesy trwałe.

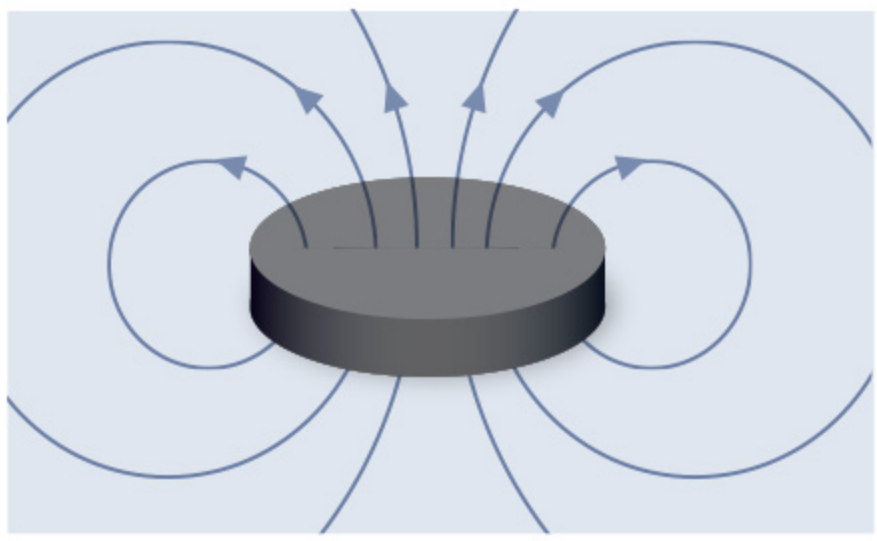
## PODSUMOWANIE

- Magnesy oddziałują ze sobą za pośrednictwem **pola magnetycznego**, którego są źródłem.
- **Linie pola magnetycznego** to linie, zgodnie z którymi ustawia się igła magnetyczna, a jej północny biegun wskazuje zwrot tych linii.
- **Ferromagnetyki** to materiały, które w polu magnetycznym silnie się magnesują.

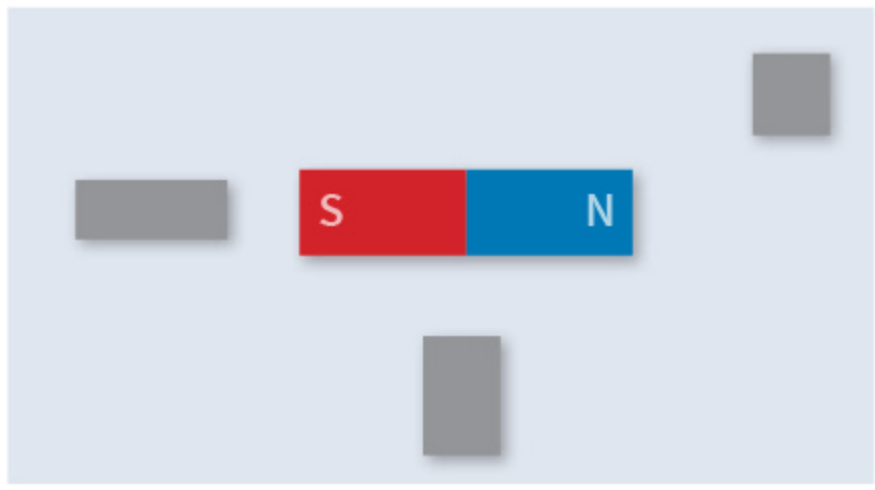
## PYTANIA I ZADANIA

**1.** W którą stronę skierowana jest igła kompasu trzymanego przez kobietę w wyciągniętej dłoni? Na zdjęciu słońce znajduje się nad zachodnim horyzontem.

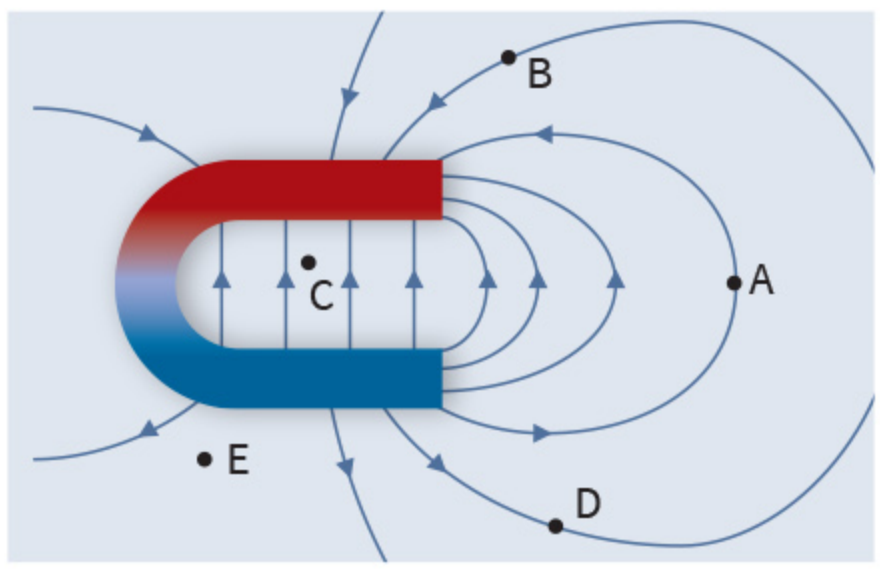
**2.** W niektórych głośnikach stosowane są magnesy takie jak na rysunku. Gdzie znajduje się biegun północny tego magnesu, a gdzie południowy? Strzałkami zaznaczono zwrot linii pola tego magnesu.



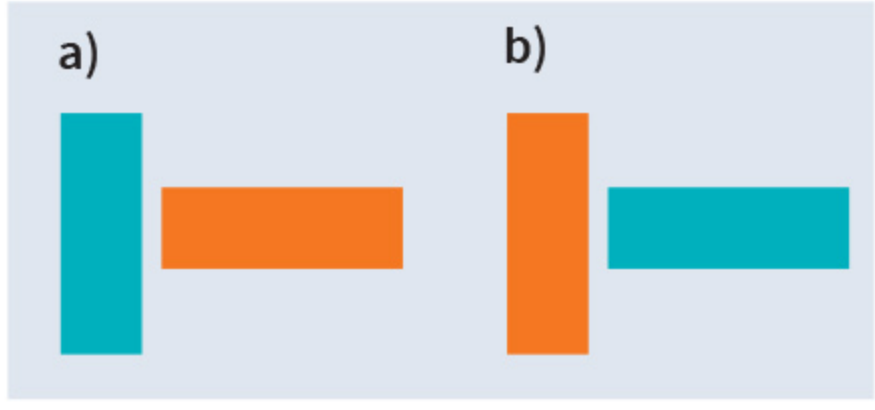
**3.** Na rysunku przedstawiono magnes i leżące obok niego kawałki żelaza. Przerysuj rysunek do zeszytu i zaznacz bieguny magnetyczne tych kawałków.




**4.** Na rysunku przedstawiono linie pola magnetycznego tzw. magnesu podkowiastego. Przerysuj rysunek do zeszytu i dorysuj na nim odpowiednio ustawione igły magnetyczne w punktach A, B, C, D i E.




**5.** Magnes i kawałek stali przyciągają się w ustawieniu pokazanym na rysunku a, natomiast w ustawieniu na rysunku b nie wykazują znaczącego oddziaływania. Jakim kolorem oznaczono magnes?



# 15. Pole magnetyczne prądu elektrycznego

- Pole magnetyczne prostoliniowego przewodu z prądem
- Pole magnetyczne zwojnicy z prądem
- Elektromagnes

➔ **Przypomnij sobie**, co to jest prąd elektryczny i natężenie prądu oraz jak opisuje się pole magnetyczne.

**Ryc. 15.1.** Opiłki żelaza ustawiają się zgodnie z liniami pola magnetycznego, którego źródłem jest prąd elektryczny płynący w przewodzie. Przewód jest prostopadły do płaszczyzny, na której leżą opiłki

Nie tylko magnesy wytwarzają pole magnetyczne. Źródłem pola może być również prąd elektryczny. I właśnie dzięki niemu możemy otrzymać bardzo silne, stałe lub zmienne pola magnetyczne. Takie pola wykorzystuje się w wielu dziedzinach życia: gospodarce, nauce i medycynie.

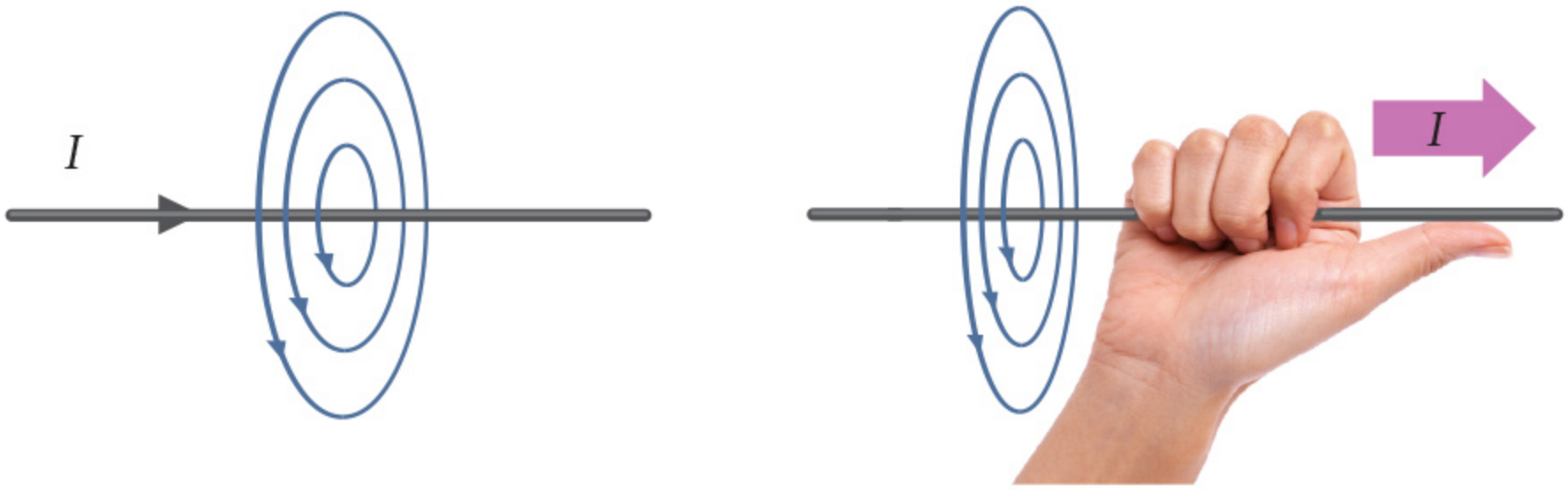
## Prostoliniowy przewód z prądem

Przewód z prądem wytwarza wokół siebie pole magnetyczne tym silniejsze, im większe jest natężenie prądu. Linie pola magnetycznego prostoliniowego przewodu z prądem mają kształt okręgów leżących w płaszczyźnie prostopadłej do przewodu. Środkiem tych okręgów jest punkt, przez który przechodzi przewód (ryc. 15.1). Gdy oddalamy się od przewodu, pole słabnie (indukcja magnetyczna maleje).

**DOŚWIADCZENIE 1.**

Ustaw przewód poziomo na linii północ–południe. Pod przewodem, w odległości kilku centymetrów od niego, umieść kompas. Końce przewodu podłącz na krótko do baterii płaskiej (chwilowe zwarcie baterii nie jest niebezpieczne). Jakie będzie ustawienie igły kompasu, gdy przez przewód popłynie prąd? Doświadczenie powtórz dla kompasu umieszczonego nad przewodem.

Kierunek prądu i zwrot linii pola są względem siebie prawoskrętne – to znaczy, że gdy patrzymy w kierunku przepływu prądu, to linie pola „kręcą się” zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Aby ustalić zwrot linii pola magnetycznego, można posłużyć się prawą ręką w sposób przedstawiony na rycinie 15.2. Gdy obejmiemy przewód prawą dłonią, tak że kciuk pokaże kierunek przepływu prądu, to pozostałe palce pokażą zwrot linii pola.




**Ryc. 15.2.** Linie pola magnetycznego wokół prostoliniowego przewodu z prądem. Zwrot linii pola można ustalić za pomocą prawej dłoni

## WARTO WIEDZIEĆ

**Indukcja pola prostoliniowego przewodu z prądem**

Indukcję pola magnetycznego w punktach leżących w odległości *r* od długiego prostoliniowego przewodu z prądem można obliczyć ze wzoru:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

gdzie:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{T \cdot m}}{\mathrm{A}}$ – tzw. przenikalność magnetyczna próżni,

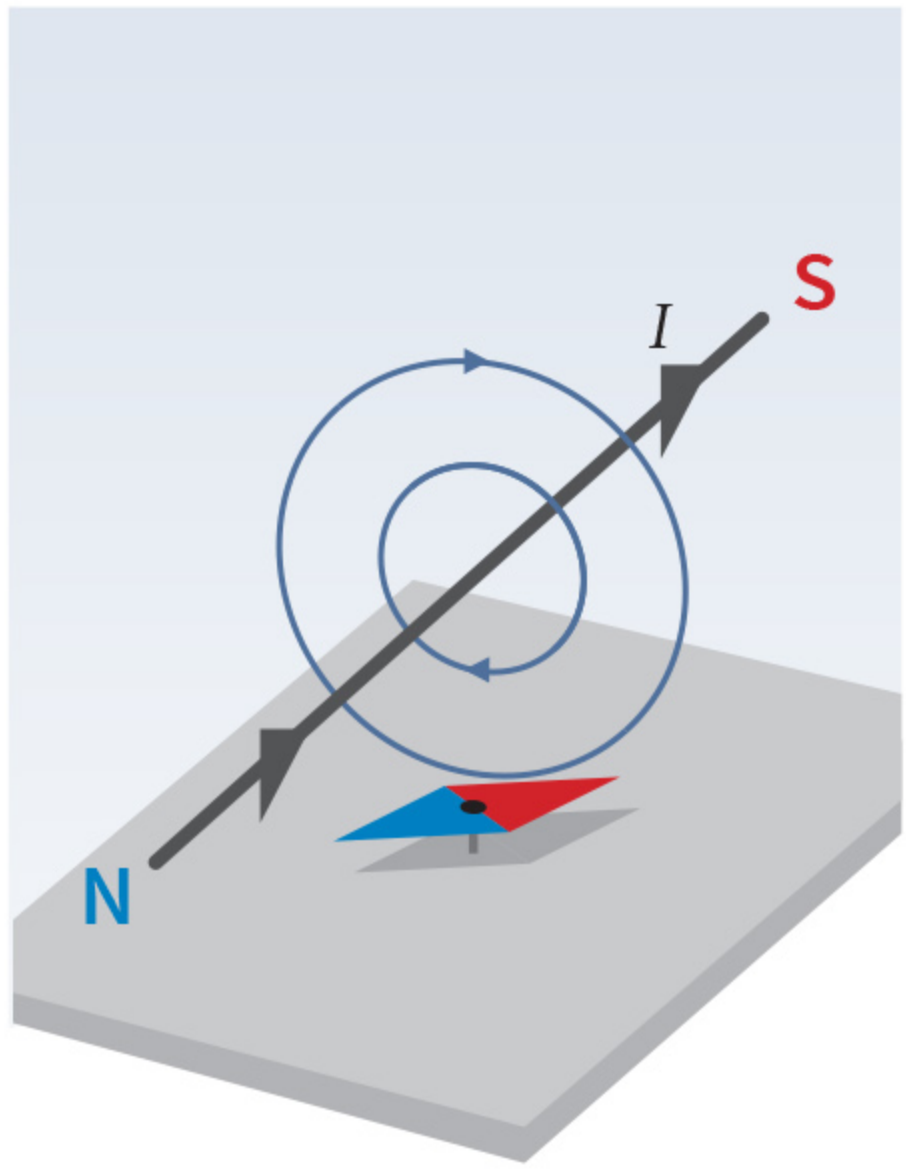
*I* – natężenie prądu.

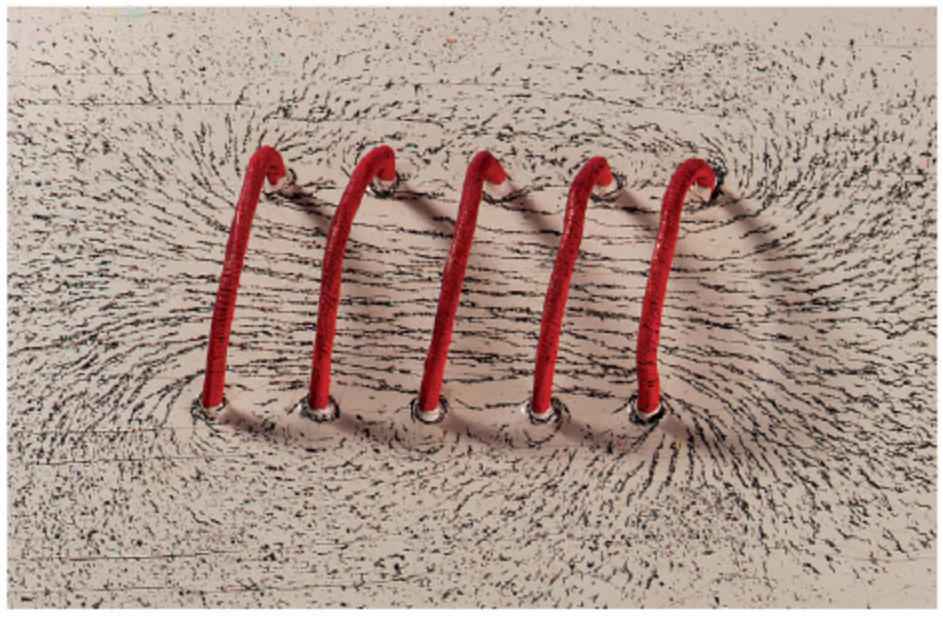
Wzór ten stosujemy dla punktów leżących w pobliżu środka długości prostoliniowego przewodu, gdy długość przewodu jest znacznie większa od odległości *r* od niego.

**PRZYKŁAD 1.**

Długi prostoliniowy przewód, w którym płynie prąd elektryczny, ustawiony jest na linii północ–południe. Igła kompasu ustawionego pod przewodem jest odchylona o 45° na wschód od kierunku północnego. W którą stronę płynie prąd w przewodzie?

Igła kompasu ustawia się wzdłuż linii wypadkowego pola magnetycznego Ziemi i przewodu z prądem. Przewód jest ustawiony wzdłuż linii ziemskiego pola magnetycznego, natomiast linie pola, którego źródłem jest prąd płynący w przewodzie, tworzą wokół niego okręgi. Igła kompasu ustawionego pod przewodem z prądem odchyla się na wschód, więc w dolnej części okręgów linie muszą być skierowane w stronę wschodnią. Jeśli prawą rękę ustawimy tak, by cztery palce pokazywały nam zwrot tych linii, to kciuk wskaże nam kierunek przepływu prądu, czyli w tym wypadku kierunek południowy (ryc.).



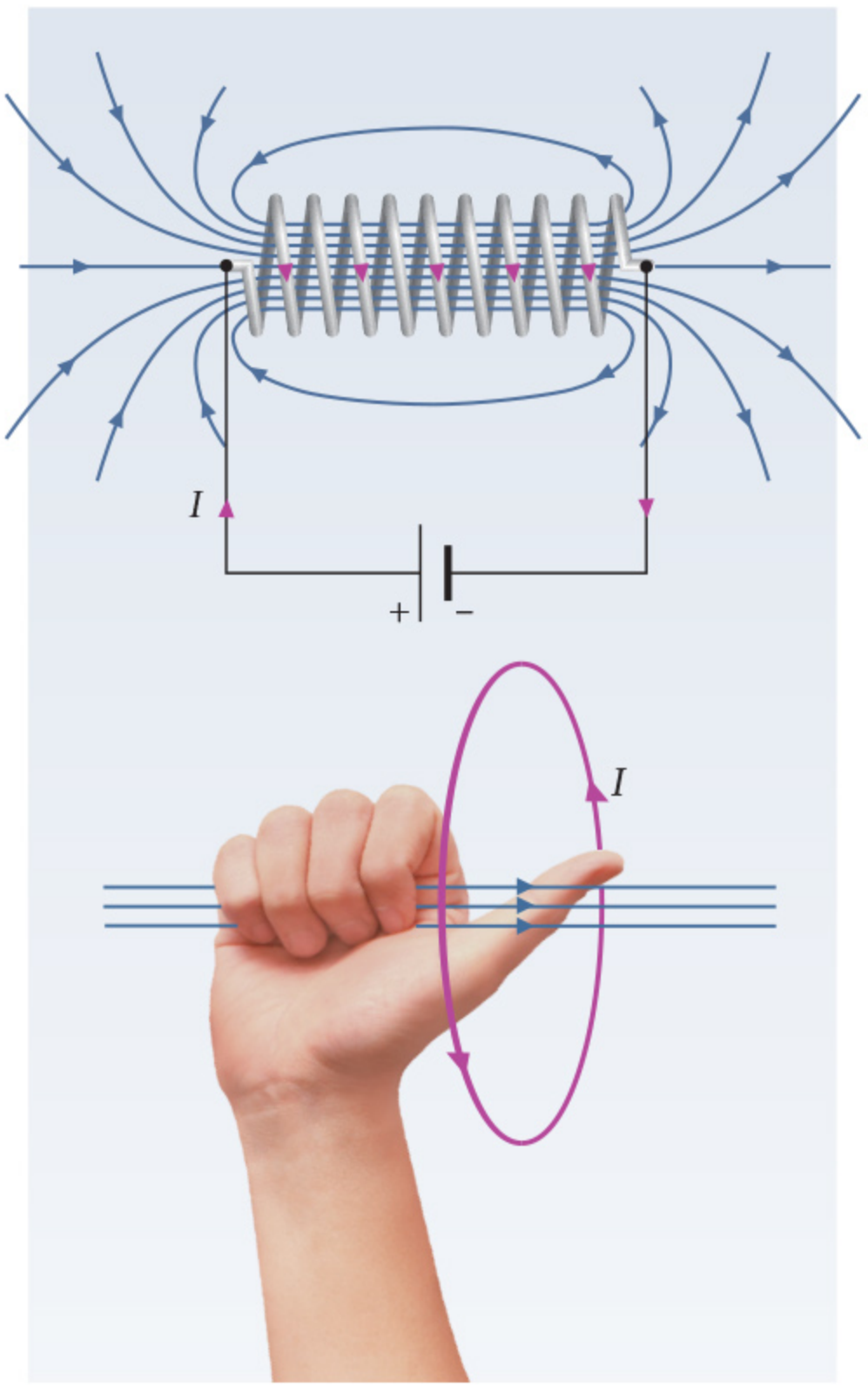


**Ryc. 15.3.** Pole magnetyczne zwojnicy z prądem, zobrazowane za pomocą opiłków żelaza

## Pole magnetyczne zwojnicy

Jeden przewód nawinięty wielokrotnie na walec tworzy zwojnicę (inaczej cewkę). Składa się ona z wielu równoległych do siebie zwojów. Gdy w przewodzie pojawia się prąd elektryczny, zwojnica staje się źródłem pola magnetycznego (ryc. 15.3).

Gdy średnica cewki jest zdecydowanie mniejsza niż jej długość, to w jej wnętrzu linie pola biegną równolegle do osi cewki (ryc. 15.3). Również w tym przypadku linie pola magnetycznego i prąd są względem siebie prawoskrętne. Gdy patrzymy na cewkę tak, że kierunek prądu jest zgodny z ruchem wskazówek zegara, to linie pola magnetycznego wewnątrz zwojnicy są skierowane od patrzącego. Lub inaczej: gdy ułożymy prawą dłoń tak, by cztery palce wskazywały kierunek przepływu prądu elektrycznego, to odchylony kciuk wskaże zwrot linii pola magnetycznego wewnątrz zwojnicy (ryc. 15.4).




**Ryc. 15.4.** Kierunek linii pola magnetycznego wewnątrz zwojnicy i kierunek prądu są względem siebie prawoskrętne

Pole magnetyczne na zewnątrz długiej i gęsto nawiniętej zwojnicy przypomina pole magnesu sztabkowego. Podobnie biegną też linie pola wewnątrz magnesu i zwojnicy z prądem, chociaż w przypadku magnesu nie mamy możliwości bezpośredniego ich zaobserwowania.

Pole magnetyczne zwojnicy wytwarzają elektrony płynące w zwiniętym przewodzie, natomiast pole magnesu wytwarzają elektrony krążące wokół jąder atomowych. Mechanizm powstawania pola magnetycznego w zwojnicach i magnesach jest podobny.

Źródłem pola magnetycznego są poruszające się cząstki naładowane.

Podobieństwo pola magnetycznego magnesu i zwojnicy uwidacznia jeszcze jedną jego cechę. **Linie pola magnetycznego nie mają żadnego początku ani końca, zawsze tworzą zamknięte pętle**. To je różni od linii pola elektrycznego, które kończą się lub zaczynają na ładunkach elektrycznych.

Czym są zatem bieguny magnetyczne? To pojęcie wprowadzono w czasach, gdy uczeni nie wiedzieli nic o właściwościach pola magnetycznego. Funkcjonuje ono do dziś tylko dlatego, że ułatwia zarówno opisywanie oddziaływania między magnesami, jak i jakościowy opis pól magnetycznych.

## Elektromagnes

Zwojnice mogą być źródłem silnych pól magnetycznych. W każdym zwoju cewki prąd płynie w tę samą stronę, więc pola magnetyczne pochodzące od poszczególnych zwojów nakładają się i dają w sumie pole tym silniejsze, im więcej jest zwojów. Pole magnetyczne zwojnicy zależy również od natężenia prądu.

Aby uzyskać silne pole magnetyczne, we wnętrzu cewki należy umieścić stalowy rdzeń. Pod wpływem pola magnetycznego zwojnicy rdzeń staje się silnym magnesem i jego pole magnetyczne wzmacnia pole magnetyczne prądu. Pole wokół zwojnicy z rdzeniem jest znacznie silniejsze od pola zwojnicy bez rdzenia przy tym samym natężeniu prądu.

Cewki konstruowane w celu wytworzenie pola magnetycznego to **elektromagnesy**. Przez zmianę natężenia prądu możemy regulować pole magnetyczne, zmieniać jego biegunowość, włączać i wyłączać. Elektromagnesy znalazły rozliczne zastosowania, np. odblokowują drzwi w samochodzie, gdy naciśniemy przycisk pilota, wprawiają w ruch młoteczek w dzwonkach elektrycznych, są źródłem pola magnetycznego w silnikach elektrycznych (ryc. 15.5).

**Ryc. 15.5.** Chwytaki elektromagnetyczne na złomowisku, dzwonek elektryczny i zamek elektromagnetyczny to tylko niektóre zastosowania elektromagnesów

## WARTO WIEDZIEĆ

**Elektromagnesy nadprzewodnikowe**

Nadprzewodniki umożliwiają przepływ prądu o bardzo dużym natężeniu bez nagrzewania się przewodów, dlatego stosuje się je w laboratoriach badawczych do budowy silnych elektromagnesów. Przewody wykonane z nadprzewodnika mogą mieć niewielką średnicę, więc elektromagnes może mieć dużą liczbę zwojów, dzięki czemu wytwarza silne pole. Ze względu na właściwości nadprzewodzące zwojów taki elektromagnes wymaga niskiej temperatury.

Elektromagnes nadprzewodnikowy z Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu (fot. a), który wytwarza pole magnetyczne o indukcji 14 T, wymaga zasilania prądem 120 A. Tradycyjny elektromagnes z tego instytutu (fot. b) wymaga przewodów o znacznie większej średnicy, a zatem ma znacznie mniej zwojów. Aby ten elektromagnes mógł wytworzyć pole o indukcji 14 T, powinien przez niego płynąć prąd o natężeniu 12 000 A! Tak duże natężenie prądu powoduje silne nagrzewanie się przewodów, które podczas pracy muszą być chłodzone. Pionowe rury widoczne na zdjęciu doprowadzają wodę chłodzącą elektromagnes. Prądnice wytwarzające prąd stały o takim natężeniu zajmują dużą halę (fot. c).

a)

b)

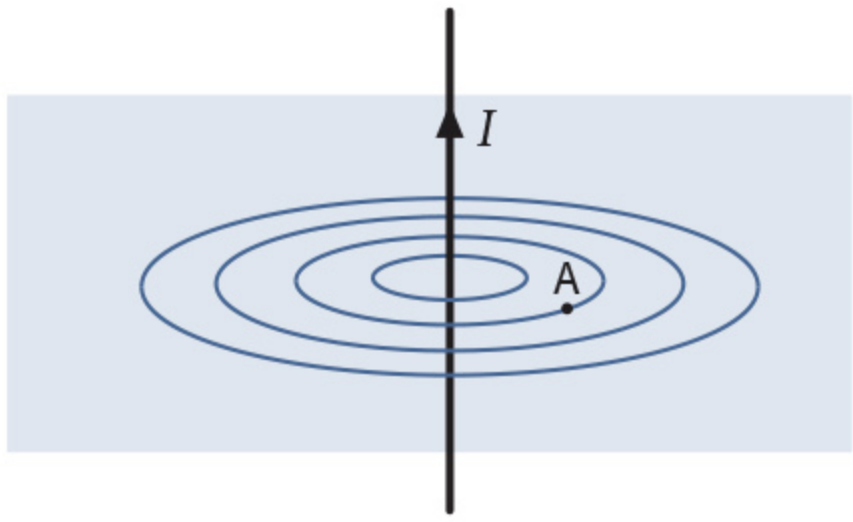
c)

## PODSUMOWANIE

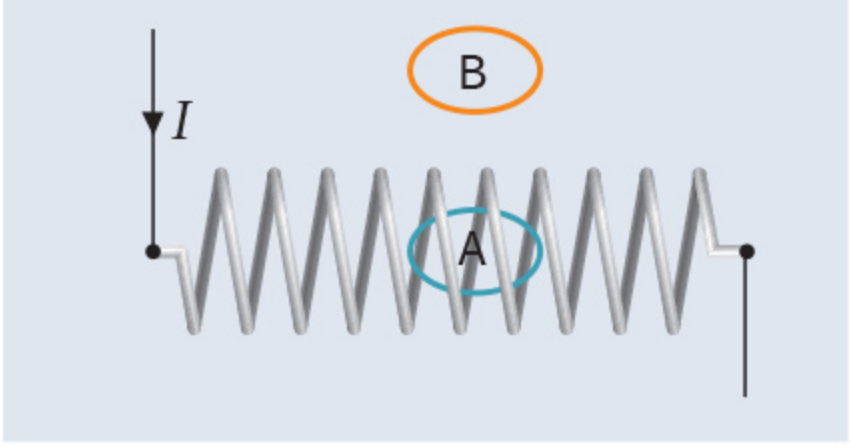
- Prąd elektryczny jest źródłem pola magnetycznego.
- Zwrot linii pola magnetycznego i kierunek prądu są względem siebie **prawoskrętne**.
- Linie pola magnetycznego **prostoliniowego przewodu** z prądem elektrycznym tworzą okręgi wokół przewodu.
- Pole magnetyczne **zwojnicy** jest podobne do pola magnesu sztabkowego.
- Linie pola magnetycznego nie mają początku ani końca, zawsze tworzą zamknięte pętle.

## PYTANIA I ZADANIA

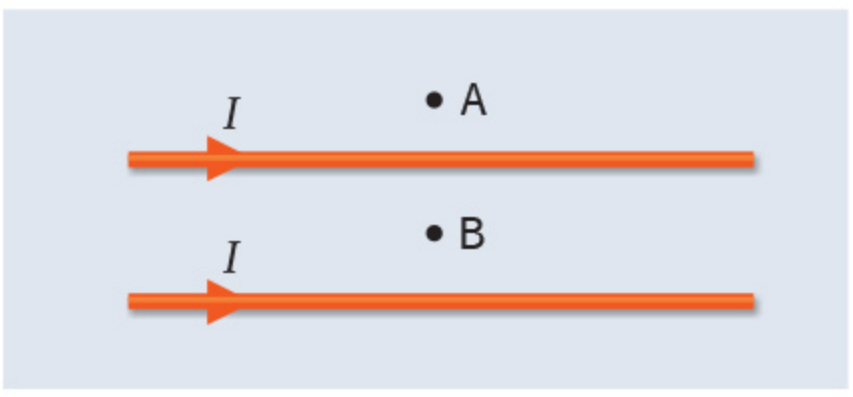
**1.** Jaki będzie zwrot linii pola magnetycznego w punkcie A? Prąd w przewodzie płynie w górę.



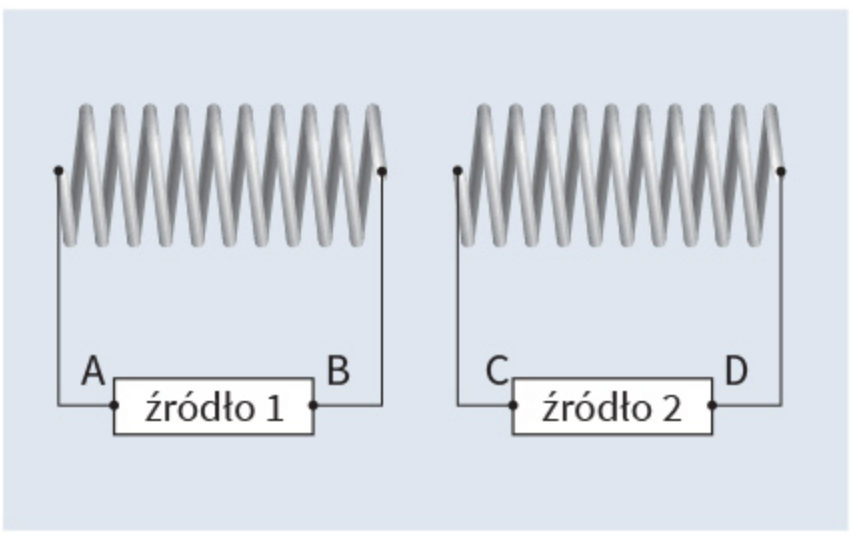

**2.** Jak ustawi się igła kompasu w obszarze A, a jak w obszarze B? W zwojnicy prąd płynie jak na rysunku.



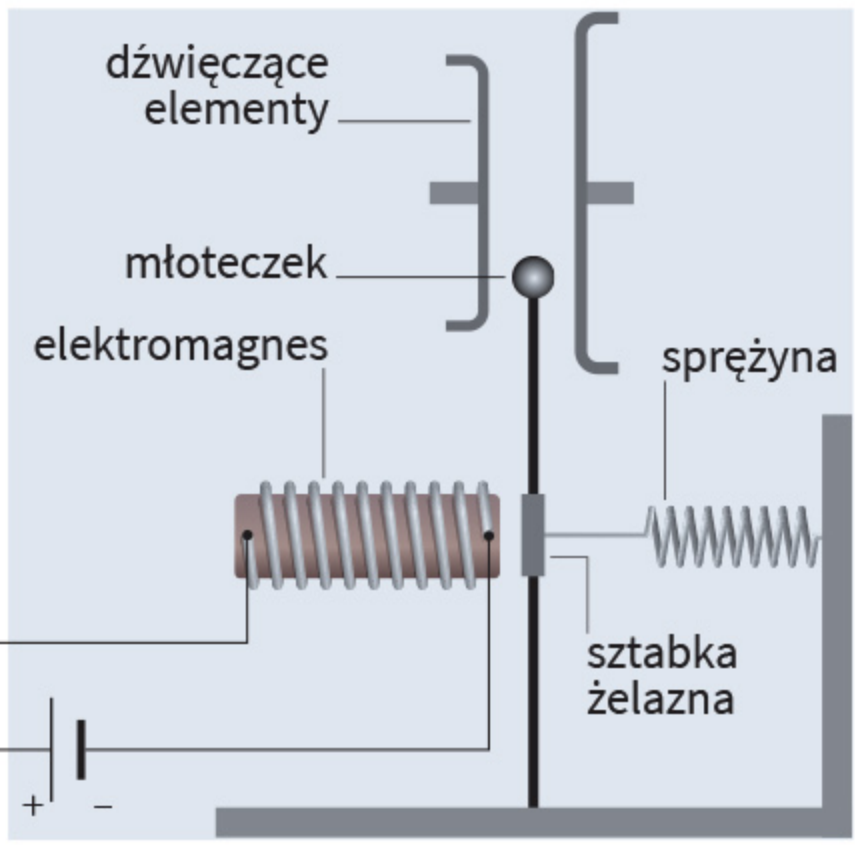

**3.** Czy linie pola wytwarzanego przez dwa równoległe przewody z prądem mają w punktach A i B zwroty zgodne, czy przeciwne?

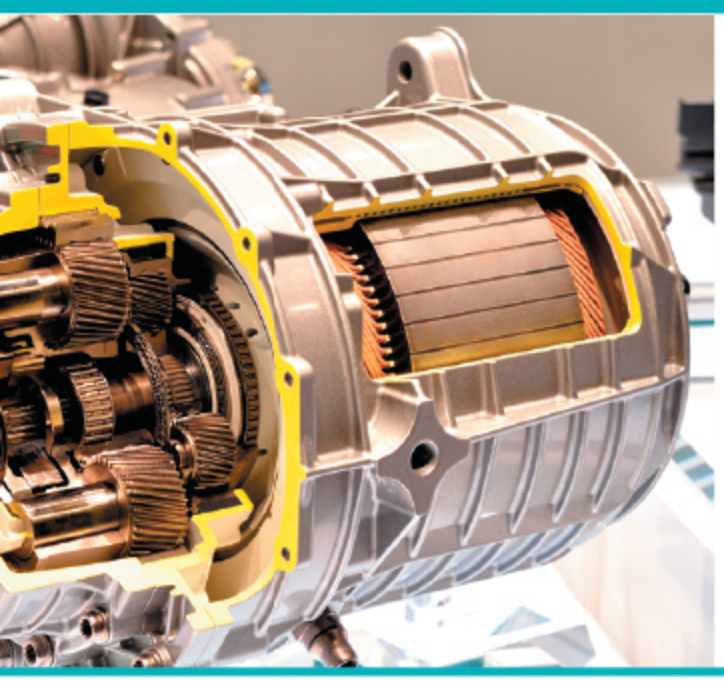



**4.** W których punktach (A, B, C, D) powinien być biegun dodatni jednego i drugiego źródła napięcia, aby cewki przedstawione na rysunku się przyciągały? Zadanie ma dwa rozwiązania. Wskazówka: pole magnetyczne zwojnicy jest podobne do pola magnesu sztabkowego.




**5.** Rysunek przedstawia schemat gongu elektrycznego stosowanego przy drzwiach wejściowych do mieszkań. Omów jego działanie.





# 16. Przewód z prądem w polu magnetycznym

- Siła elektrodynamiczna
- Silnik elektryczny

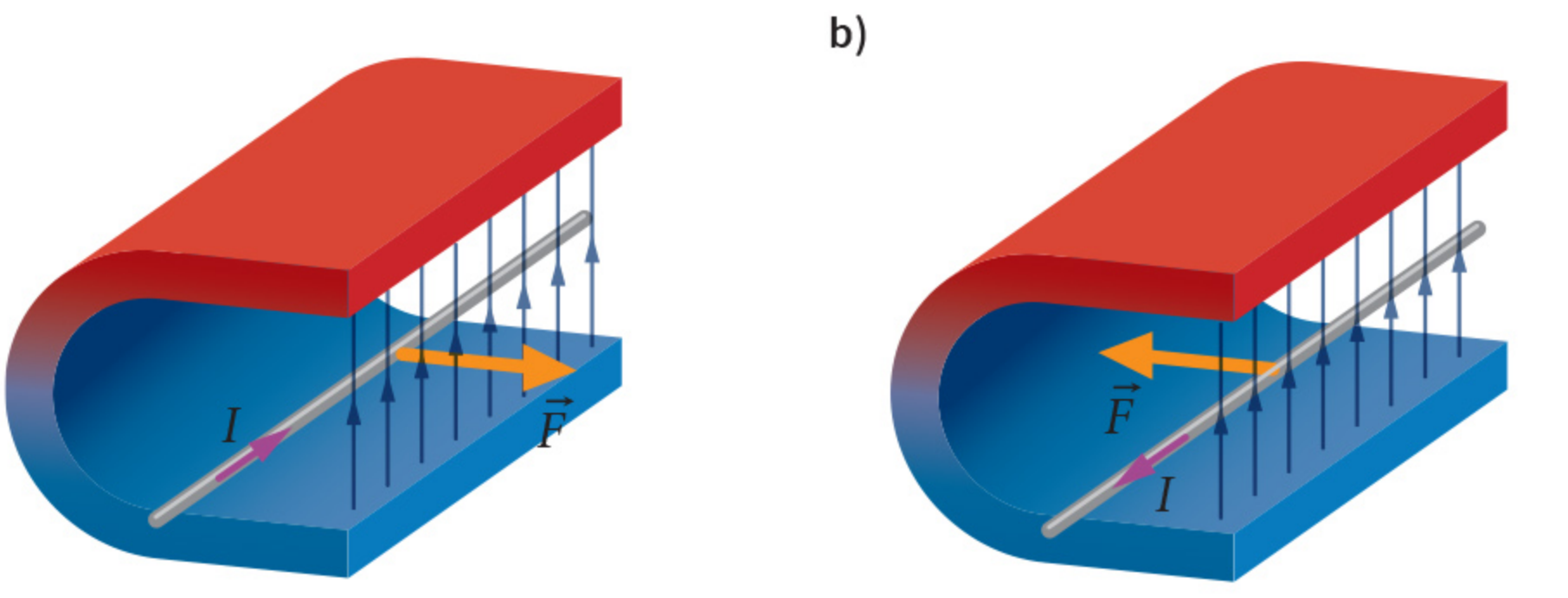
➔ **Przypomnij sobie**, co to jest indukcja magnetyczna oraz jak biegną linie pola magnetycznego wytwarzanego przez prostoliniowy przewód z prądem elektrycznym.

Dwa magnesy oddziałują ze sobą za pośrednictwem pola magnetycznego. Przewody z prądem również są źródłem pola magnetycznego, więc też oddziałują magnetycznie. Te oddziaływania są podstawą działania silników elektrycznych, zarówno miniaturowych (napędzających dyski w komputerach), jak i potężnych (stosowanych w lokomotywach elektrycznych).

## Przewód z prądem w polu magnetycznym

Oddziaływanie pola magnetycznego na prostoliniowy przewód z prądem zależy od ułożenia przewodu w stosunku do linii tego pola. Gdy przewód jest do nich równoległy – oddziaływania nie ma. Pole magnetyczne działa na przewód siłą magnetyczną dopiero wówczas, gdy tworzy on jakiś niezerowy kąt z liniami pola. Ta siła jest największa, gdy przewód jest prostopadły do linii pola.

Na rycinie 16.1 widnieje przewód z prądem ustawiony prostopadle do linii pola magnetycznego. Siła magnetyczna jest zawsze prostopadła zarówno do przewodnika, jak i do linii pola magnetycznego. Zwrot siły zależy od zwrotu linii pola magnetycznego oraz od tego, w którą stronę płynie prąd. Gdy zmieni się zwrot linii pola lub kierunek prądu,




**Ryc. 16.1.** Prostoliniowy przewód z prądem w polu magnetycznym, ustawiony prostopadle do linii pola. Zwrot siły zależy od zwrotu linii pola i kierunku prądu

zmieni się także zwrot siły. Siłę magnetyczną działającą na przewód z prądem nazywa się **siłą elektrodynamiczną**.

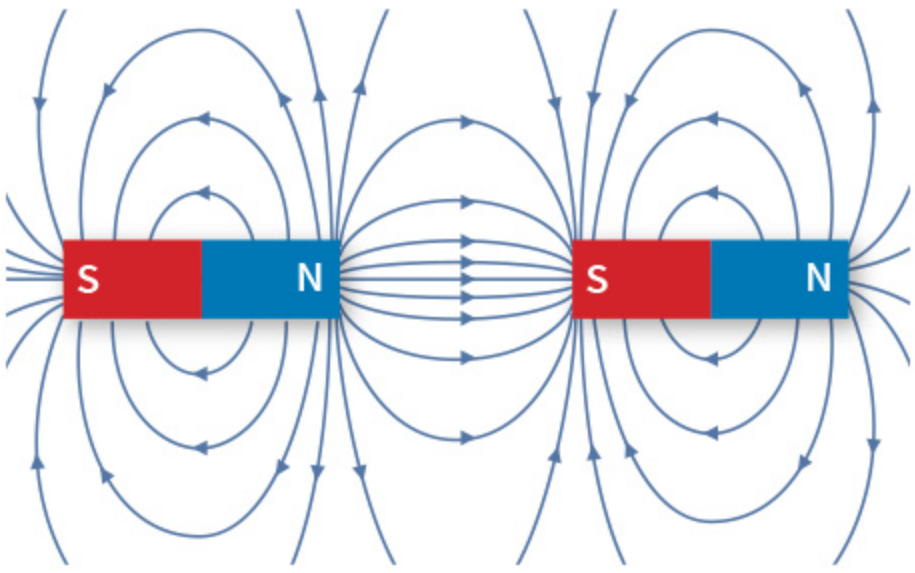
Na przewód z prądem umieszczony nierównolegle do linii pola magnetycznego działa siła elektrodynamiczna prostopadła do przewodu i do linii tego pola.

## WARTO WIEDZIEĆ

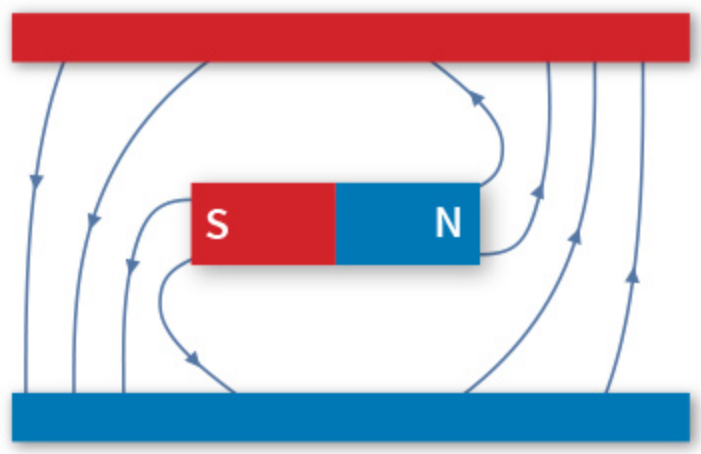
### Siła magnetyczna a linie pola

Pole magnetyczne ma energię, podobnie jak pole elektryczne. Możemy sobie wyobrazić linie pola jako długie rozciągnięte gumki lub sprężynki. Pole działa na magnesy i przewodniki z prądem taką siłą, by te „sprężynki" jak najbardziej się skróciły i w ten sposób zmniejszyły swoją energię. Na przykład dwa magnesy przyciągają się przeciwnymi biegunami (ryc. a). W miarę jak zbliżają się do siebie, skracają się linie pola między nimi, więc energia pola magnetycznego maleje. Z tych samych powodów magnesy ustawiają się wzdłuż linii pola. Obrót magnesu powoduje skrócenie linii pola magnetycznego (ryc. b).

a)

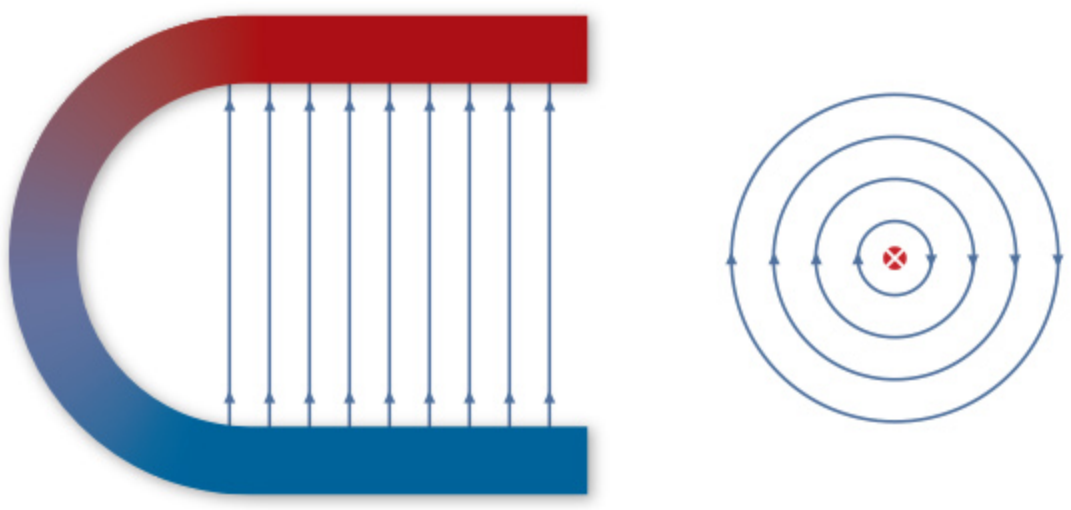



b)

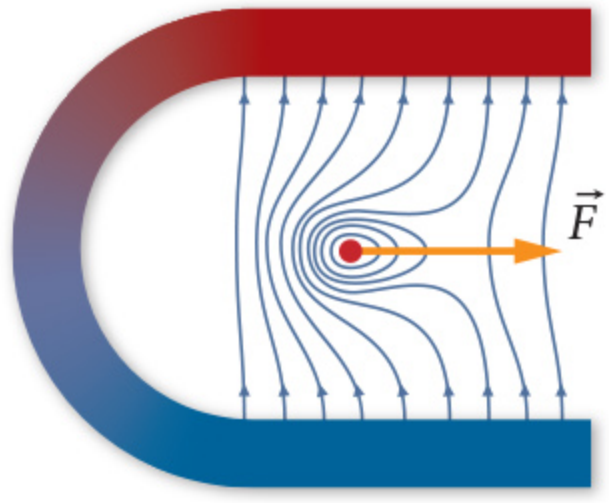


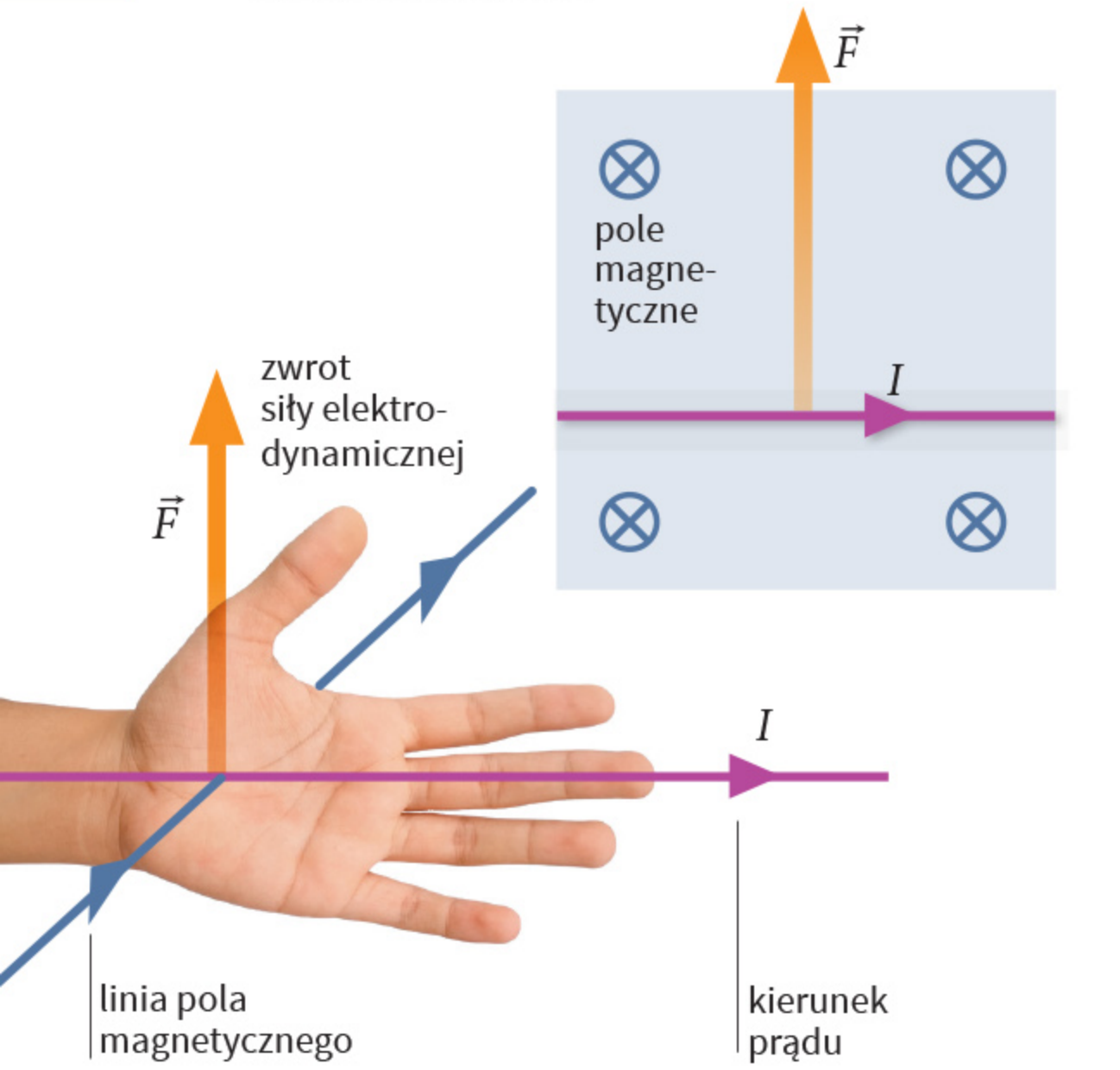

Ten model pola magnetycznego działa również w przypadku przewodu z prądem. Pole magnetyczne w pobliżu przewodu umieszczonego w zewnętrznym polu jest złożeniem pola magnesu i pola pochodzącego od samego przewodu (ryc. c). Linie wypadkowego pola są bardzo wygięte z lewej strony przewodu (ryc. d). Ponieważ „chcą" się rozprostować i skrócić, pchają przewód w prawo.

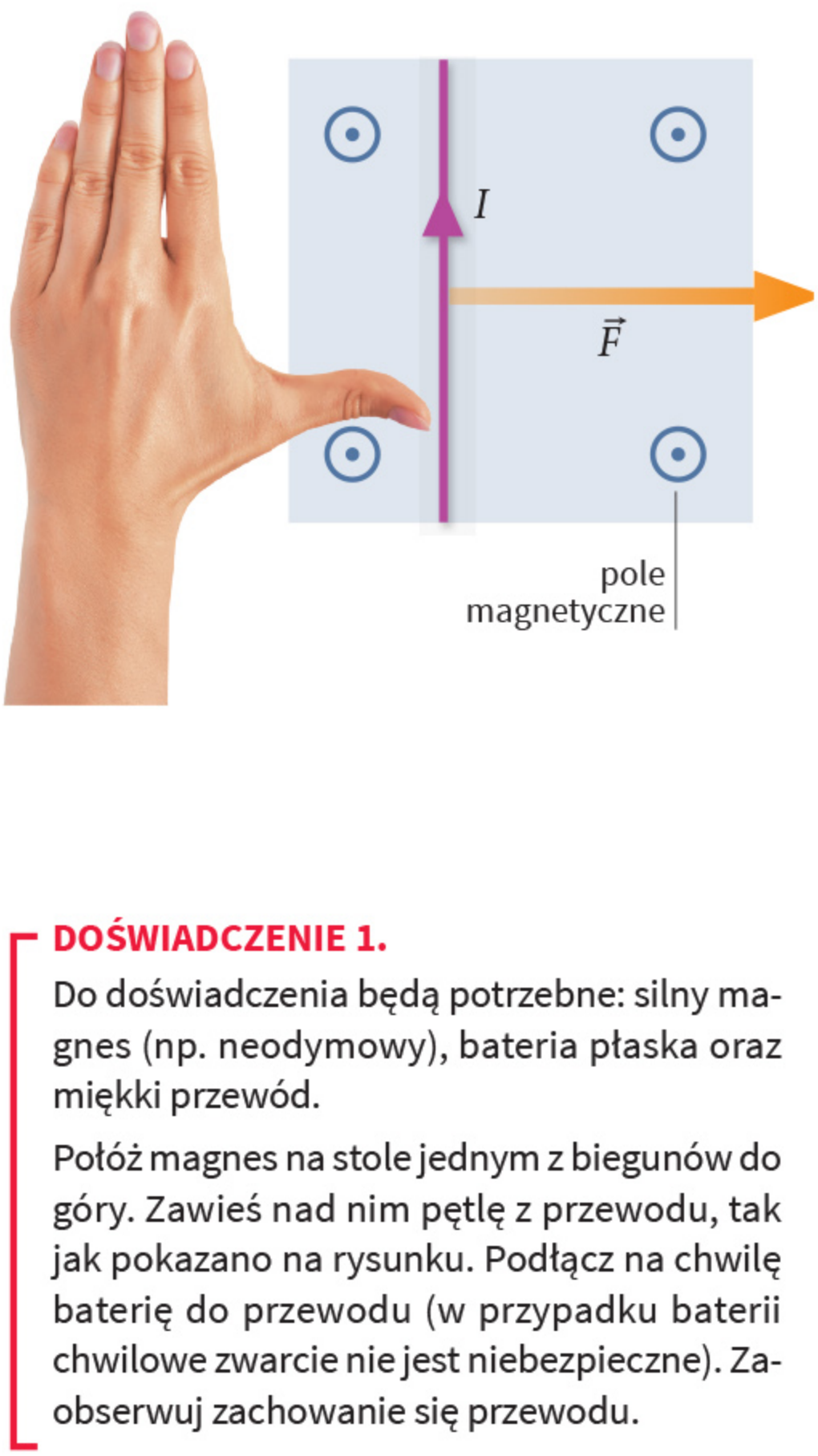
c)



d)






Zwrot siły elektrodynamicznej można wyznaczyć za pomocą lewej dłoni. Należy dłoń ustawić tak, aby linie pola „wchodziły" do jej wnętrza, a cztery wyciągnięte palce wskazywały kierunek prądu. Wówczas odchylony kciuk wskaże zwrot siły (ryc. 16.2). Jeżeli niemożliwe jest takie ustawienie dłoni (bo linie pola są równoległe do przewodu), oznacza to, że siła nie działa.

Kierunek siły elektrodynamicznej jest zawsze prostopadły zarówno do przewodu, jak i linii pola magnetycznego.

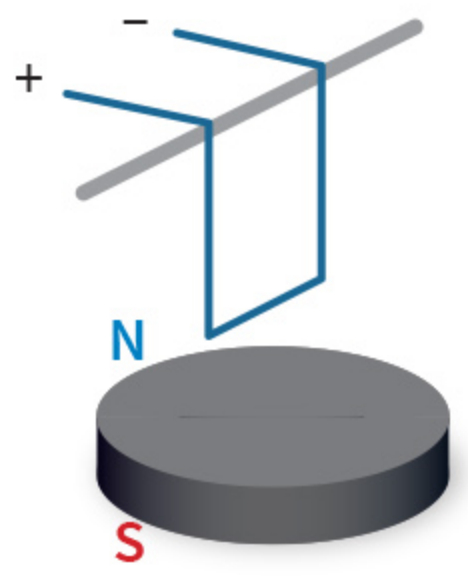
Aby zaznaczać na rysunkach linie pola prostopadłe do płaszczyzny kartki, wprowadzono specjalne oznaczenia: krzyżyk w kółku oznacza, że linie pola mają zwrot za kartkę, a kropka w kółku – że mają zwrot przed kartkę. Tak samo oznaczamy zwrot każdego wektora (np. prędkości, siły) lub kierunek przepływu prądu, jeśli na rysunku jest on prostopadły do płaszczyzny kartki.

**Ryc. 16.2.** Za pomocą lewej dłoni możemy wyznaczyć zwrot siły działającej na przewód z prądem, umieszczony w polu magnetycznym

**DOŚWIADCZENIE 1.**

Do doświadczenia będą potrzebne: silny magnes (np. neodymowy), bateria płaska oraz miękki przewód.

Połóż magnes na stole jednym z biegunów do góry. Zawieś nad nim pętlę z przewodu, tak jak pokazano na rysunku. Podłącz na chwilę baterię do przewodu (w przypadku baterii chwilowe zwarcie nie jest niebezpieczne). Zaobserwuj zachowanie się przewodu.



Wartość siły elektrodynamicznej działającej na przewód z prądem ustawiony prostopadle do linii zewnętrznego pola magnetycznego obliczamy ze wzoru:

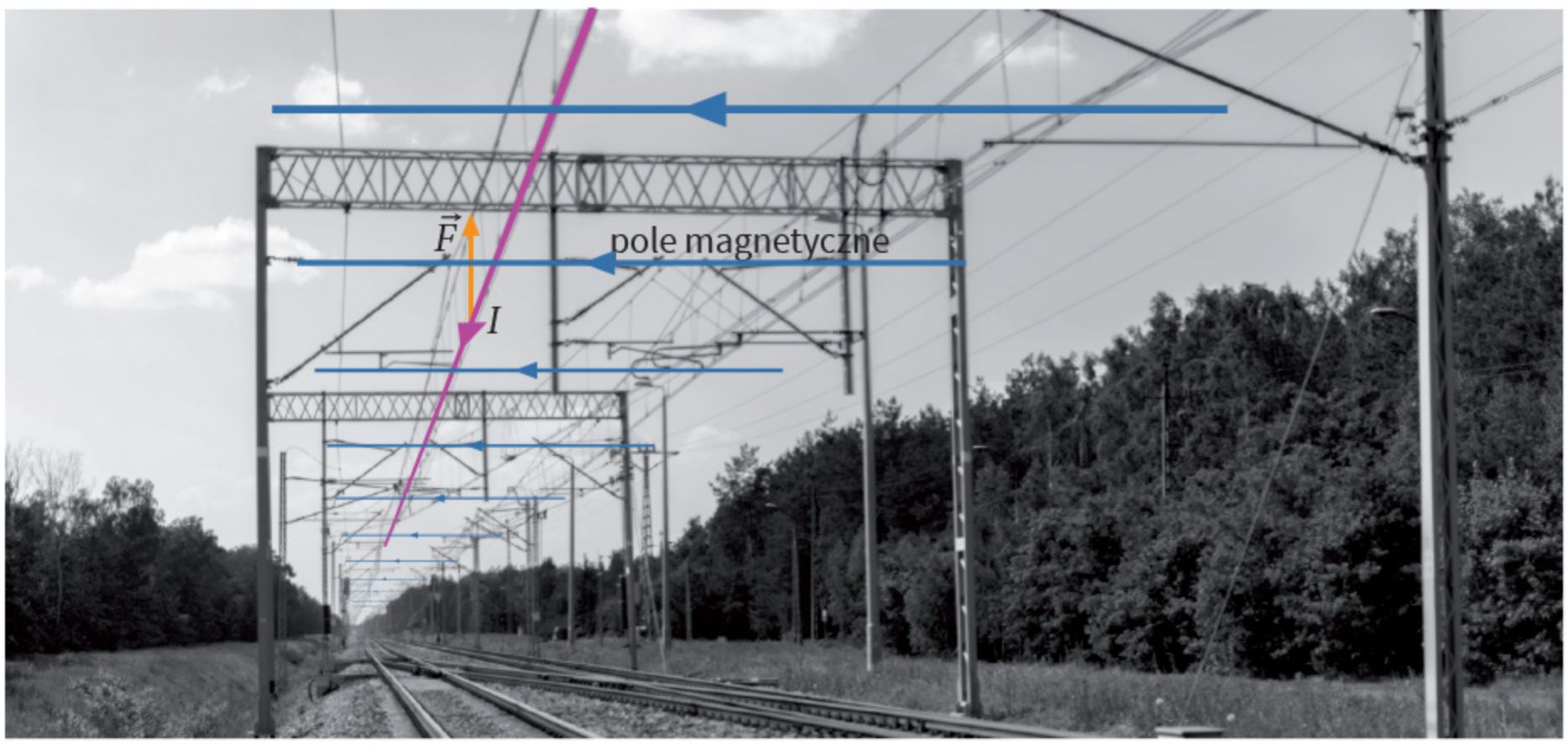
$$F = BIl \tag{1}$$

gdzie:
$B$ – indukcja magnetyczna, $I$ – natężenie prądu, $l$ – długość tej części przewodu, która znajduje się w zewnętrznym polu magnetycznym.

**PRZYKŁAD 1.**

Obliczmy maksymalną siłę, którą ziemskie pole magnetyczne może działać na każdy metr kolejowej sieci trakcyjnej. Przyjmijmy, że w przewodzie płynie prąd o natężeniu 200 A, a indukcja ziemskiego pola magnetycznego wynosi $3 \cdot 10^{-5}$ T.

Najpierw ustalmy, jaki będzie zwrot tej siły przy założeniu, że prąd płynie na wschód (czyli na zdjęciu za płaszczyznę kartki), a linie pola magnetycznego są poziome (przy tym założeniu siła będzie maksymalna). Zwrot siły wyznaczymy za pomocą lewej dłoni. Północ jest po lewej stronie zdjęcia. Linie pola ziemskiego są zatem skierowane w lewo, więc siła działa w górę.



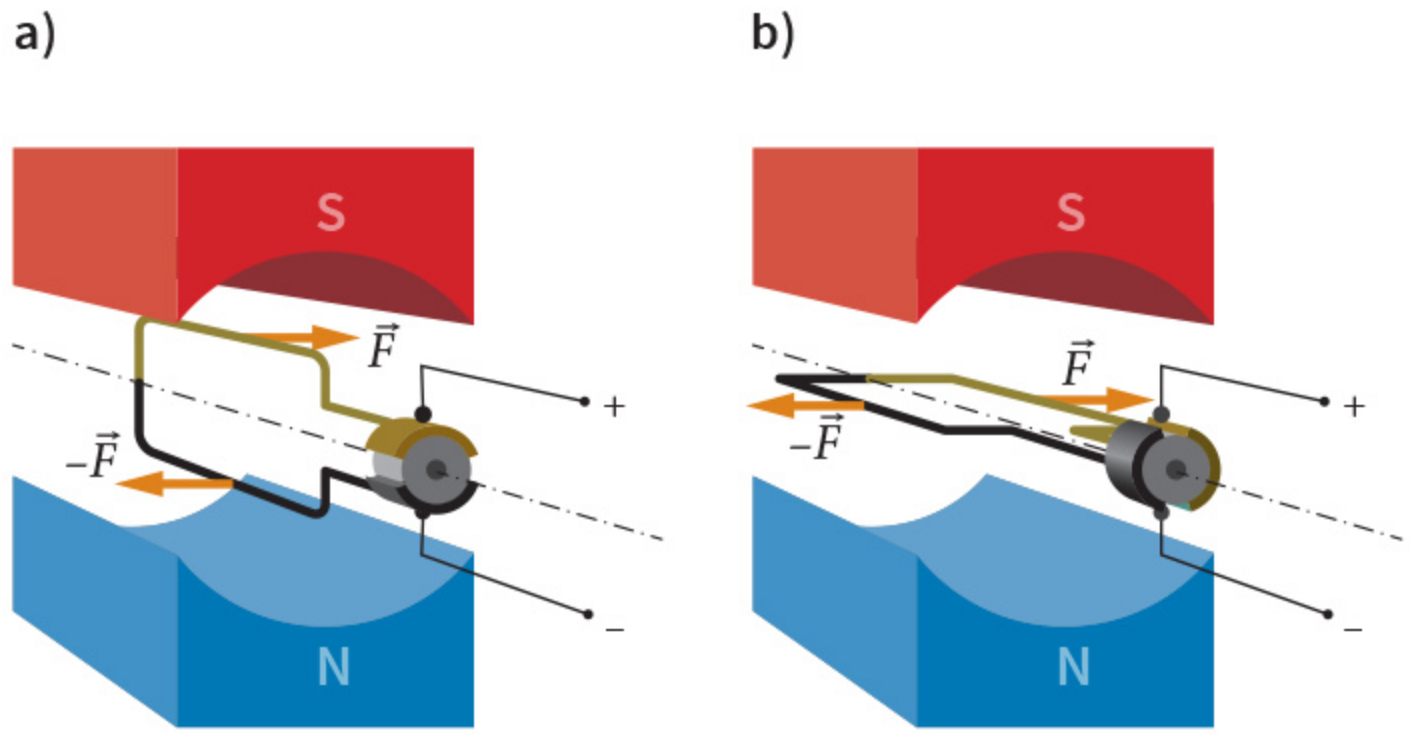

Siłę magnetyczną obliczymy ze wzoru (1):

$$F = BIl = 200\ \text{A} \cdot 1\ \text{m} \cdot 3 \cdot 10^{-5}\ \text{T} = 0{,}006\ \text{N}$$

Siła, jaką ziemskie pole magnetyczne działa na przewody, jest dużo mniejsza od ich ciężaru, dlatego też nie obserwujemy unoszenia się przewodów pod działaniem tego pola.

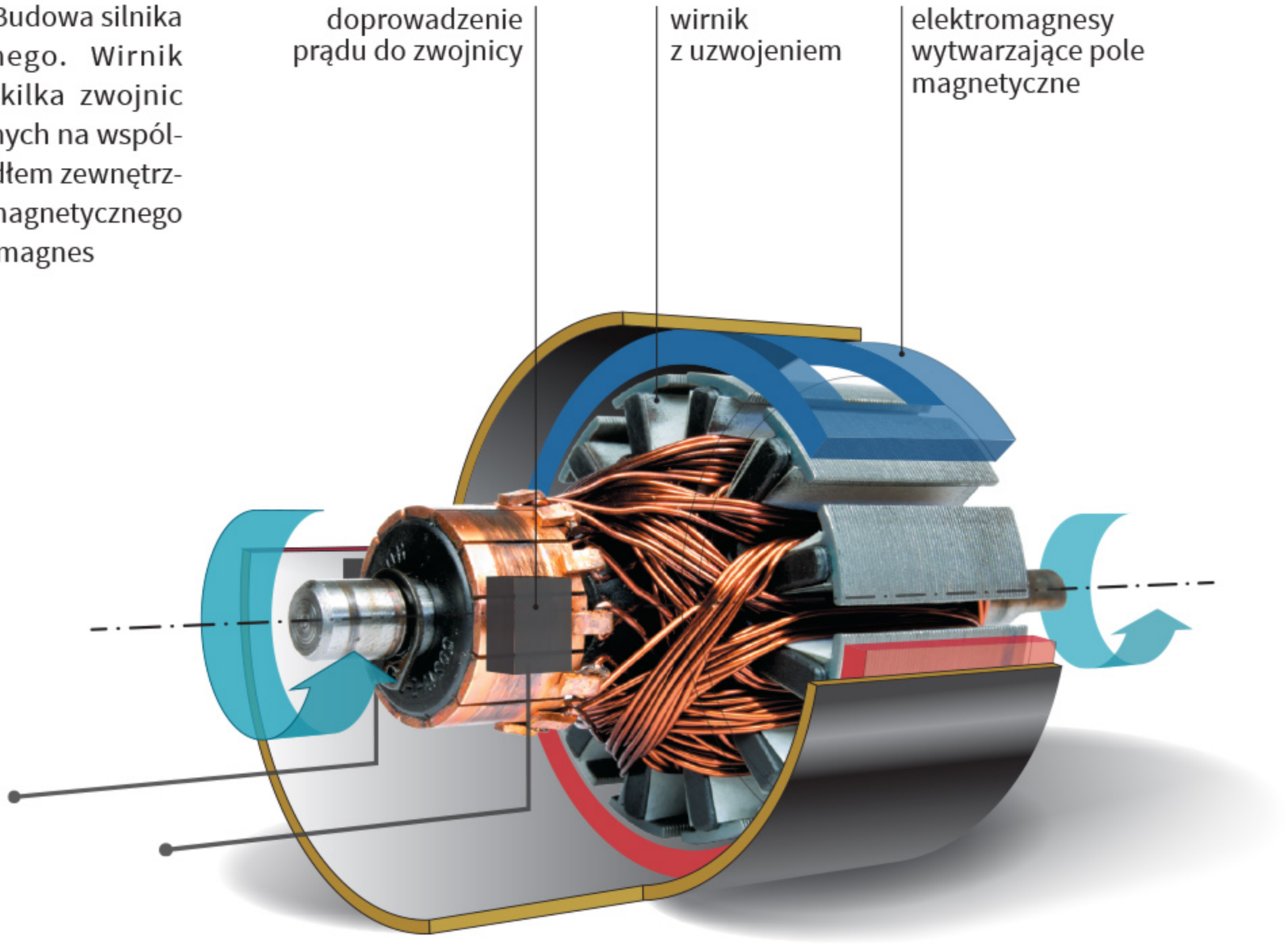
## Silnik elektryczny

Najpowszechniejszym wykorzystaniem oddziaływania pola magnetycznego na przewody z prądem jest silnik elektryczny. Przeanalizujmy zasadę jego działania na prostym modelu. W polu magnetycznym jest umieszczona prostokątna metalowa ramka, która może się obracać (ryc. 16.3).



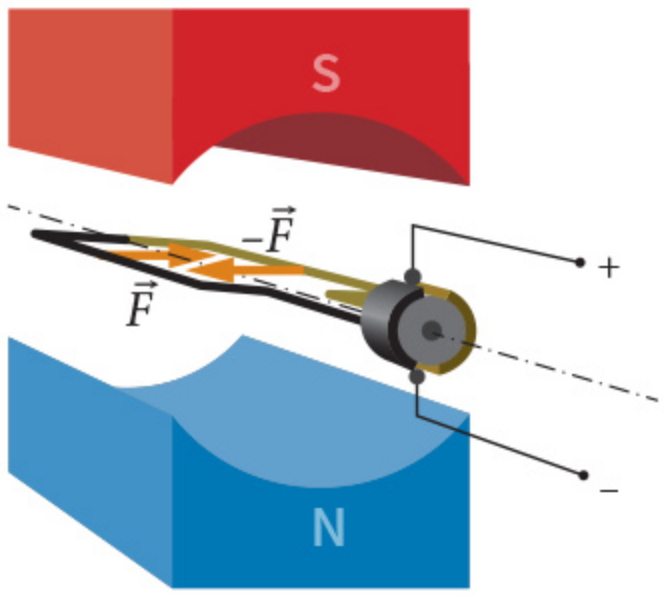

**Ryc. 16.3.** Schemat działania silnika elektrycznego

Gdy w ramce pojawi się prąd, na dwa jej boki zaczną działać siły magnetyczne powodujące jej obrót (ryc. 16.3a). W momencie przejścia rozpędzonej ramki przez położenie prostopadłe do linii pola zmienia się kierunek przepływu prądu. Wtedy siły magnetyczne zmieniają zwrot na przeciwny (ryc. 16.3b, c) i ramka kontynuuje obrót w tę samą stronę (ryc. 16.3d). W momencie, gdy ramka ponownie jest prostopadła do linii pola magnetycznego, znów zmienia się kierunek prądu (ryc. 16.3e). Wobec tego zmiana kierunku prądu za każdym razem, gdy ramka mija położenie prostopadłe do linii pola, powoduje jej ciągły ruch obrotowy.

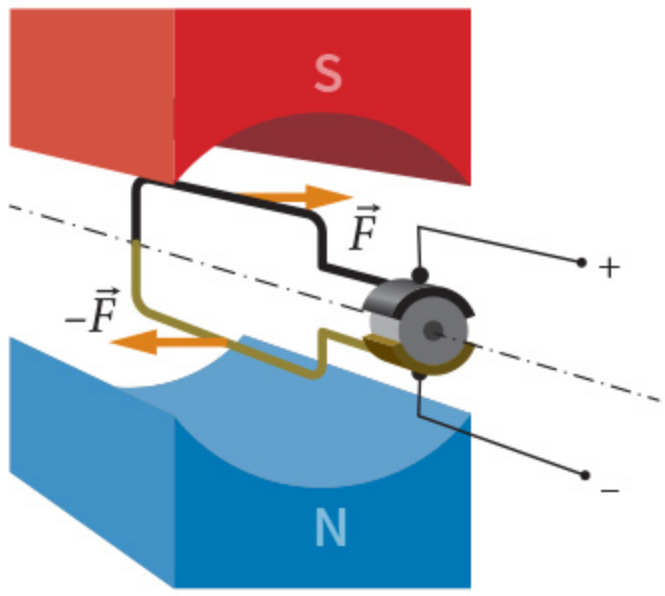



**Ryc. 16.4.** Budowa silnika elektrycznego. Wirnik silnika to kilka zwojnic umieszczonych na wspólnej osi, źródłem zewnętrznego pola magnetycznego jest elektromagnes

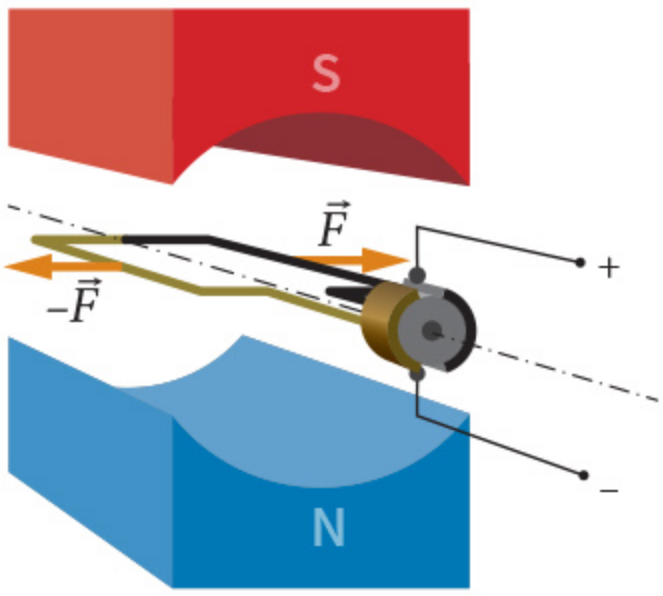
c)




d)




e)

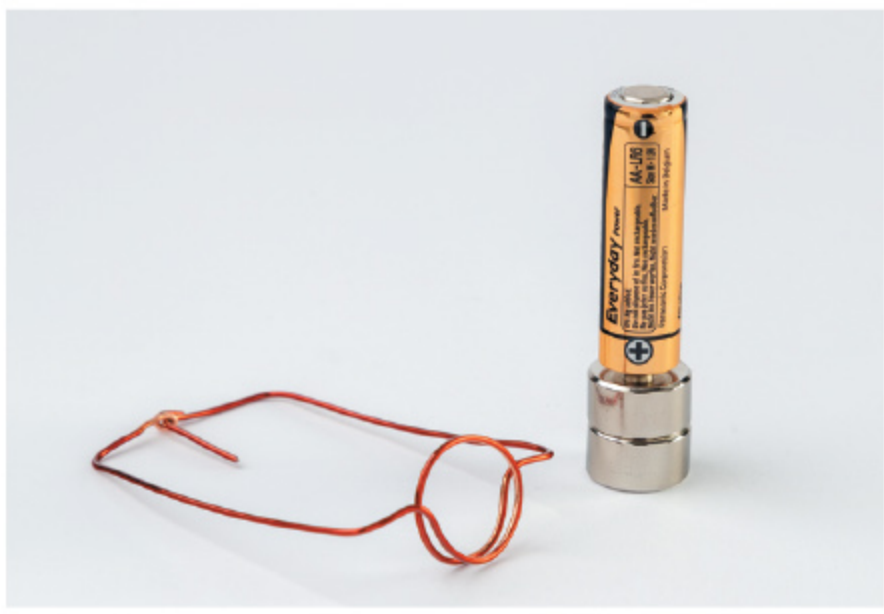



Siły magnetyczne działające na jedną ramkę są małe. Można je zwiększyć – wystarczy zastąpić ramkę zwojnicą nawiniętą na rdzeń. W rzeczywistych silnikach wirnik zbudowany jest z kilku zwojnic umieszczonych na wspólnej osi – zapewnia to płynną pracę silnika. Zmiana kierunku prądu odbywa się automatycznie – steruje tym układ elektroniczny albo przełącznik mechaniczny sprzężony z wirującymi zwojnicami (ryc. 16.4).

**DOŚWIADCZENIE 2.**

Zbuduj prosty silnik elektryczny z baterii AA i magnesu neodymowego. Magnes przyczep do spodu baterii (fot.). Z pozbawionego izolacji drutu wygnij ramkę w kształcie przedstawionym na zdjęciu. Ramka nie powinna być idealnie symetryczna, aby pierścień delikatnie opierał się o boczną ściankę magnesu. To zapewni zamknięcie obwodu z prądem. Ramkę umieść na baterii w sposób pokazany na zdjęciu.

Co się stanie, gdy magnes przytwierdzimy do baterii z drugiej jej strony? Czy zmiana położenia biegunów magnesu ma wpływ na kierunek przepływu prądu w ramce? A czy ma wpływ na kierunek obrotu ramki?



Silniki elektryczne wprawiają w ruch prawie wszystkie urządzenia wokół nas. Również w samochodach silniki spalinowe powoli zastępuje się elektrycznymi. Upowszechnienie takich silników było możliwe dzięki wynalezieniu prądnicy, czyli urządzenia do wytwarzania prądu elektrycznego.

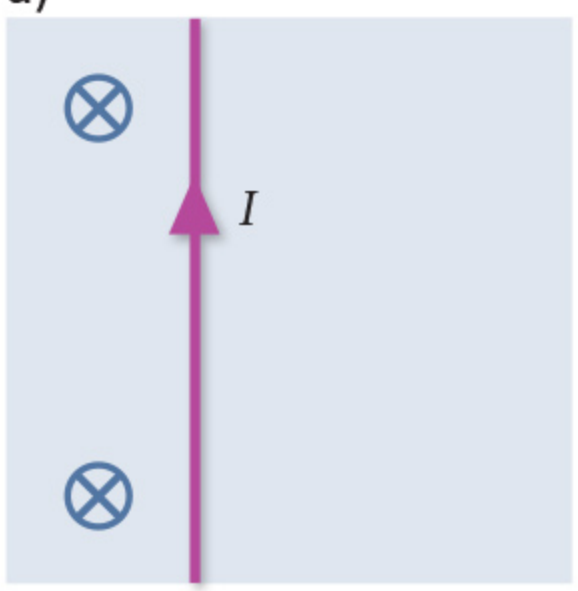
## PODSUMOWANIE

- Pole magnetyczne działa siłą na przewód z prądem, gdy umieszczony jest on nierównolegle do linii tego pola. Ta siła jest prostopadła do przewodu i do linii pola.
- Wirnik silnika elektrycznego obraca się dzięki sile magnetycznej.

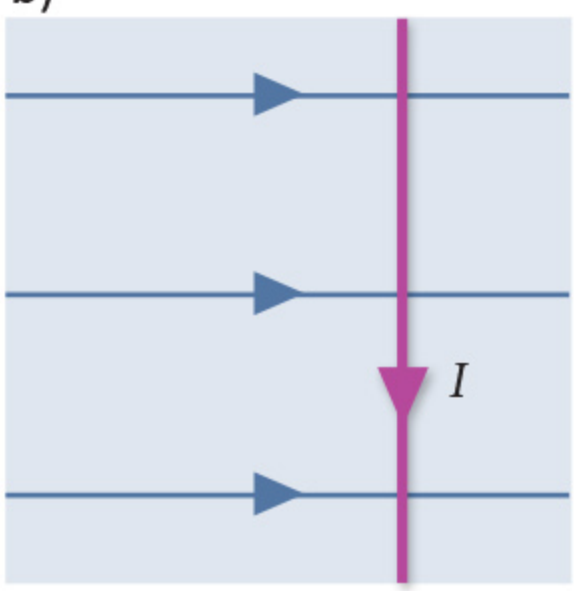
## PYTANIA I ZADANIA

**1.** Na rysunkach przedstawiono przewód z prądem znajdujący się w polu magnetycznym. W którą stronę działa na przewód siła magnetyczna w każdej z pokazanych tu sytuacji?

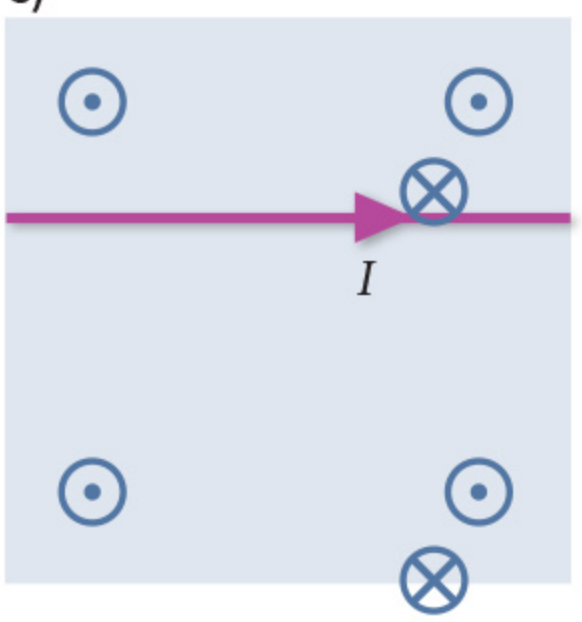
a)



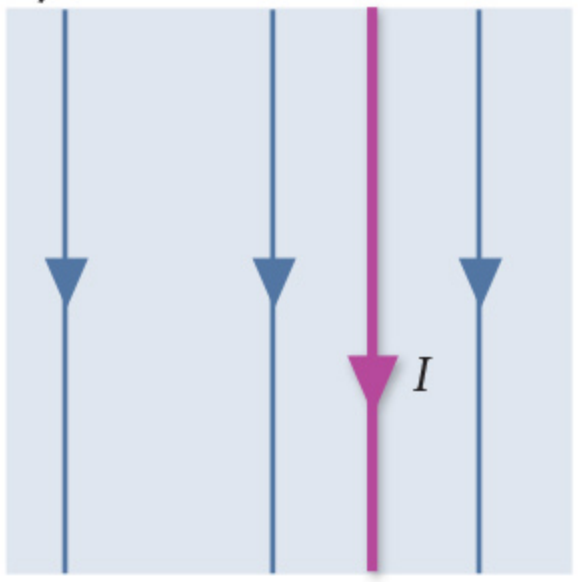

b)



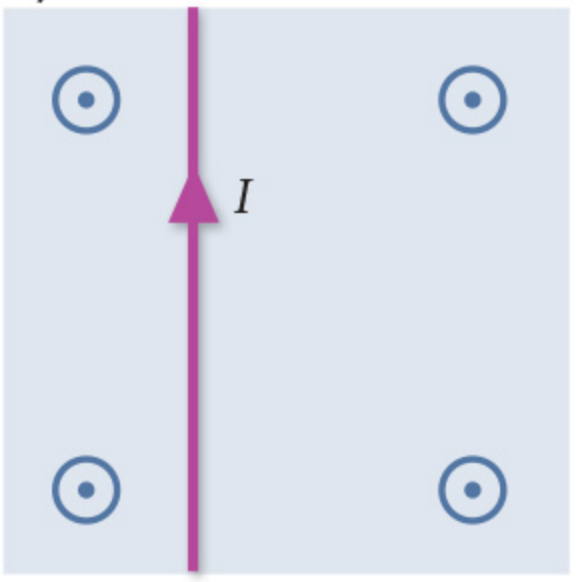

c)



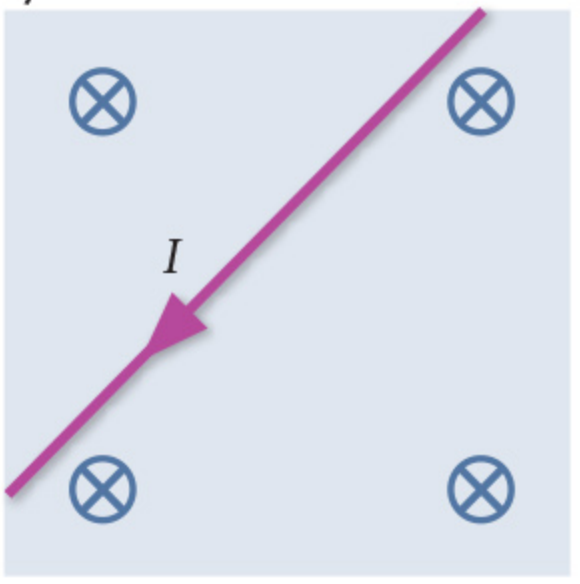

d)



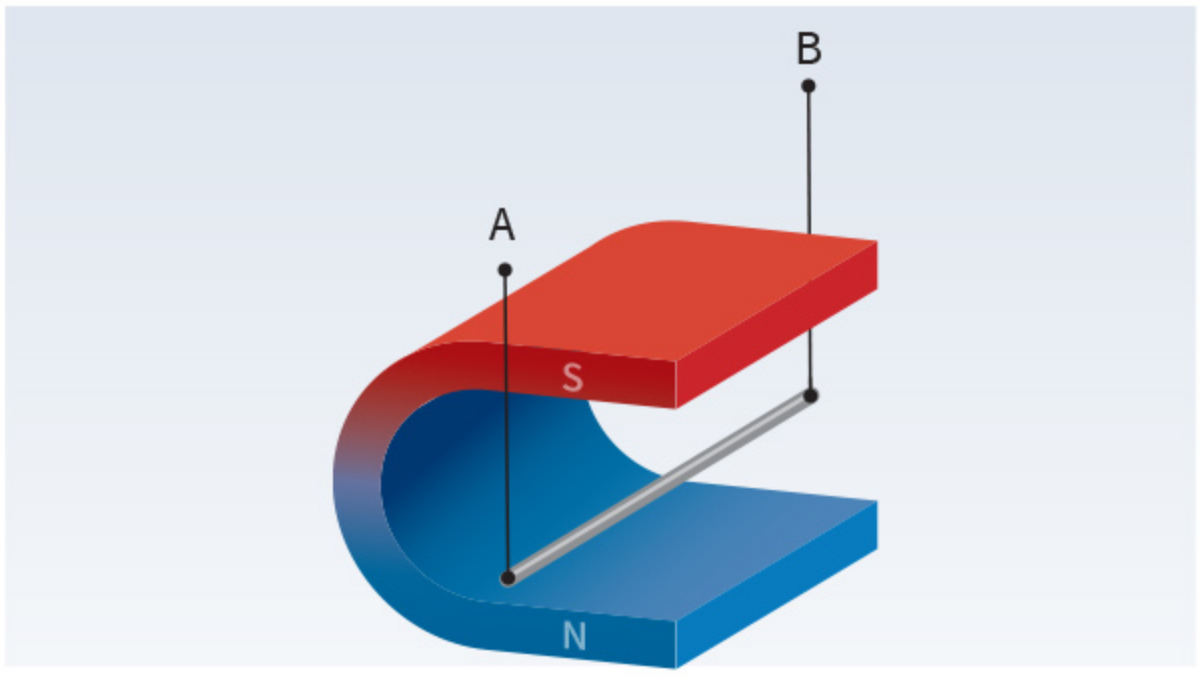

e)



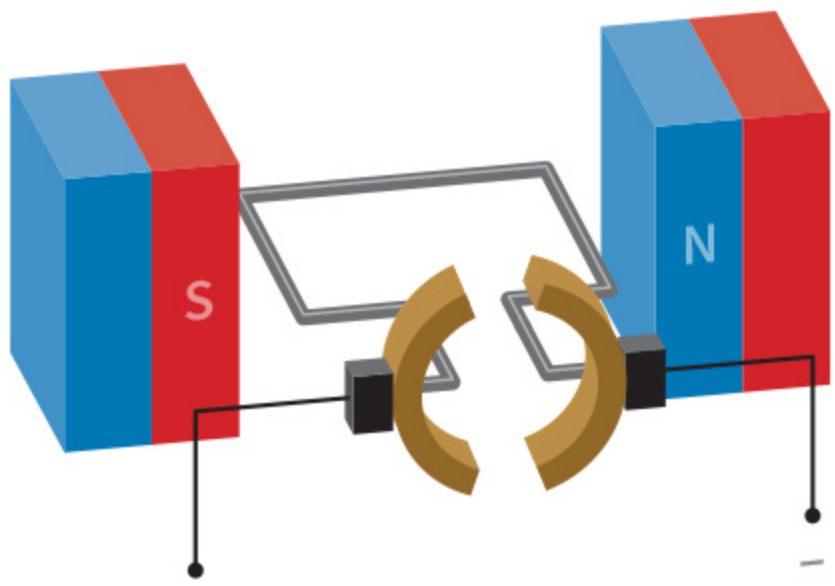

f)




**2.** Który koniec przewodu należy podłączyć do dodatniego zacisku źródła napięcia, aby w podanej sytuacji siła elektrodynamiczna działała na poziomy przewód w lewo?



**3.** W którą stronę obróci się ramka z prądem przedstawiona na rysunku poniżej?




**4.** W kwadratowej metalowej ramce o boku 0,1 m płynie prąd o natężeniu 5 A. Ramka umieszczona jest w polu magnetycznym o indukcji 0,001 T tak, że dwa jej boki są równoległe do linii pola.

**a)** Przedstaw sytuację na rysunku.

**b)** Oblicz siłę działającą na każdy bok ramki.

**c)** Czy pod działaniem tych sił ramka się przesunie, czy obróci?

**5.** Czy dwa równoległe przewody, w których prąd elektryczny płynie w tę samą stronę, odpychają się, czy przyciągają?
Wskazówka: przyjmij, że jeden przewód leży prostopadle do płaszczyzny rysunku, narysuj jego pole magnetyczne. W pewnym punkcie na linii pola umieść drugi przewód równolegle do pierwszego i wyznacz kierunek działającej na niego siły.

# 17. Ładunek elektryczny w polu magnetycznym

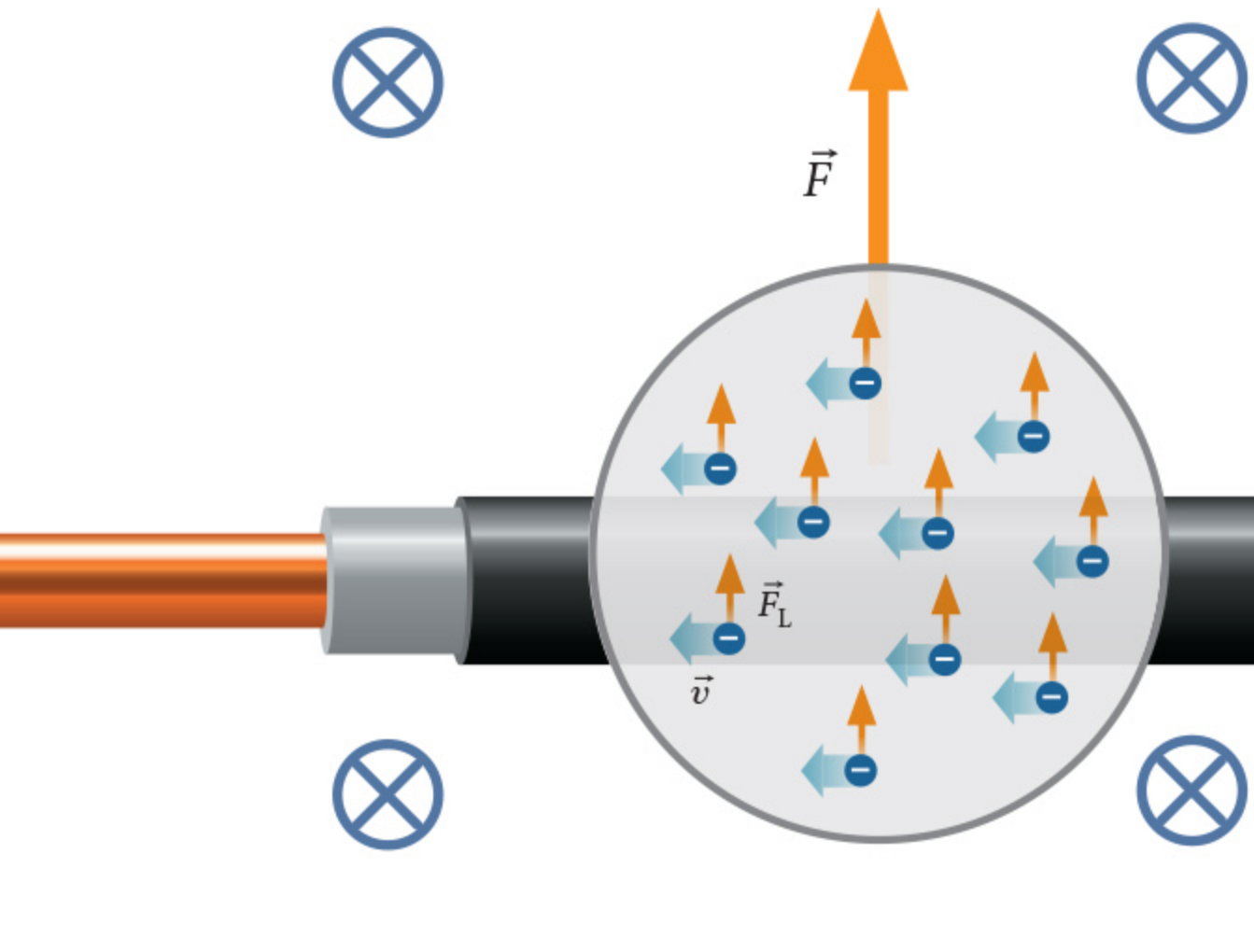
- Siła Lorentza
- Ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym

➔ **Przypomnij sobie**, jak działa pole magnetyczne na przewód z prądem.

Na przewód z prądem elektrycznym ustawiony nierównolegle do linii zewnętrznego pola magnetycznego działa siła. Gdy prąd przestaje płynąć, ta siła znika. Można więc przypuszczać, że oddziaływanie pola magnetycznego na przewód z prądem jest związane z ruchem ładunków elektrycznych.

## Siła działająca na poruszający się ładunek

Prąd elektryczny to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych. Pole magnetyczne działa siłą na przewód z prądem, gdyż działa na poruszające się ładunki. Wobec tego siła działająca na przewód z prądem jest po prostu wypadkową sił magnetycznych działających z osobna na każdy poruszający się ładunek (ryc. 17.1).



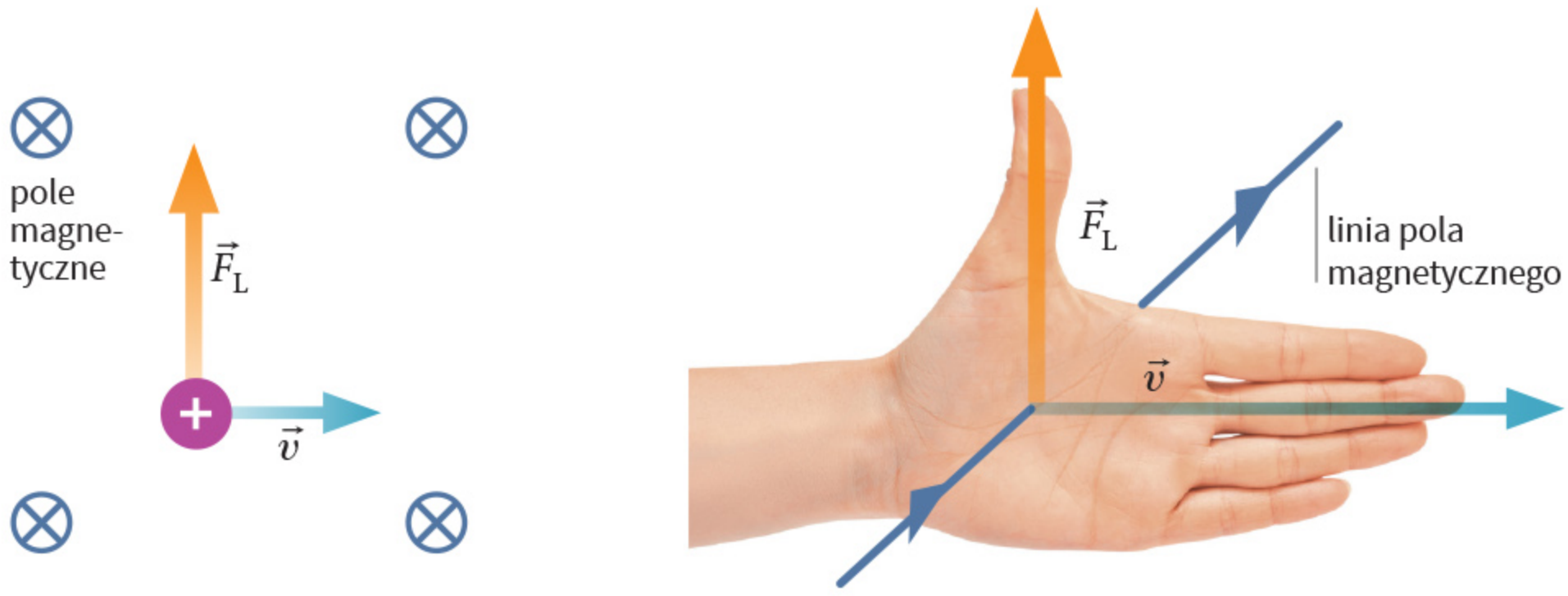

**Ryc. 17.1.** Na każdy elektron poruszający się w polu magnetycznym działa siła. Wypadkowa sił działających na elektrony to obserwowana siła działająca na przewód

Pole magnetyczne oddziałuje na cząstki naładowane poruszające się nierównolegle do linii pola.

Siła magnetyczna działająca na poruszającą się cząstkę naładowaną jest nazywana **siłą Lorentza**. Siła ta jest prostopadła do linii pola magnetycznego i do kierunku ruchu

cząstki, czyli do wektora jej prędkości. Gdy cząstka ma ładunek dodatni, zwrot tej siły wyznaczamy tak, jak zwrot siły działającej na przewód z prądem (ryc. 17.2). W przypadku cząstki o ładunku ujemnym zwrot siły jest przeciwny do zwrotu, który byśmy wyznaczyli dla cząstki z ładunkiem dodatnim.

Gdy cząstka porusza się wzdłuż linii pola magnetycznego, siła magnetyczna nie działa.




**Ryc. 17.2.** W określeniu zwrotu siły działającej na poruszający się ładunek dodatni w polu magnetycznym pomocna jest lewa dłoń

Siłę Lorentza działającą na poruszającą się prostopadle do linii pola cząstkę naładowaną obliczamy ze wzoru:

$$F_L = qvB \quad (1)$$

gdzie:
$q$ – ładunek elektryczny cząstki,
$v$ – prędkość cząstki,
$B$ – indukcja magnetyczna.

## Ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym

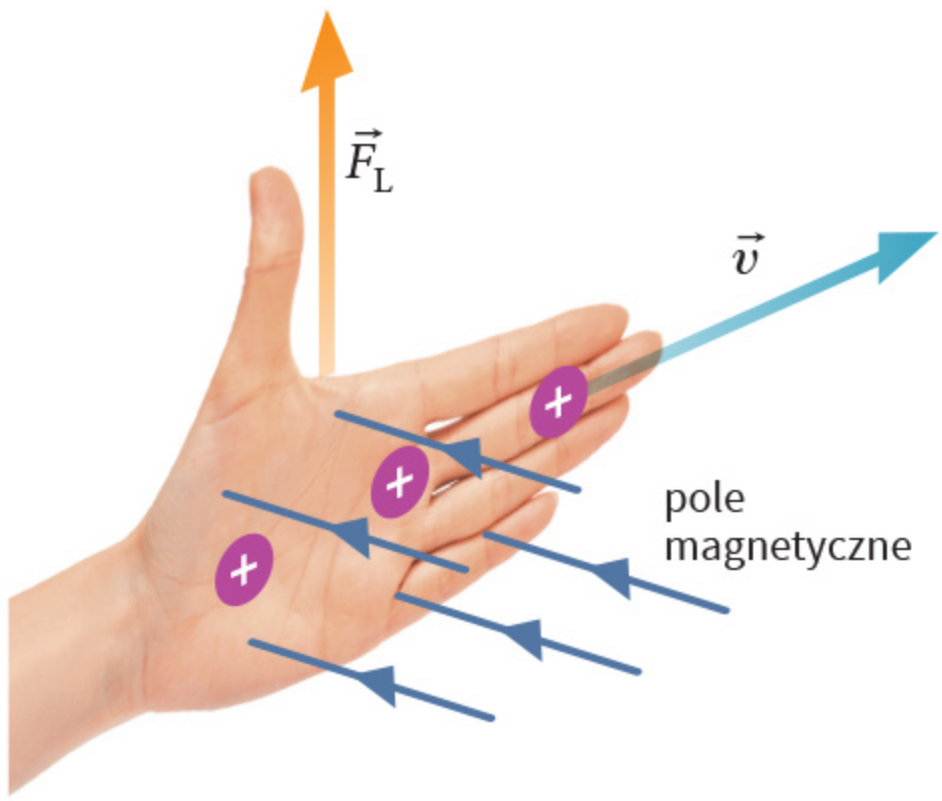
Jaki wpływ na ruch ładunków może mieć pole magnetyczne? Na cząstki spoczywające pole magnetyczne nie działa w ogóle, a na te poruszające się nierównolegle do linii pola – działa siłą prostopadłą do wektora prędkości. Taka siła jest prostopadła również do przemieszczenia cząstki (przynajmniej w krótkim czasie). Oznacza to, że siła magnetyczna nie wykonuje pracy i nie zmienia energii cząstki, a więc pole magnetyczne nie może ani rozpędzić, ani wyhamować cząstek. Pole magnetyczne zmienia jedynie kierunek ruchu cząstek bez zmiany wartości ich prędkości. Pod działaniem siły magnetycznej cząstka naładowana, poruszająca się w polu magnetycznym, będzie skręcać w kierunku działania tej siły.

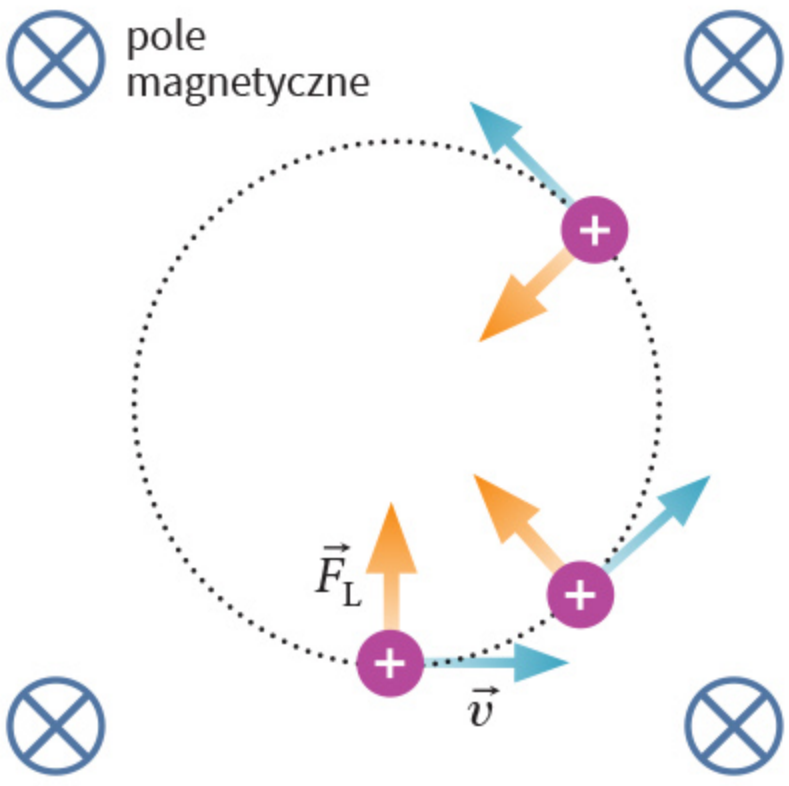
Stałe pole magnetyczne nie zmienia energii kinetycznej cząstek naładowanych.

**PRZYKŁAD 1.**

Na zdjęciu przedstawiono drukarkę służącą do wykonywania nadruków na opakowaniach produktów spożywczych. W poziomo ustawionej głowicy drukującej malutkie kropelki tuszu elektryzowane są dodatnio i wystrzeliwane w kierunku opakowania. Pole magnetyczne wewnątrz głowicy odchyla kropelki od prostoliniowego kierunku, tak że na opakowaniu powstają napisy. Jak powinno być skierowane pole magnetyczne, aby poziomo wystrzelona kropelka skręciła w górę?

Aby zakrzywić tor poziomo wystrzelonej kropli w górę, siła na nią działająca też musi być skierowana pionowo w górę. Pole magnetyczne powinno być zatem skierowane prostopadle do kierunku ruchu kropli i działającej siły, czyli linie pola muszą być poziome – równoległe do przesuwającej się taśmy z butelkami. Zwrot linii pola ustalamy zgodnie z regułą lewej dłoni: cztery palce ($\vec{v}$) są skierowane w stronę butelki, kciuk ($\vec{F}_{\mathrm{L}}$)jest odchylony w górę, czyli linie pola magnetycznego są skierowane w lewą stronę (ryc.).




Ruch cząstki naładowanej zależy od tego, jak skierowany jest wektor prędkości cząstki w stosunku do linii pola magnetycznego. Gdy cząstka wpadnie w pole równolegle do jego linii, siła nie będzie działać, więc ruch cząstki będzie jednostajny po linii prostej. W sytuacji, gdy prędkość początkowa cząstki jest prostopadła do linii pola, działa na nią siła Lorentza o stałej wartości, prostopadła do prędkości cząstki. Taka siła powoduje ruch po łuku okręgu. Wobec tego siła Lorentza pełni w tym przypadku funkcję siły dośrodkowej i cząstka porusza się po okręgu (ryc. 17.3).

**Ryc. 17.3.** Cząstka naładowana dodatnio w jednorodnym polu magnetycznym. W każdym momencie siła magnetyczna jest prostopadła do prędkości cząstki, więc porusza się ona po okręgu

**PRZYKŁAD 2.**

Słońce emituje tzw. wiatr słoneczny. Tworzą go różne cząstki naładowane, poruszające się z prędkością kilkuset kilometrów na sekundę.

Oszacujmy promień okręgu, po którym będzie poruszał się elektron z wiatru słonecznego w ziemskim polu magnetycznym, gdy wpadnie w pole prostopadle do jego linii z prędkością 400 km/s. Przyjmijmy, że indukcja ziemskiego pola magnetycznego wynosi $3 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{T}$.

Siła magnetyczna działająca na elektron jest siłą dośrodkową, zatem:

$$F_\mathrm{L} = F_\mathrm{d}$$

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

Po przekształceniu otrzymujemy:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

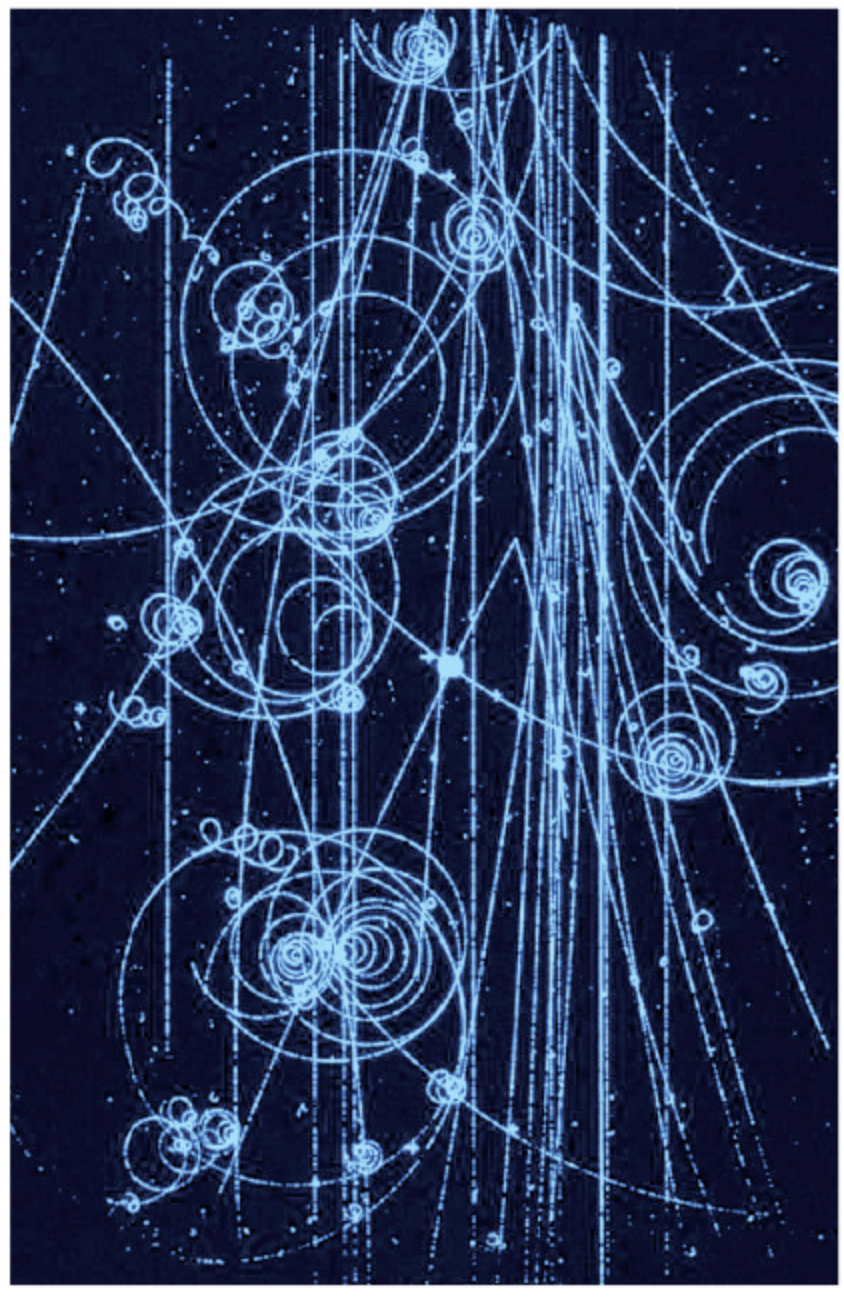
Podstawiamy dane w odpowiednich jednostkach (ładunek elektronu jest równy ładunkowi elementarnemu):

$$r = \frac{9 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg} \cdot 4 \cdot 10^{5}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C} \cdot 3 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{T}} = 0{,}075\ \mathrm{m}$$

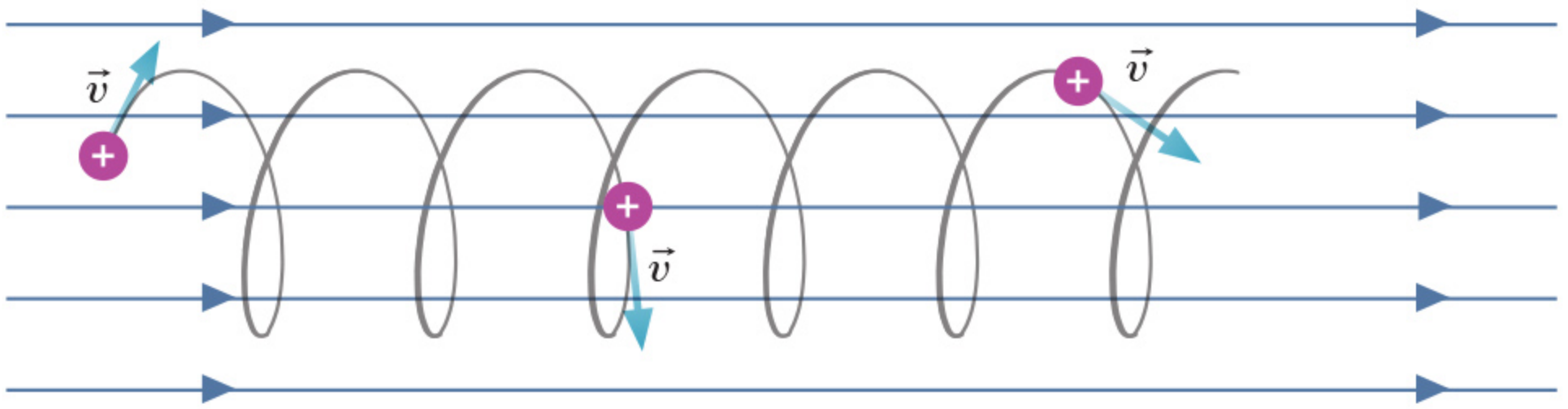
Promień okręgu wynosi zaledwie 7,5 cm.

Analiza toru ruchu cząstek w polu magnetycznym to cenne narzędzie badawcze, szczególnie w dziedzinie fizyki atomowej i cząstek elementarnych. Nie widzimy tych cząstek, ale gdy poruszają się w materii, zostawiają za sobą ścieżkę zjonizowanych atomów. Istnieją metody, aby zobrazować ich położenie i dzięki temu zobaczyć ślady przez nie pozostawione. Na podstawie analizy tych śladów możemy wyznaczyć masę, ładunek czy energię cząstek (ryc. 17.4).

Gdy cząstka naładowana wpada w pole magnetyczne pod kątem innym niż prosty, jej ruch jest bardziej skomplikowany. Cząstka wpadająca ukośnie w pole magnetyczne jednocześnie przemieszcza się wzdłuż i w poprzek linii pola. Jej ruch jest złożeniem ruchu postępowego i ruchu po okręgu. Torem ruchu jest tzw. linia śrubowa (helisa), wyglądająca jak sprężyna owijająca linie pola magnetycznego (ryc. 17.5).



**Ryc. 17.4.** Ślady cząstek elementarnych w tzw. komorze pęcherzykowej




**Ryc. 17.5.** W polu magnetycznym ładunki najczęściej poruszają się po linii śrubowej

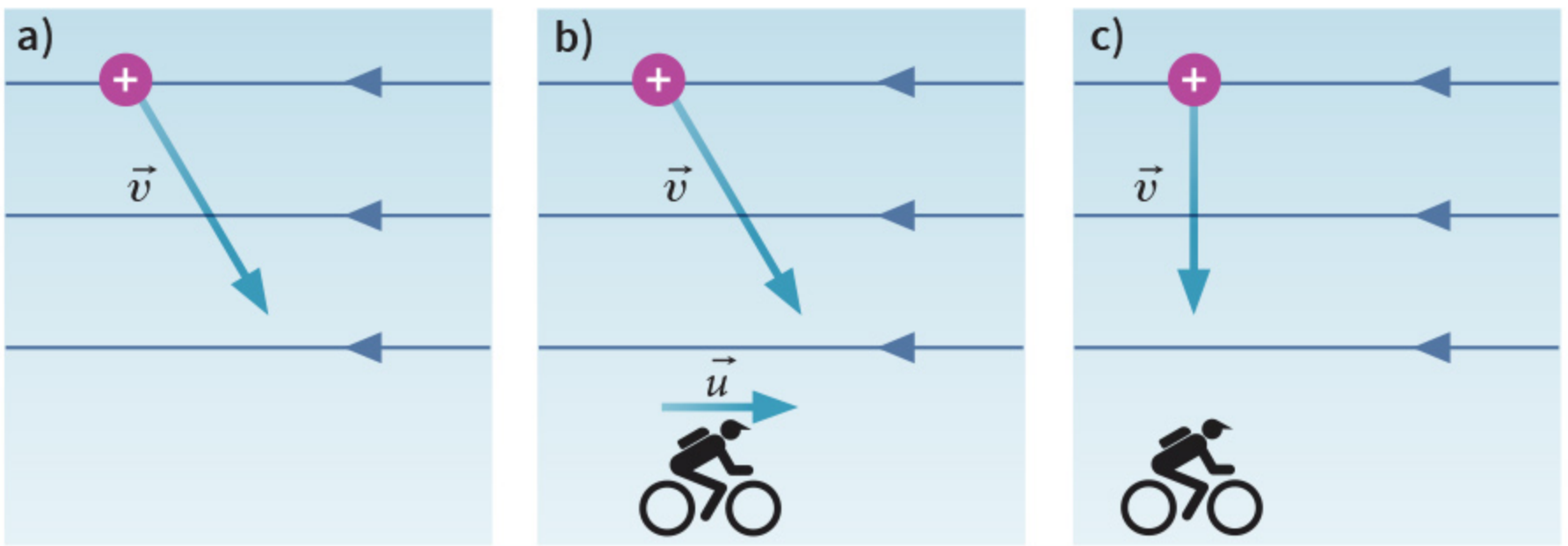
Tak poruszają się np. cząstki naładowane materii słonecznej. Na zdjęciach widzimy, jak zjonizowany gaz wyrzucany z powierzchni Słońca porusza się wzdłuż linii pola magnetycznego (rzeczywisty tor cząsteczek gazu tworzący helisę nie jest widoczny; ryc. 17.6).

**Ryc. 17.6.** Zdjęcia materii wyrzucanej z powierzchni Słońca dostarczają informacji o polu magnetycznym naszej gwiazdy

WARTO WIEDZIEĆ

**Helisa a ruch po okręgu**

Gdy cząstka naładowana wpada skośnie do linii pola magnetycznego (ryc. a), jej tor jest dla obserwatora dosyć skomplikowaną krzywą. Ale nie dla każdego obserwatora.




Możemy spojrzeć na tę cząstkę z punktu widzenia rowerzysty poruszającego się w prawo z prędkością $\vec{u}$ (ryc. b). Przy pewnej prędkości – takiej, że przemieszczenie poziome cząstki i roweru jest w każdej sekundzie takie samo – rowerzysta zobaczy, że cząstka porusza się prostopadle do linii pola (ryc. c). Innymi słowy, w jego układzie odniesienia tor cząstki jest okręgiem. Jeśli wrócimy do naszego początkowego układu odniesienia, zobaczymy, że te okręgi unoszone są w prawo z prędkością $\vec{u}$.

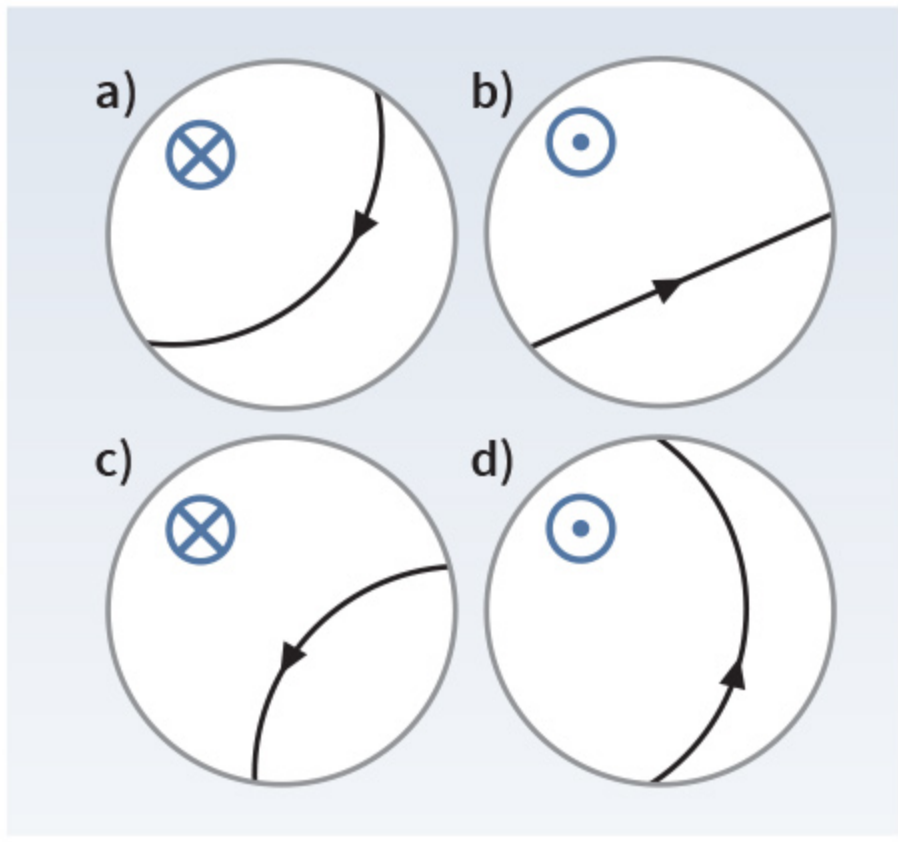
Ładunki elektryczne wpadające w pole magnetyczne nierównolegle do jego linii zaczynają poruszać się po okręgu lub po linii śrubowej wzdłuż linii pola. W obydwu przypadkach cząstki zostają uwięzione przez pole magnetyczne. Fakt ten ma duże znaczenie nie tylko dla zjawisk zachodzących na Słońcu. Więcej informacji o jego znaczeniu dla życia na Ziemi będzie w następnym rozdziale.

## PODSUMOWANIE

- Pole magnetyczne działa siłą Lorentza na cząstki naładowane poruszające się nierównolegle do linii tego pola.
- Pod działaniem pola magnetycznego ładunki zakrzywiają tor swojego ruchu bez zmiany wartości prędkości.

## PYTANIA I ZADANIA

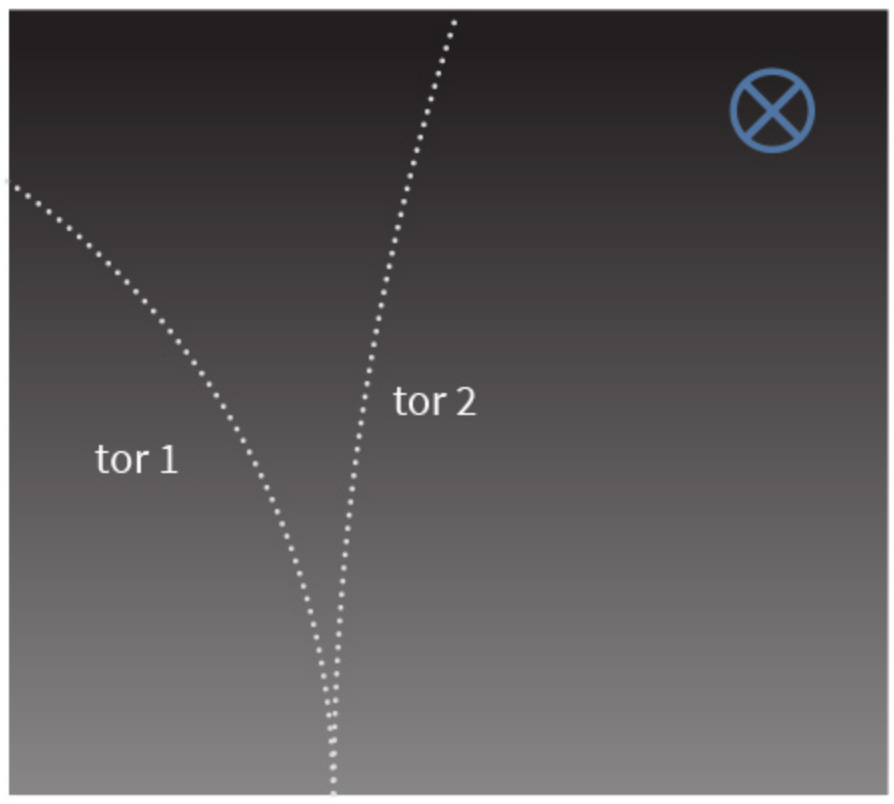
**1.** Który rysunek poprawnie przedstawia tor cząstki o ładunku dodatnim w polu magnetycznym (pole zaznaczone jest krzyżykiem lub kropką)?




**2.** Promienie okręgów, po których poruszały się niektóre cząstki z ryciny 17.4, były coraz mniejsze. Jak zmieniała się prędkość tych cząstek?

**3.** Oblicz prędkość protonu, który w polu magnetycznym o indukcji $10^{-3}$ T porusza się po okręgu o promieniu 0,05 m. Wskazówka: przeanalizuj przykład 2.

**4.** Rysunek przedstawia ślady dwóch cząstek, które wpadły w pole magnetyczne z tą samą prędkością i poruszały się – względem rysunku – w górę. Wartość bezwzględna ładunków obu cząstek była taka sama. Która z nich miała ładunek dodatni, a która ujemny? Która z nich miała większą masę?




**5.** Udowodnij, że wszystkie elektrony w polu magnetycznym o zadanej indukcji magnetycznej poruszają się po okręgach z tym samym okresem obiegu.

# 18. Pole magnetyczne Ziemi

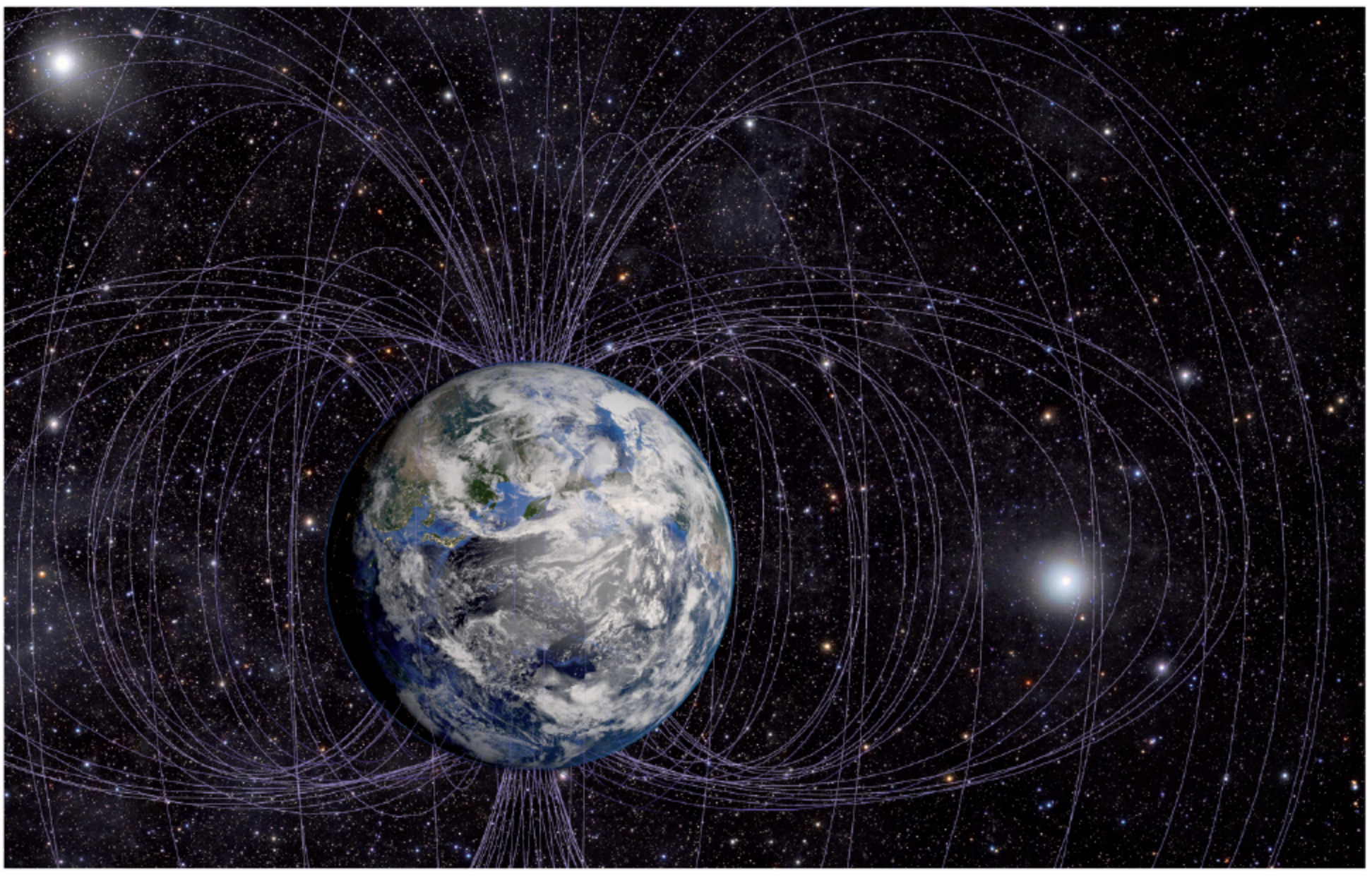
- Ziemskie pole magnetyczne
- Wiatr słoneczny
- Magnetosfera

➔ **Przypomnij sobie** wielkości opisujące pole magnetyczne i to, jak porusza się ładunek w polu magnetycznym.

Przestrzeń kosmiczna wokół Ziemi nie jest całkiem pusta – jest wypełniona m.in. wiatrem słonecznym i polem magnetycznym. Ziemskie pole magnetyczne chroni życie na Ziemi przed groźnymi skutkami działania cząstek nadlatujących ze Słońca i z dalekiego Kosmosu. Zorze polarne to widoczny efekt tych zmagań.

## Pole magnetyczne Ziemi

Ziemskie pole magnetyczne przypomina pole magnetyczne zwojnicy z prądem elektrycznym (ryc. 18.1). W Arktyce linie pola magnetycznego się zbiegają – tam znajduje się południowy biegun magnetyczny. Z kolei północny biegun magnetyczny jest położony w rejonie Antarktydy.



**Ryc. 18.1.** Linie ziemskiego pola magnetycznego

Bieguny magnetyczne Ziemi to punkty, w których linie pola magnetycznego skierowane są dokładnie pionowo. Okazuje się, że nie leżą one na osi ziemskiej, więc nie pokrywają się z biegunami geograficznymi. Co więcej – ich położenie zmienia się na przestrzeni lat (ryc. 18.2).

**Ryc. 18.2.** Położenie południowego bieguna magnetycznego Ziemi w ciągu ostatnich 200 lat

## WARTO WIEDZIEĆ

**Zmienność pola magnetycznego Ziemi i Słońca**

W historii naszej planety wiele razy dochodziło do zamiany miejscami biegunów magnetycznych. Zapis kierunku pola magnetycznego na Ziemi znajdujemy w szczątkowym namagnesowaniu niektórych drobin zawartych w skałach. Z badań geologicznych wynika, że średnio raz na kilkaset tysięcy lat zachodzi przebiegunowanie ziemskiego pola magnetycznego. Ten proces trwa kilkaset lat. Podczas zmiany pole staje się bardzo złożone, w różnych miejscach na powierzchni Ziemi pojawia się wiele biegunów magnetycznych, które za jakiś czas znikają. Ostatecznie pozostają tylko dwa bieguny, położone w rejonach bliskich biegunom geograficznym. Ostatnia zmiana biegunów magnetycznych miała miejsce ok. 800 tysięcy lat temu. Podobnie wygląda to na Słońcu, choć w tym przypadku cykl w miarę regularnych zmian pola magnetycznego trwa ok. 11 lat. Przebiegunowanie to czas wysokiej aktywności Słońca. W tym czasie pojawiają się na nim w różnych miejscach tzw. plamy słoneczne (jaśniejsze obszary na fotografii poniżej; w świetle widzialnym są to obszary ciemniejsze). Są to obszary o nieco niższej temperaturze powierzchni, w których linie pola magnetycznego wychodzą prawie pionowo ponad fotosferę (widzialną powierzchnię Słońca). Indukcja magnetyczna w obszarze plamy jest kilkadziesiąt tysięcy razy większa niż w pozostałych obszarach Słońca.

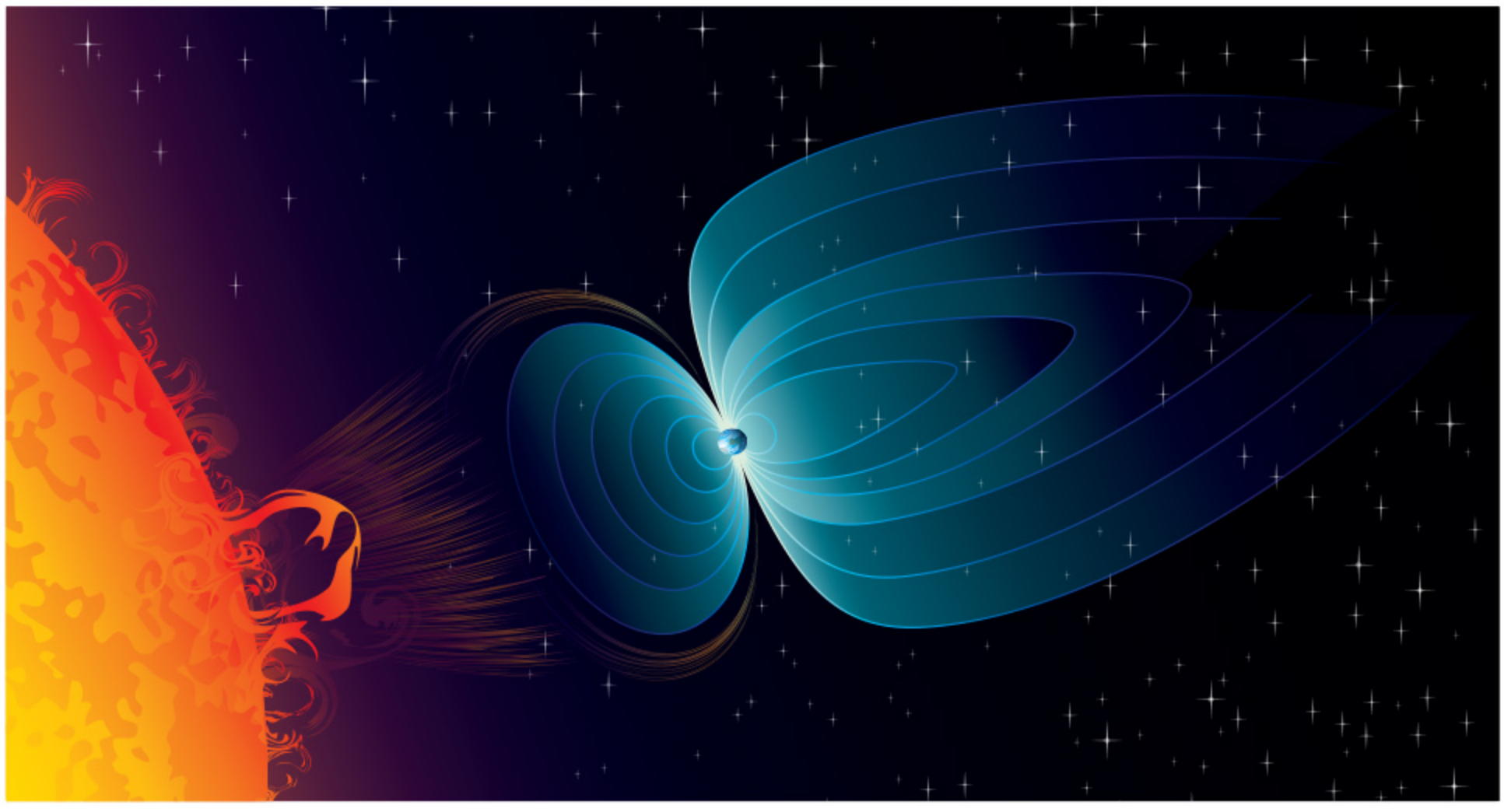
Źródłem pola magnetycznego Ziemi są wirowe prądy elektryczne powstające w jej wnętrzu. Ruchy materii w gorącym wnętrzu Ziemi są bardzo złożone: płynna materia wznosi się i opada w wyniku konwekcji, a na ten ruch nakłada się jeszcze ruch obrotowy wokół ziemskiej osi. W efekcie ładunki przeciwnego znaku, które powstają w wyniku tarcia między warstwami materii, unoszone są w przeciwne strony, podobnie jak w chmurze burzowej. Poruszające się ładunki wytwarzają pole magnetyczne.

Ziemia nie jest jedyną planetą z własnym polem magnetycznym. Warunkiem istnienia takiego pola wokół planety jest płynne jądro w jej wnętrzu i stosunkowo szybki jej obrót wokół własnej osi.

F

## Magnetosfera i wiatr słoneczny

Ziemskie pole magnetyczne sięga tysiące kilometrów w przestrzeń kosmiczną. Ten obszar nazywamy **magnetosferą Ziemi**.



**Ryc. 18.3.** Magnetosfera Ziemi. Od strony Słońca pole magnetyczne jest spłaszczone, po przeciwnej zaś stronie rozciąga się w przestrzeń kosmiczną

Słońce – poza falami elektromagnetycznymi – emituje na wszystkie strony cząstki naładowane, głównie elektrony i protony. Ten strumień cząstek nosi nazwę **wiatru słonecznego**. To przez niego magnetosfera Ziemi nie jest symetryczna. W bardzo dużych odległościach od Ziemi wiatr słoneczny jakby „wywiewa" pole magnetyczne w przestrzeń kosmiczną (ryc. 18.3).

F

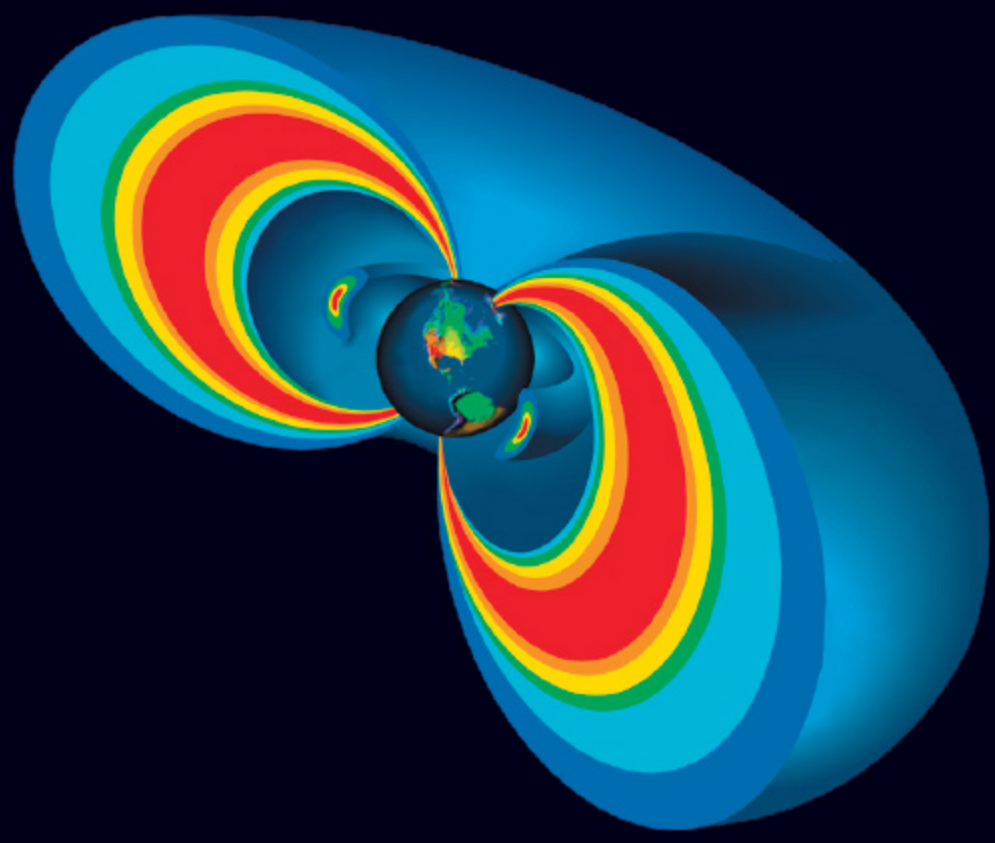
Cząstki naładowane zbliżające się do Ziemi zostają przechwycone przez ziemskie pole magnetyczne i poruszają się wzdłuż linii pola. Poruszające się w sposób uporządkowany cząstki naładowane to prąd elektryczny, który również jest źródłem pola magnetycznego. W efekcie w pobliżu Ziemi mamy więc wypadkowe pole magnetyczne pochodzące z dwóch źródeł: samej Ziemi i wiatru słonecznego.

Pole magnetyczne stanowi swoistą pułapkę dla cząstek naładowanych. Nie inaczej jest z ziemskim polem magnetycznym: przechwycone cząstki gromadzą się w przestrzeni między biegunami magnetycznymi. Szczególnie dużą ich koncentrację rejestruje się w pasach dookoła Ziemi, leżących na wysokości tysięcy kilometrów. Są to tzw. **pasy Van Allena** (ryc. 18.4).

F

Wiatr słoneczny jest niebezpieczny dla ludzi i wszystkich innych organizmów, gdyż szybkie cząstki uderzające w nasze ciało mogą uszkodzić komórki. Pole magnetyczne przechwytuje te cząstki wysoko nad Ziemią, więc nie docierają one do jej powierzchni. Ziemskie pole magnetyczne osłania nas przed nimi.

Jak widać na rycinie 18.4, cząstki wiatru słonecznego zbliżają się do powierzchni Ziemi w zasadzie tylko w rejonach podbiegunowych. Tam wpadają w górne warstwy atmosfery i pobudzają do świecenia cząsteczki powietrza. Tak powstają zorze polarne (ryc. 18.5 oraz infografika na s. 138-139). Podobny mechanizm emisji światła jest wykorzystywany np. w świetlówkach, gdzie pole elektryczne rozpędza jony.



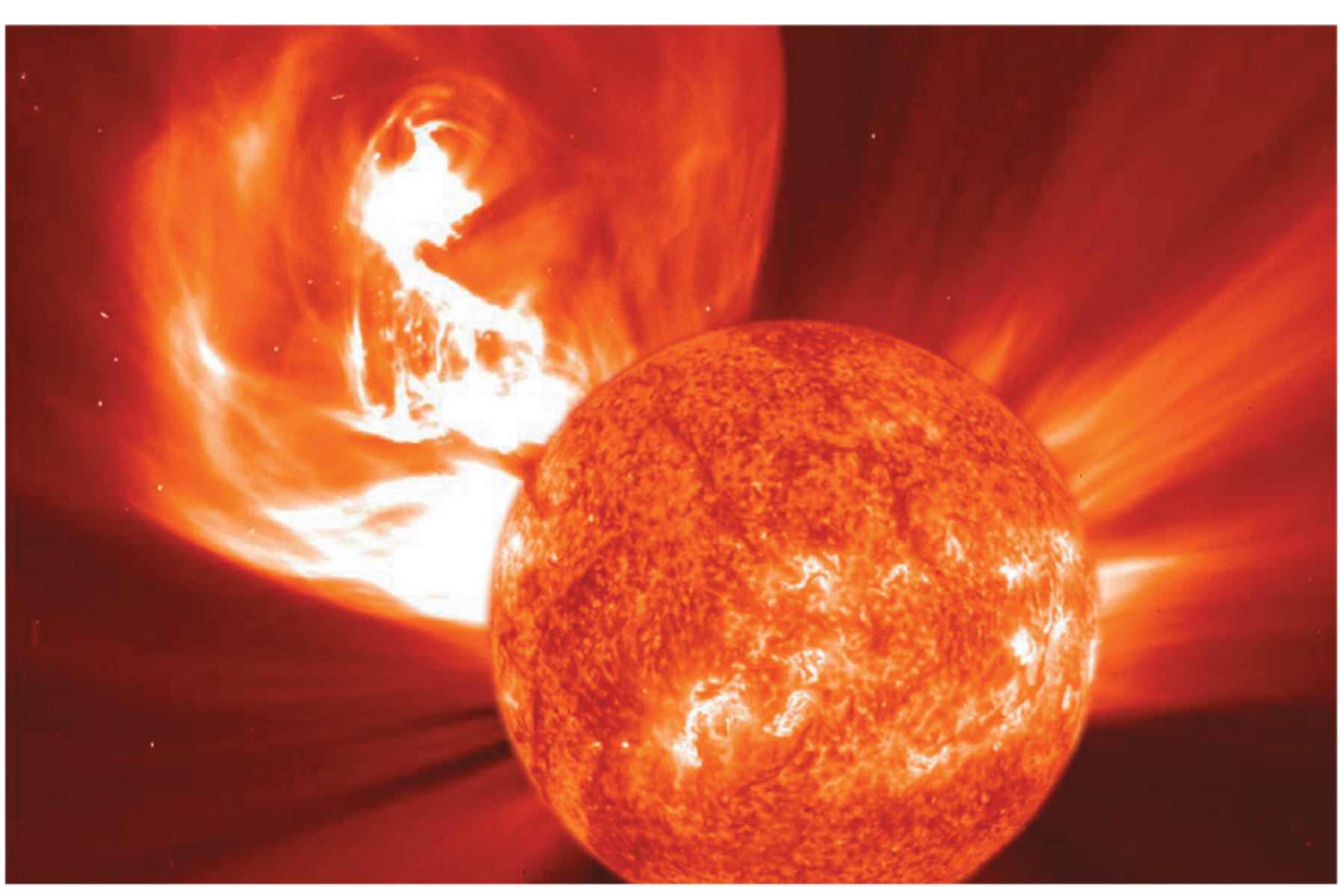
**Ryc. 18.4.** Cząstki naładowane przechwycone przez ziemskie pole magnetyczne tworzą pasy Van Allena. Kolor czerwony symbolizuje największe zagęszczenie cząstek

**Ryc. 18.5.** Zorza polarna to świecenie górnych warstw atmosfery

## WARTO WIEDZIEĆ

### Zorza polarna w Polsce

Czy mamy szansę zobaczyć zorzę polarną w Polsce? Okazuje się, że tak. Jak wiemy, magnetosfera kształtowana jest zarówno przez pole magnetyczne Ziemi, jak i pole magnetyczne cząstek naładowanych krążących w jej pobliżu. Liczba tych cząstek zależy od aktywności Słońca. W okresie wysokiej aktywności dochodzi do rozbłysków słonecznych, czyli wybuchów na powierzchni naszej gwiazdy (ryc.). Podczas tych eksplozji emitowanych jest bardzo dużo cząstek. Te cząstki na tyle spłaszczają magnetosferę Ziemi od strony Słońca, że mogą wtargnąć do atmosfery nawet na niskich szerokościach geograficznych.



Aby zobaczyć zorzę w Polsce, należy zatem śledzić aktywność słoneczną. Obserwatoria słoneczne cały czas monitorują Słońce pod tym względem, ale w innym celu niż polowanie na zorze polarne. Cząstki nadlatujące ze Słońca mogą uszkodzić aparaturę elektroniczną w sztucznych satelitach obiegających Ziemię. Zwykle satelity są osłonięte ziemskim polem magnetycznym i wiatr słoneczny do nich nie dociera, jednak gdy istnieje ryzyko ich odsłonięcia w wyniku odkształcenia pola magnetycznego, na jakiś czas się je wyłącza.

## PODSUMOWANIE

- Pole magnetyczne Ziemi przechwytuje cząstki naładowane nadlatujące ze Słońca.
- **Magnetosfera**, czyli pole magnetyczne wokół Ziemi, jest kształtowana przez ziemski magnetyzm oraz pole magnetyczne cząstek wiatru słonecznego.
- **Zorze polarne** to świecenie górnych warstw atmosfery, wywołane wiatrem słonecznym.

## PYTANIA I ZADANIA

**1.** Jaki jest zwrot linii ziemskiego pola magnetycznego w sytuacjach przedstawionych na zdjęciach?

Marek Kamiński na biegunie północnym

Wieczór na sawannie

**2.** Wenus i Ziemia mają dosyć podobną budowę, ale okres obrotu Wenus wokół osi to aż 243 dni. Sformułuj hipotezę dotyczącą tego, która z tych planet ma silniejsze pole magnetyczne. Hipotezę uzasadnij na podstawie informacji zawartych w rozdziale.

**3.** Czy cząstki wiatru słonecznego są hamowane przez ziemskie pole magnetyczne? Uzasadnij odpowiedź.

**4.** Dlaczego zorze polarne powstają najczęściej w rejonach podbiegunowych?

**5.** Czy astronauci lecący na Marsa byliby bardziej narażeni na skutki wystawienia na wiatr słoneczny niż załoga Międzynarodowej Stacji Kosmicznej krążącej wokół Ziemi na wysokości ok. 400 km? Uzasadnij odpowiedź.

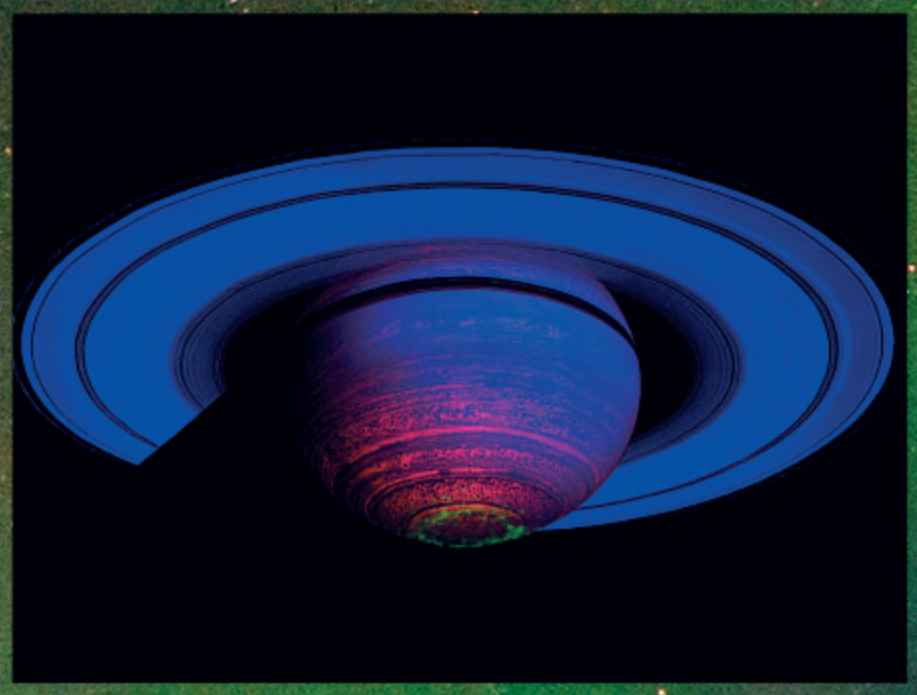
F

# Zorze polarne

Zorze polarne są pięknym efektem zmagań wiatru słonecznego z ziemską magnetosferą. Jak sama nazwa wskazuje, można je zobaczyć głównie w rejonach podbiegunowych.

Feeria kolorów i szybko zmieniające się kształty, gwiazdy za barwnymi kurtynami i pasmami – to wszystko zawdzięczamy cząsteczkom tlenu i azotu, bombardowanym przez cząstki wyrzucane ze Słońca.

Zorza polarna wokół bieguna południowego zarejestrowana przez satelitę NASA oraz zorza widoczna z pokładu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej



Zorze polarne są obserwowane także na innych planetach, które mają pole magnetyczne i atmosferę. Na zdjęciu widać obszary zórz polarnych na Saturnie (zdjęcie wykonano w nadfiolecie, więc jego kolory są sztuczne).

W Polsce również obserwuje się czasem zorzę polarną. Można ją dojrzeć wówczas, gdy na Słońcu nastąpi silny wyrzut materii słonecznej (rozbłysk). Zorze widoczne nisko nad horyzontem znajdują się kilkaset kilometrów od obserwatora.

# 19. Indukcja elektromagnetyczna. Część 1.

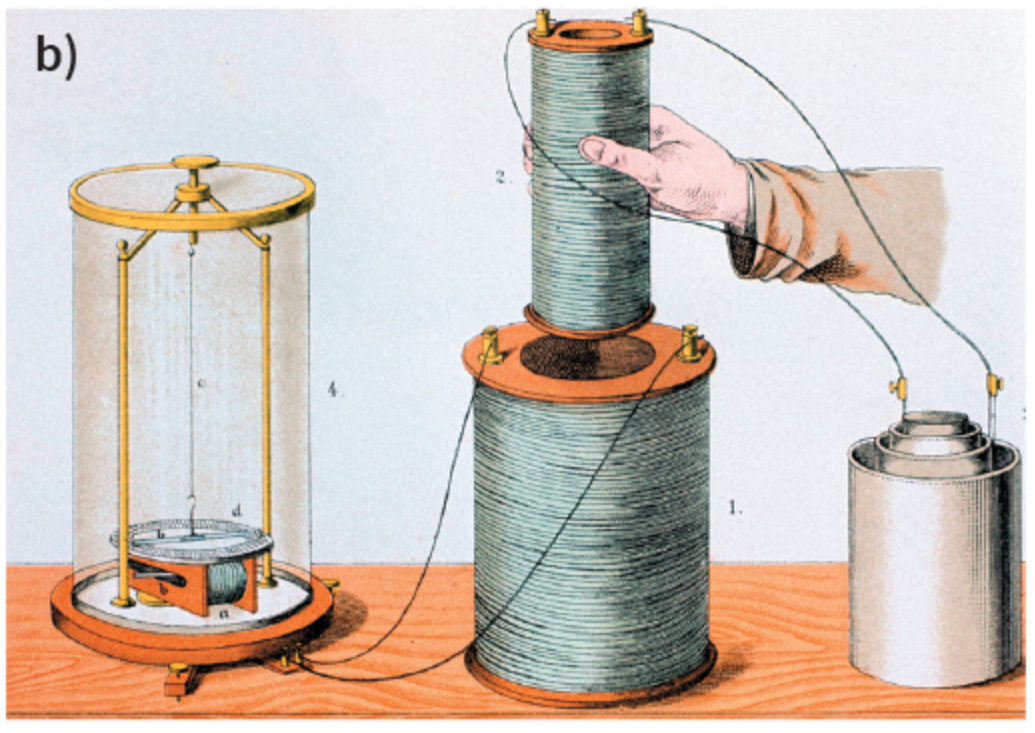
- Obwód poruszający się w polu magnetycznym
- Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

➔ **Przypomnij sobie**, czym jest prąd elektryczny, jak działa elektromagnes oraz jaka siła działa na cząstki naładowane, poruszające się w polu magnetycznym.

Przepływ ładunków w obwodzie elektrycznym można uzyskać przez podłączenie go do ogniwa. Okazuje się, że nie jest to jedyny sposób na uzyskanie prądu. Pole magnetyczne również może powodować przepływ ładunków i właśnie dzięki temu zjawisku powstaje prąd, z którego korzystamy w naszych mieszkaniach.

## Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

W pierwszej połowie XIX wieku angielski fizyk Michael Faraday odkrył, że prąd elektryczny może powstać w wyniku ruchu obwodu w polu magnetycznym. W swoim doświadczeniu jako źródła pola magnetycznego używał elektromagnesu, czyli zwojnicy podłączonej do ogniwa (ryc. 19.1). Faraday wkładał elektromagnes do wnętrza drugiej zwojnicy, podłączonej do amperomierza, i wyciągał go z tej zwojnicy. W obu przypadkach przez zwojnicę płynął prąd. Wzbudzanie prądu przez pole magnetyczne nazwano zjawiskiem **indukcji elektromagnetycznej**, a powstający prąd – **prądem indukcyjnym**.




**Ryc. 19.1.** Laboratorium Faradaya w Royal Institution w Londynie (a); schemat doświadczenia wykonanego przez Faradaya (b)

Warto jest powtórzyć doświadczenie Faradaya. Zamiast zwojnicy podłączonej do baterii jako źródło pola magnetycznego wykorzystamy magnes. Zwojnicę, w której widać kierunek nawijania zwojów, podłączamy do cyfrowego amperomierza (ryc. 19.2). Następnie poruszamy zwojnicą i magnesem względem siebie.

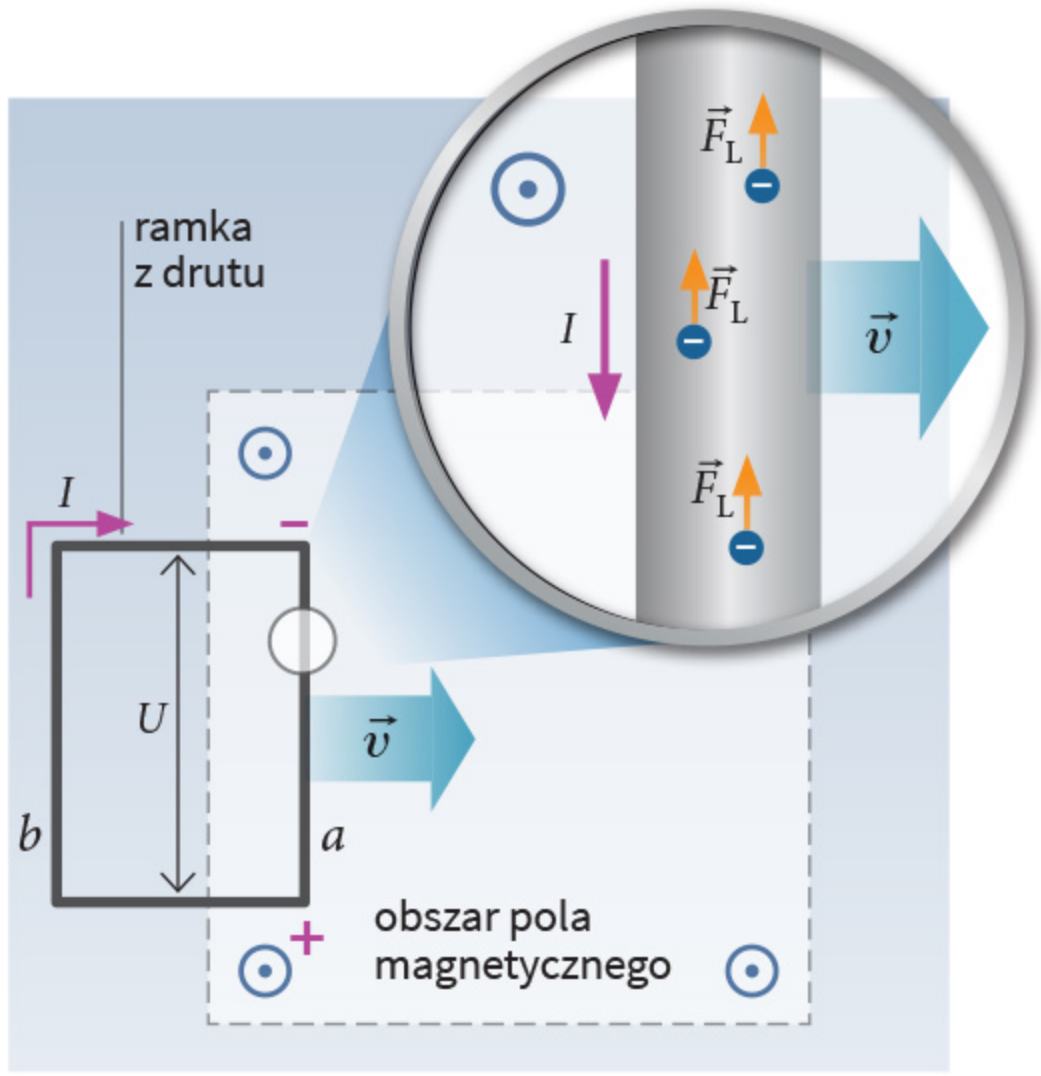
Amperomierz pokazuje, że prąd elektryczny powstaje zarówno wówczas, gdy porusza się magnes, jak i wtedy, gdy porusza się zwojnica. Im szybszy jest ruch względny magnesu i zwojnicy, tym większe jest natężenie prądu wskazywane przez amperomierz. Jeśli podczas zbliżania magnesu do zwojnicy przed wartością natężenia prądu miernik pokazuje znak „–", to podczas oddalania magnesu od zwojnicy tego znaku nie ma. Oznacza to, że podczas zbliżania magnesu i zwojnicy prąd płynie w stronę przeciwną niż podczas ich oddalania. Prąd indukcyjny w zwojnicy powstanie również wówczas, gdy będziemy przesuwać zwojnicę prostopadle do magnesu (ryc. 19.3).

**Ryc. 19.2.** Wzbudzanie prądu w zwojnicy zbliżającej się do magnesu

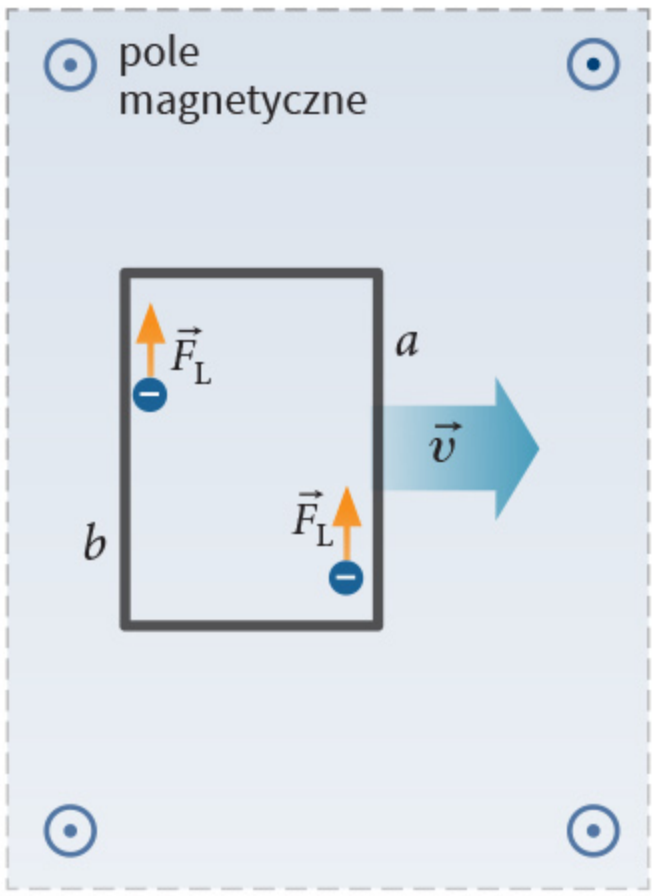
**Ryc. 19.3.** Zwojnica porusza się w kierunku prostopadłym do osi magnesu

## Ramka w polu magnetycznym

W tym rozdziale wyjaśnimy mechanizm powstawania prądu w wyniku ruchu zwojnicy względem nieruchomego magnesu. Zamiast całej zwojnicy pokazanej na rycinie 19.3 przeanalizujemy ruch jednej ramki z drutu. Załóżmy, że ramka ta wchodzi z pewną prędkością w obszar jednorodnego pola magnetycznego, prostopadle do linii pola. Na każdy elektron znajdujący się w przewodzie poruszającym się w polu magnetycznym działa siła Lorentza, prostopadła do prędkości przewodu oraz do linii pola magnetycznego. Siła ta powoduje przemieszczanie się elektronów swobodnych (ryc. 19.4). Nadmiar elektronów w górnej części ramki i ich niedobór w dolnej powoduje powstanie pola elektrycznego,




**Ryc. 19.4.** Mechanizm przesuwania elektronów w ramce wchodzącej w pole magnetyczne




**Ryc. 19.5.** W ramce poruszającej się w jednorodnym polu magnetycznym nie powstaje prąd elektryczny

wywołującego prąd w całej ramce. Wobec tego siła magnetyczna może być źródłem napięcia w obwodzie, tak jak ogniwo.

Gdy cała ramka znajdzie się w obszarze jednorodnego pola magnetycznego, siła magnetyczna działająca na elektrony w bokach *a* i *b* ramki będzie wymuszała ich obieg w przeciwne strony, więc prąd w ramce nie powstanie (ryc. 19.5).

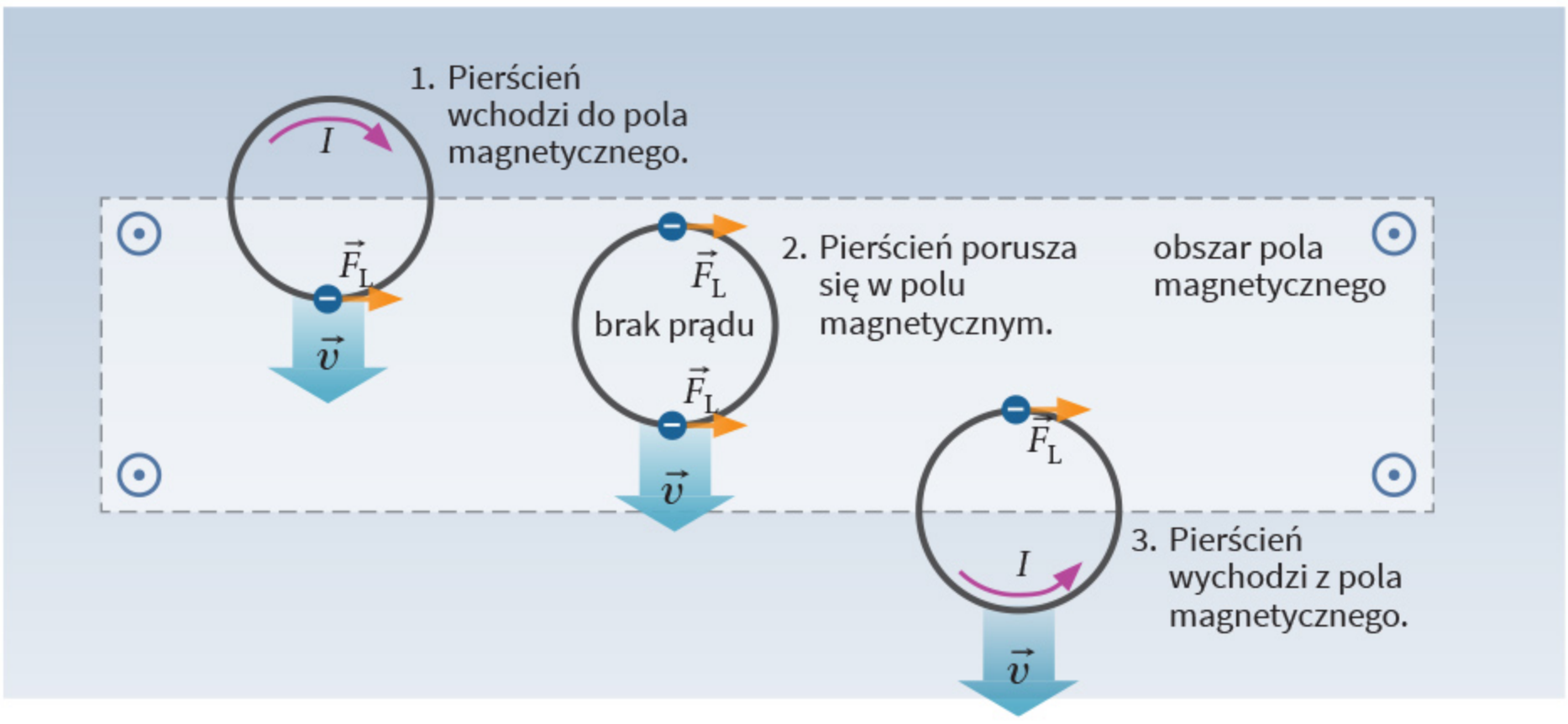
Powstawanie prądu w ramce poruszającej się prostopadle do linii pola magnetycznego jest prostym modelem, wyjaśniającym mechanizm indukcji elektromagnetycznej. W podobny sposób powstaje prąd, gdy zwojnica zbliża się do nieruchomego magnesu. W tej sytuacji pole magnetyczne obejmowane przez zwojnicę narasta. Siły magnetyczne działające na elektrony w poszczególnych częściach zwojnicy spowodują przepływ prądu.

**PRZYKŁAD 1.**

Metalowy pierścień przechodzi przez obszar jednorodnego pola magnetycznego. Wyznaczmy kierunek prądu elektrycznego powstającego w pierścieniu podczas przechodzenia przez to pole.

Ruch pierścienia można podzielić na trzy etapy.

1. Pierścień wchodzi w obszar pola magnetycznego. Siła magnetyczna działająca na elektrony w dolnej części pierścienia powoduje ich ruch w prawo. Powstaje prąd elektryczny płynący zgodnie z ruchem wskazówek zegara.
2. Pierścień przechodzi przez obszar pola magnetycznego. Prąd nie płynie.
3. Pierścień wychodzi z obszaru pola magnetycznego. Siła magnetyczna działająca na elektrony w górnej części ramki powoduje przepływ prądu przeciwnie do ruchu wskazówek zegara.



## WARTO WIEDZIEĆ

**Opodatkowane odkrycie Faradaya**

The Royal Institution of Great Britain to brytyjskie stowarzyszenie naukowo-edukacyjne, którego głównym celem jest popularyzacja nauki. Jednym z członków tego stowarzyszenia był Michael Faraday. Uczony ten w roku 1825 zainicjował serię wykładów popularyzujących osiągnięcia naukowe. Anegdota mówi, że po jednym z wykładów do Faradaya podszedł minister odpowiedzialny za finanse rządu brytyjskiego i zapytał, co właściwie ludzkość będzie miała z odkrycia możliwości otrzymywania prądu w wyniku ruchu zwojnicy w polu magnetycznym. Faraday odparł, iż nie ma pojęcia, ale jest pewien, że praktyczne wykorzystanie tego zjawiska zostanie opodatkowane. Obecnie systemy energetyczne na całym świecie wykorzystują odkrycie Faradaya, a stawka podatku VAT dla indywidualnych odbiorców energii elektrycznej w Polsce w roku 2020 wynosiła 23 %.

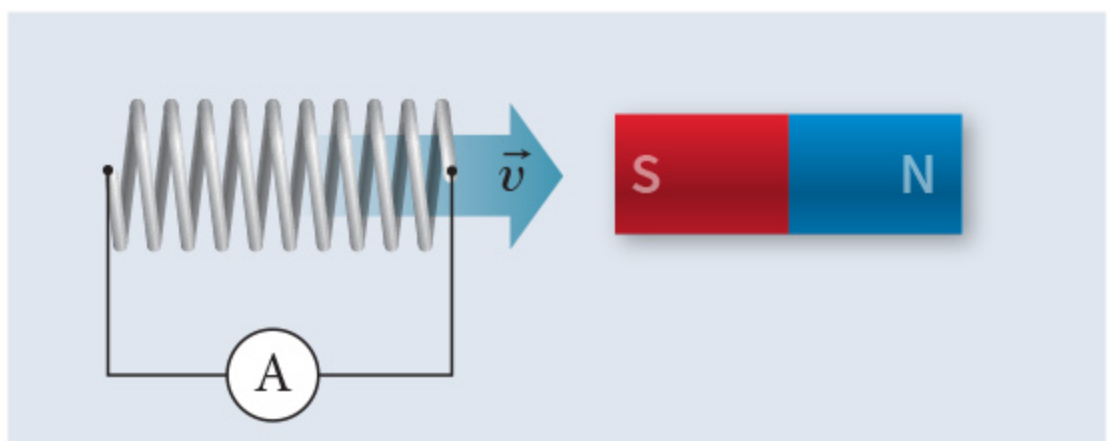
Prąd powstający w wyniku indukcji elektromagnetycznej w pojedynczej ramce jest bardzo mały, dlatego w doświadczeniu na początku rozdziału opisywaliśmy zwojnicę składającą się z wielu ramek. Napięcia, które powstają w każdej z ramek, dodają się, dzięki czemu natężenie prądu płynącego w obwodzie jest znacznie większe.

## PODSUMOWANIE

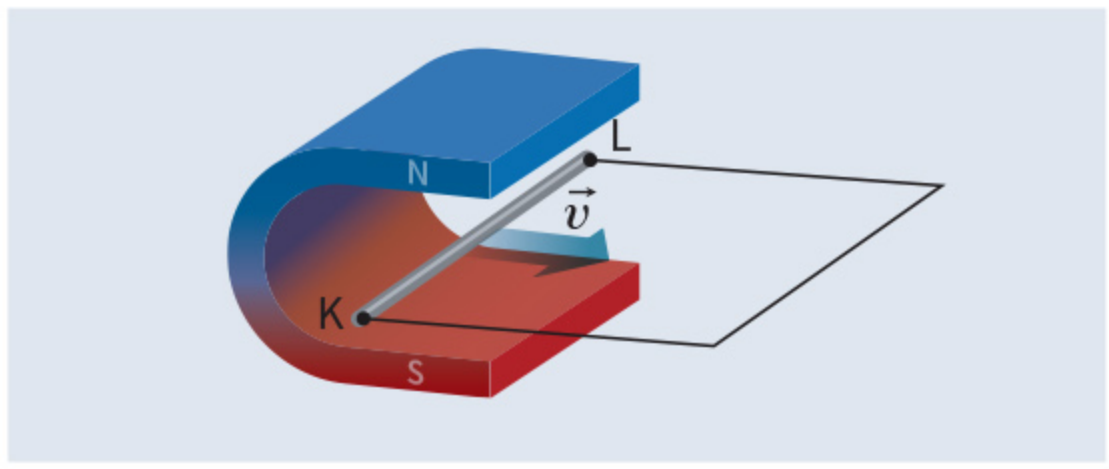
- **Indukcja elektromagnetyczna** to zjawisko wzbudzania prądu przez pole magnetyczne.
- Przyczyną powstawania prądu w obwodzie poruszającym się w polu magnetycznym jest siła magnetyczna działająca na elektrony.
- Obwód może się zbliżać do źródła pola magnetycznego lub też od niego oddalać. Im większa prędkość obwodu, tym większe natężenie powstającego w nim prądu.

## PYTANIA I ZADANIA

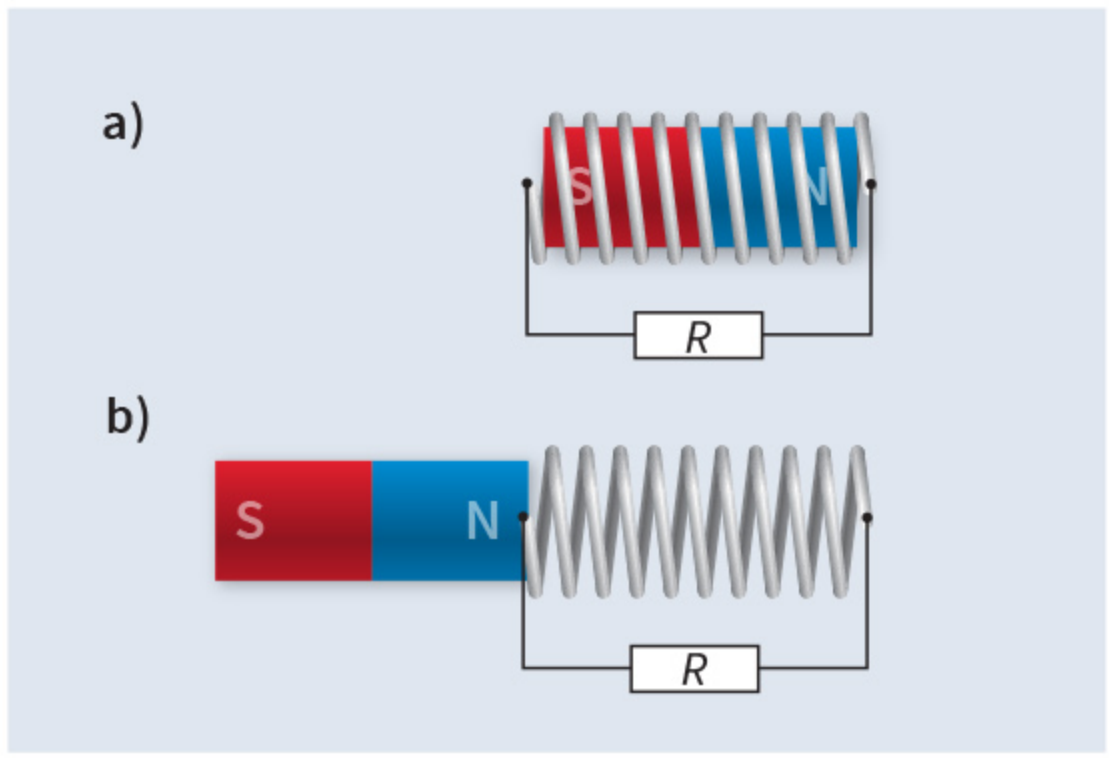
**1.** Uczniowie zbliżali zwojnicę do magnesu. Za pierwszym razem prędkość zwojnicy była niewielka, a za drugim dużo większa. W której sytuacji w zwojnicy powstał prąd o większym natężeniu?



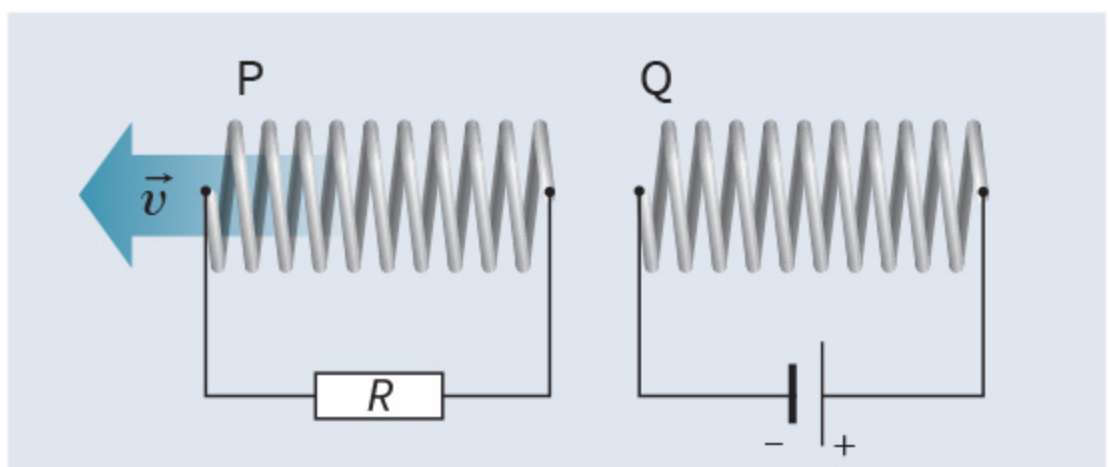

**2.** Przewód KL (ryc.) jest wyciągany z obszaru pola magnetycznego. Końce tego przewodu połączono ze sobą, tak że powstał zamknięty obwód. W którą stronę popłynie prąd w tym obwodzie?



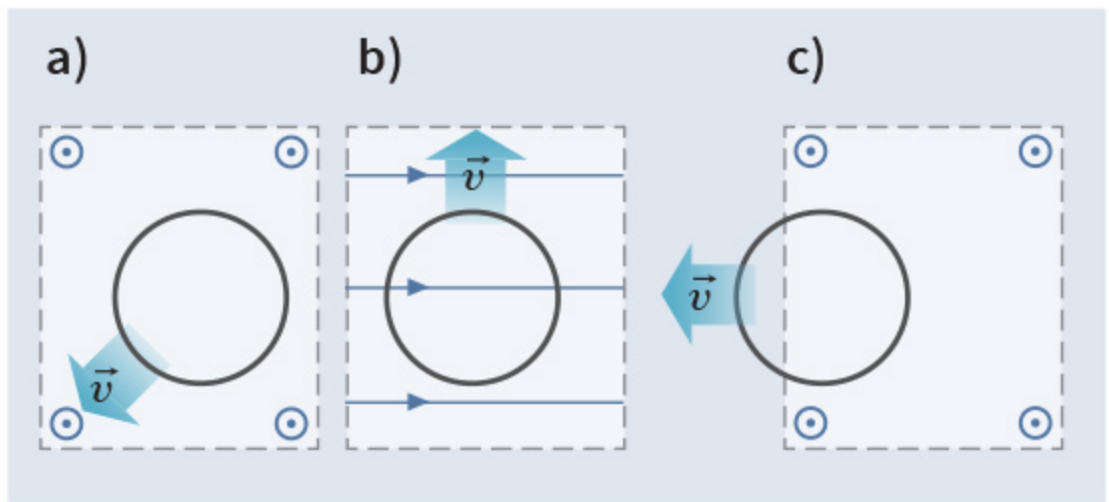

**3.** Podczas doświadczeń ze zjawiskiem indukcji elektromagnetycznej jeden z uczniów stwierdził, że do wytworzenia prądu indukcyjnego wystarczy umieszczenie magnesu wewnątrz zwojnicy. Drugi uczeń zaproponował, żeby jednak umieścić ten magnes na zewnątrz zwojnicy. Czy w którymś z tych przypadków popłynie prąd indukcyjny? Uzasadnij odpowiedź.




**4.** Do końców zwojnicy P podłączony jest opornik, a końce zwojnicy Q są połączone z baterią. Zwojnica P oddala się od zwojnicy Q. Czy w zwojnicy P powstanie prąd indukcyjny? Uzasadnij odpowiedź.




**5.** W której z przedstawionych sytuacji w metalowym pierścieniu powstanie prąd indukcyjny? W każdej sytuacji pole magnetyczne jest jednorodne, a ruch pierścienia – jednostajny.



# 20. Indukcja elektromagnetyczna. Część 2.

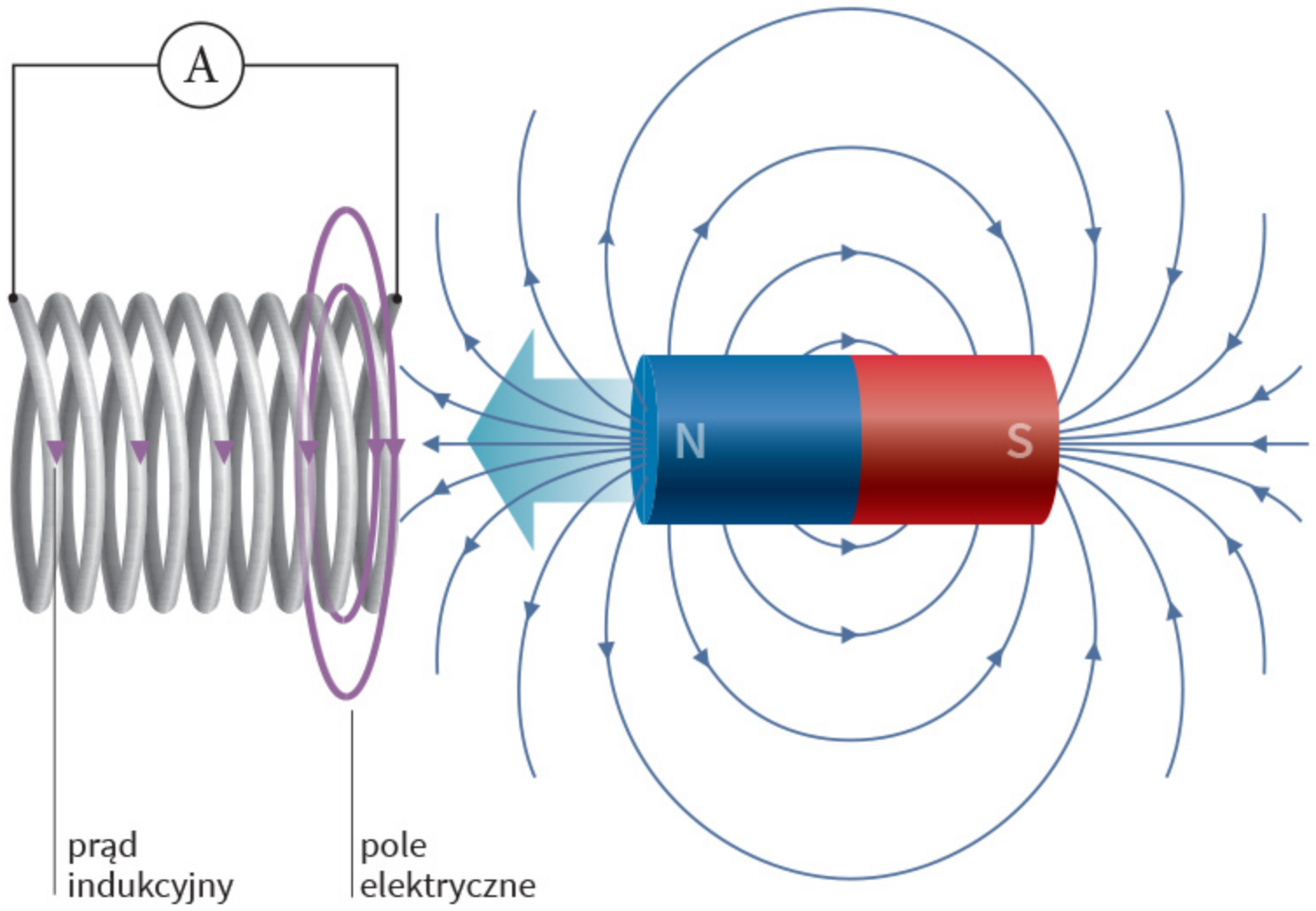
- Powstawanie prądu w nieruchomym obwodzie
- Fale elektromagnetyczne

➔ **Przypomnij sobie** mechanizm powstawania prądu elektrycznego w wyniku indukcji elektromagnetycznej.

W poprzednim rozdziale omawialiśmy powstawanie prądu, gdy obwód porusza się względem pola magnetycznego. Teraz wyjaśnimy przyczyny powstawania prądu, gdy obwód jest nieruchomy, a zmienia się pole magnetyczne.

## Powstawanie prądu w nieruchomym obwodzie

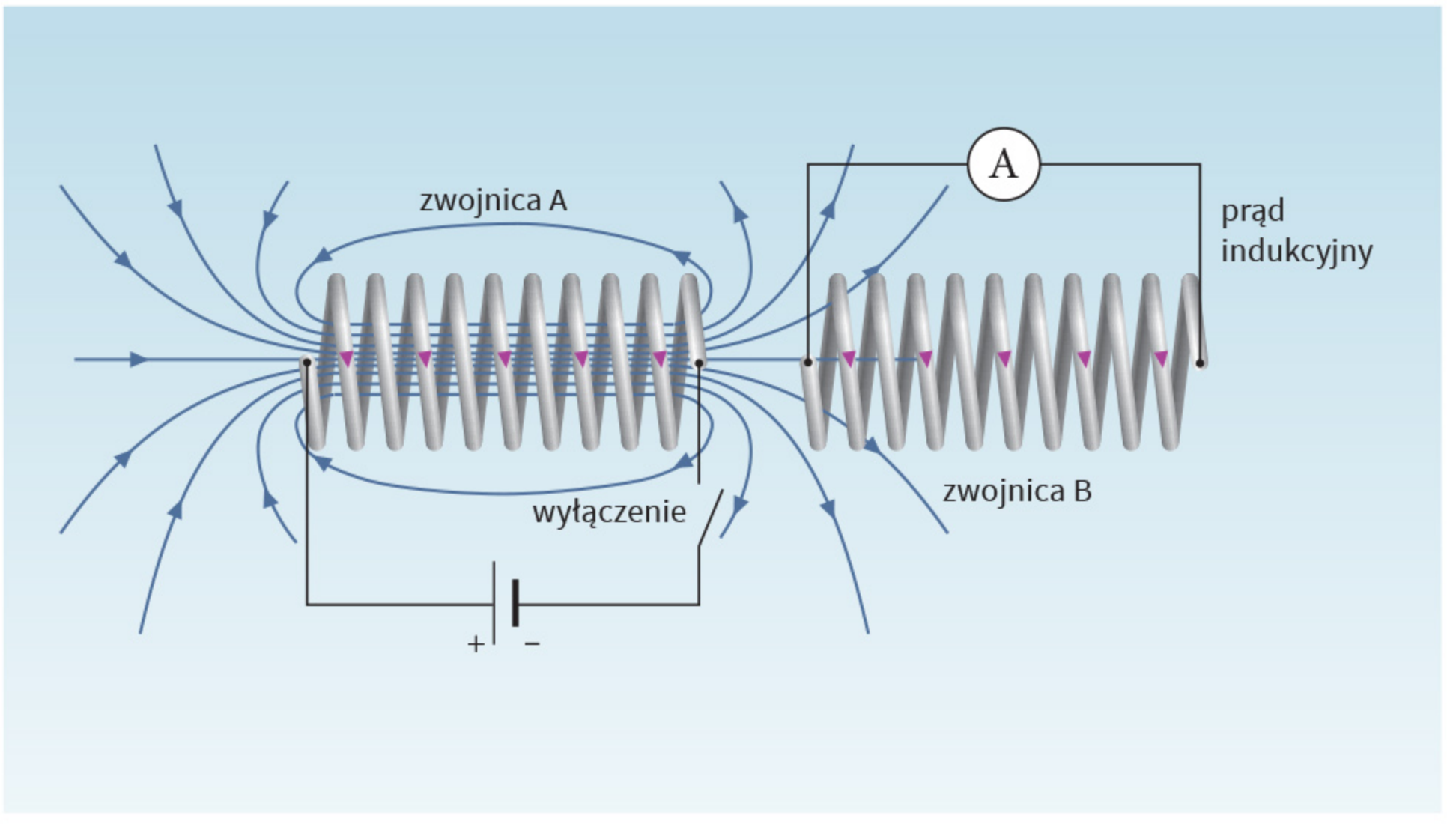
Wiemy z poprzedniego rozdziału, że siła magnetyczna jest przyczyną powstawania prądu w zwojnicy poruszającej się w polu magnetycznym. W nieruchomej zwojnicy też powstanie prąd, gdy obok niej będzie poruszał się magnes (ryc. 20.1). Wynika to z faktu, że ruch jest względny. Jednak w tym przypadku na nieruchome elektrony nie działa siła magnetyczna. Jaka zatem siła wymusza ich przepływ?




**Ryc. 20.1.** Powstawanie prądu elektrycznego w wyniku zbliżania magnesu do zwojnicy. Zwojnica znajduje się w zmiennym polu magnetycznym

Okazuje się, że wokół zmiennego w czasie pola magnetycznego powstaje tzw. **wirowe pole elektryczne**. Jego linie tworzą okręgi prostopadłe do linii pola magnetycznego. Gdy to wirowe pole elektryczne obejmuje zwojnicę, powoduje w niej przepływ elektronów, czyli wzbudza prąd elektryczny.

Źródłem zmiennego pola magnetycznego może być elektromagnes i wówczas zwojnica oraz elektromagnes mogą być względem siebie w spoczynku. Spójrzmy na rycinę 20.2. Elektromagnes (zwojnica A) jest podłączony do baterii, więc jest źródłem pola magnetycznego. Obok ustawiamy zwojnicę B, do której podłączamy amperomierz. Gdy przez elektromagnes płynie stały prąd, to amperomierz włączony do obwodu zwojnicy B nie wskazuje przepływu prądu, gdyż nie zmienia się pole magnetyczne w jej wnętrzu. Dopiero wyłączenie prądu w elektromagnesie oznacza nagłą zmianę pola magnetycznego, gdyż pole po prostu zniknie. W tym momencie powstanie wirowe pole elektryczne, w którym zanurzona jest zwojnica B. W zwojnicy B wzbudzi się na chwilę prąd elektryczny.



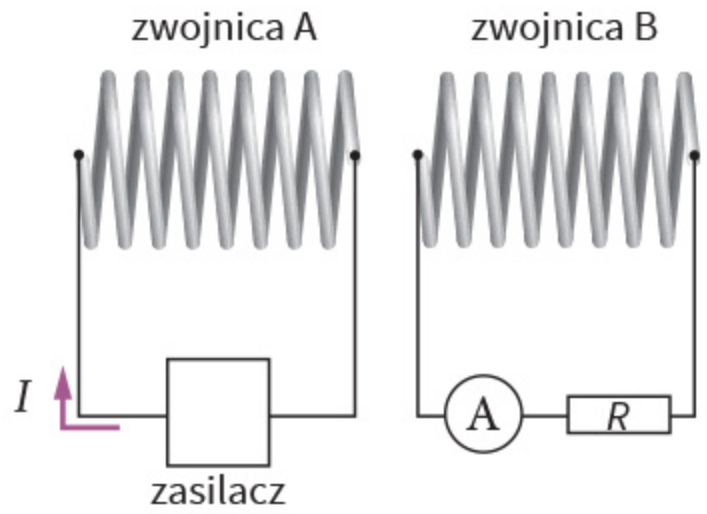

**Ryc. 20.2.** Powstawanie prądu elektrycznego w wyniku zaniku pola magnetycznego

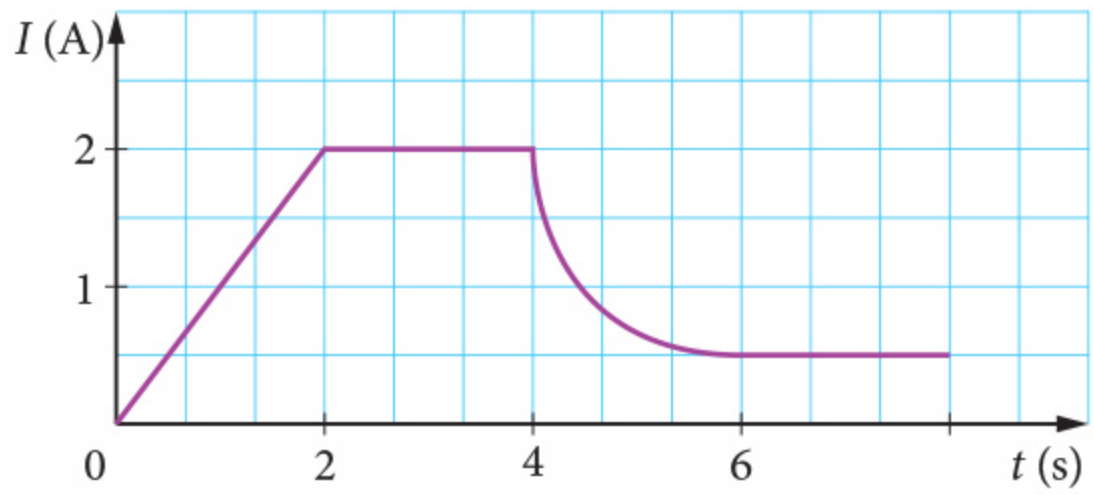
Prąd w zwojnicy B powstanie również wtedy, gdy włączymy prąd zasilający elektromagnes. Tym razem prąd popłynie w przeciwną stronę niż w przypadku pokazanym na rycinie 20.2. Zmiany prądu w elektromagnesie wywołują zmiany jego pola magnetycznego, co powoduje powstawanie prądu w zwojnicy B.

Podsumujmy wnioski uzyskane w tym i poprzednim rozdziale. Gdy pewna część obwodu porusza się w polu magnetycznym, prąd powstaje w wyniku działania siły Lorentza na elektrony. Gdy natomiast obwód się nie porusza, ale zmienia się pole magnetyczne, prąd zaczyna płynąć dzięki powstawaniu wirowego pola elektrycznego. W obydwu przypadkach **prąd powstaje wtedy, gdy zmienia się pole magnetyczne w obrębie obwodu**.

**PRZYKŁAD 1.**

Dwie zwojnice ustawiono obok siebie. Zwojnica A jest podłączona do zasilacza, za pomocą którego można zmieniać natężenie płynącego w niej prądu. Do zwojnicy B podłączone są opornik oraz amperomierz, który pokazuje natężenie prądu indukcyjnego powstającego w zwojnicy. Na wykresie przedstawiono zależność natężenia prądu w zwojnicy A od czasu.
W których przedziałach czasu w zwojnicy B płynął prąd?




Prąd indukcyjny powstaje w zwojnicy B, gdy zmienia się obejmowane przez nią pole magnetyczne. Zmiana natężenia prądu w zwojnicy A wywołuje zmianę pola magnetycznego wokół niej. Wobec tego w zwojnicy B powstanie prąd indukcyjny, gdy zmieniać się będzie natężenie prądu w zwojnicy A. W czasie pierwszych dwóch sekund natężenie prądu w zwojnicy A rośnie, a zatem rośnie pole magnetyczne wewnątrz zwojnicy B, więc pojawia się w niej prąd indukcyjny. Od drugiej do czwartej sekundy nie zmienia się natężenie prądu w zwojnicy A, a zatem pole magnetyczne jest stałe i prąd w zwojnicy B nie płynie. Od czwartej do szóstej sekundy natężenie prądu maleje, zatem słabnie pole magnetyczne, więc w zwojnicy B płynie prąd, ale w stronę przeciwną niż poprzednio. Począwszy od szóstej sekundy, natężenie prądu w zwojnicy A, a więc i pole magnetyczne są stałe, zatem prąd w zwojnicy B nie płynie.

## WARTO WIEDZIEĆ

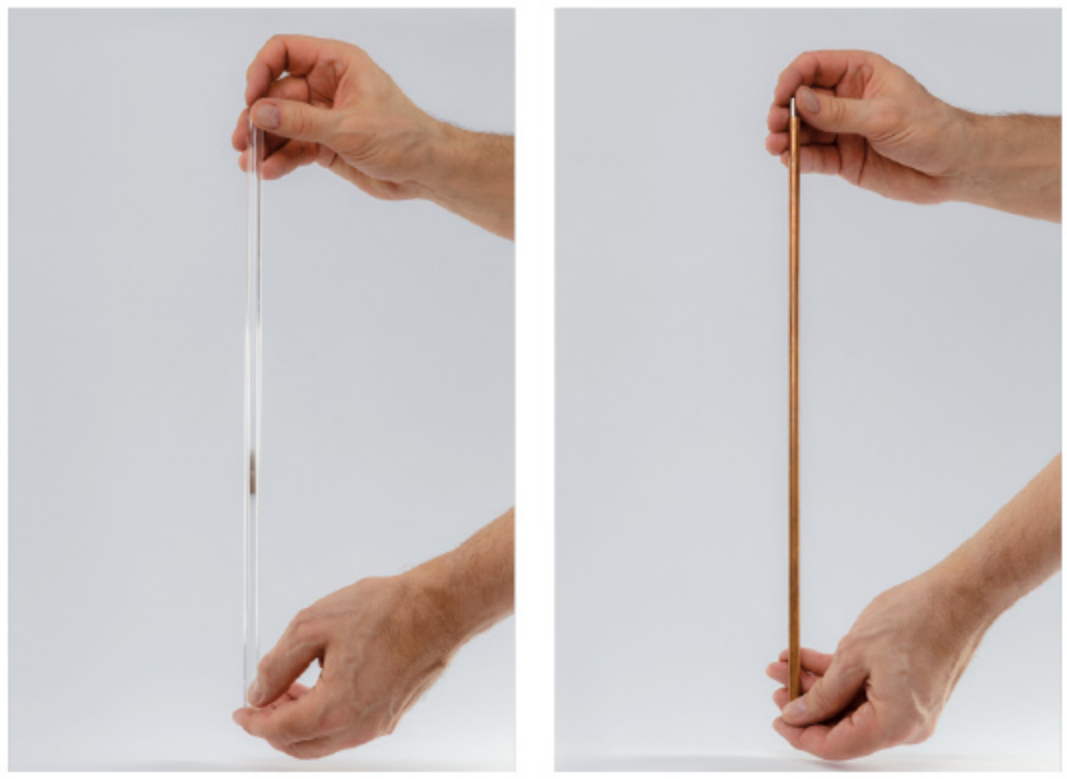
**Kuchenka indukcyjna**

Pod szklanym blatem kuchenki indukcyjnej znajdują się zwoje, przez które przepływa prąd. Kierunek tego prądu może się zmieniać nawet 50 tysięcy razy na sekundę, więc jest źródłem zmiennego pola magnetycznego. Konstrukcja kuchenki sprawia, że obszar najsilniejszego pola obejmuje dno garnka. Powinno ono być wykonane z materiału ferromagnetycznego, gdyż wówczas pole magnetyczne wewnątrz niego będzie silniejsze. Zmienne pole magnetyczne wzbudza w dnie garnka prąd elektryczny, który powoduje jego ogrzewanie. Gdy na blacie kuchenki, nad włączoną spiralą z prądem, położymy dłoń, prąd, który powstanie w dłoni, będzie bardzo słaby, więc nic nie odczujemy.

**DOŚWIADCZENIE 1.**

Do przeprowadzenia doświadczenia będą potrzebne dwie rurki – plastikowa i miedziana (lub aluminiowa) oraz magnes neodymowy mieszczący się w rurkach. Obie rurki należy ustawić pionowo, tak jak pokazano na fotografii.

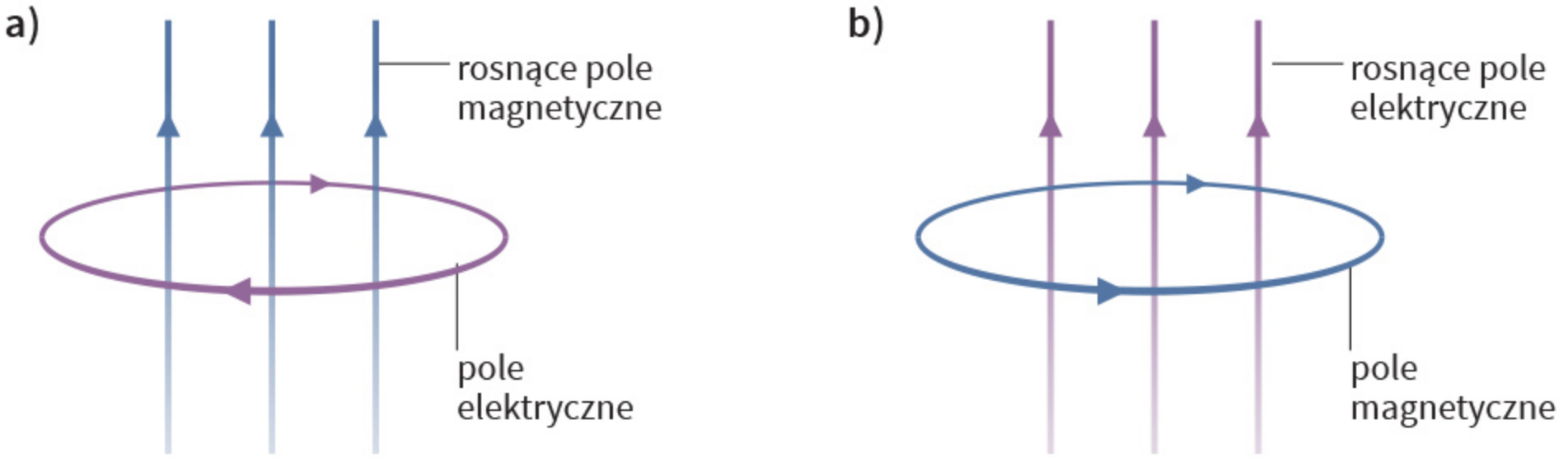
Przepuść magnes najpierw przez jedną, a potem przez drugą rurkę. Porównaj ruch magnesu w obu rurkach. Wyjaśnij obserwowane zjawisko.



## Fale elektromagnetyczne

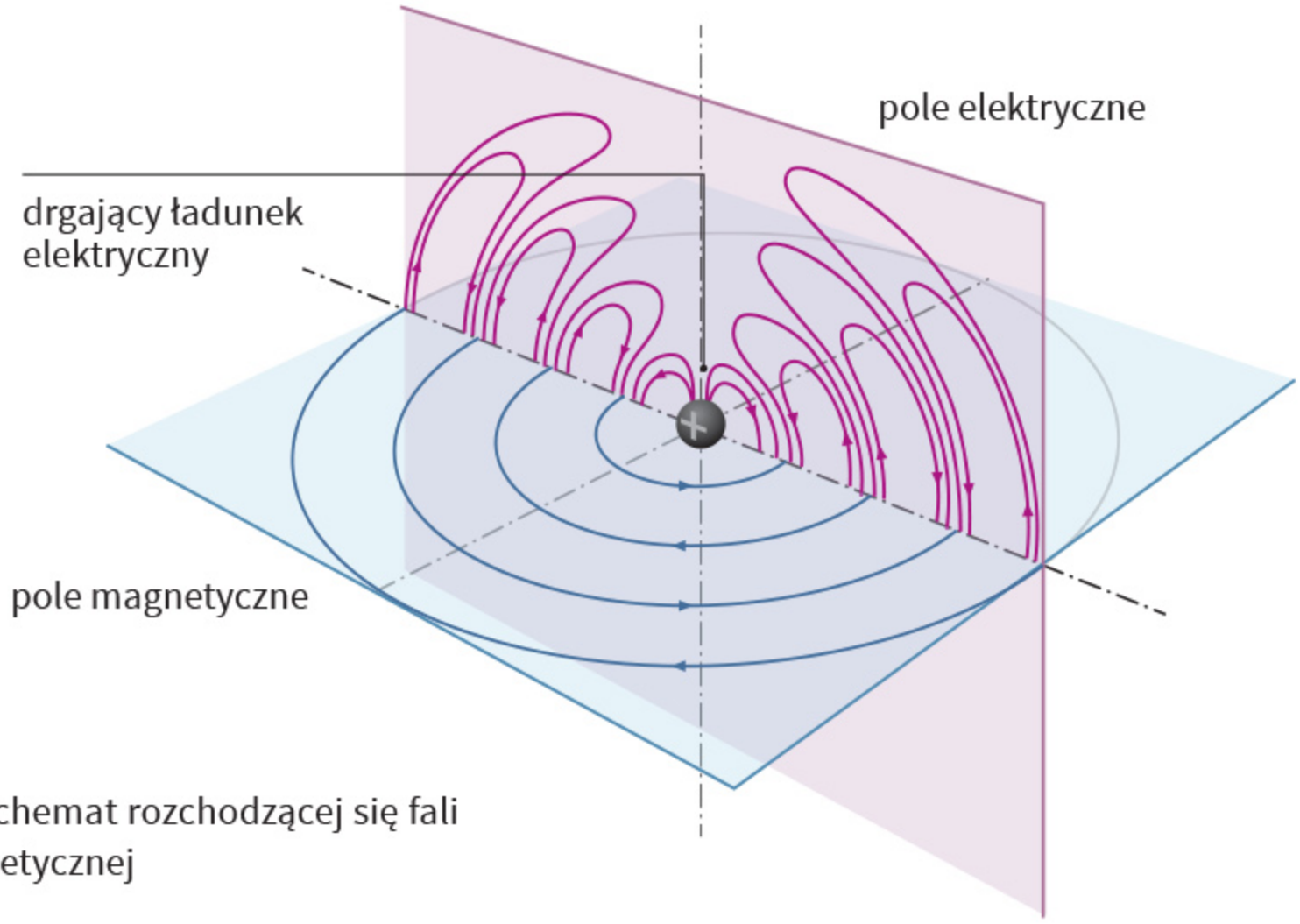
Związek między zjawiskami elektrycznymi oraz magnetycznymi w matematyczny sposób opisał w połowie XIX wieku szkocki uczony James Clerk Maxwell. Za pomocą równań udowodnił, że elektryczność i magnetyzm są w istocie dwoma rodzajami tego samego zjawiska – elektromagnetyzmu. Z równań Maxwella wynika, że związane ze sobą pola elektryczne i magnetyczne rozchodzą się w próżni z prędkością światła.

Gdy w pewnym miejscu przestrzeni wytworzymy zmienne w czasie pole magnetyczne, wokół tego pola powstanie wirowe pole elektryczne (ryc. 20.3a). Linie pola elektrycznego są prostopadłe do linii pola magnetycznego. Zasługą Maxwella było odkrycie, że gdy w pewnym miejscu przestrzeni wytworzymy zmienne w czasie pole elektryczne, wokół jego linii powstanie wirowe pole magnetyczne (ryc. 20.3b). Do powstania pola magnetycznego nie potrzeba zatem prądu elektrycznego, wystarczy zmienne pole elektryczne. Linie pola magnetycznego są prostopadłe do linii pola elektrycznego.




**Ryc. 20.3. a)** Wokół zmiennego pola magnetycznego powstaje wirowe pole elektryczne. **b)** Wokół zmiennego pola elektrycznego powstaje wirowe pole magnetyczne

Wobec tego gdy w pewnym miejscu przestrzeni zmieni się pole elektryczne, natychmiast powstanie wokół jego linii wirowe pole magnetyczne. Wokół zmiennego pola magnetycznego powstanie z kolei wirowe pole elektryczne. W ten sposób w przestrzeni rozchodzi się ciąg związanych ze sobą wzajemnie pól magnetycznych i elektrycznych (o dość skomplikowanym kształcie), nazywany **falą elektromagnetyczną** (ryc. 20.4). Źródłem fali elektromagnetycznej jest każdy przyspieszający ładunek elektryczny, dlatego świat wokół nas wypełniony jest różnymi falami elektromagnetycznymi.




**Ryc. 20.4.** Schemat rozchodzącej się fali elektromagnetycznej

## PODSUMOWANIE

- Wokół zmiennego w czasie pola magnetycznego powstaje **wirowe pole elektryczne**.
- Wokół zmiennego w czasie pola elektrycznego powstaje **wirowe pole magnetyczne**.
- **Zjawisko indukcji elektromagnetycznej** może być wywołane zmianą natężenia prądu w elektromagnesie.
- **Fala elektromagnetyczna** to związane ze sobą pola magnetyczne i elektryczne, rozchodzące się w przestrzeni.

## PYTANIA I ZADANIA

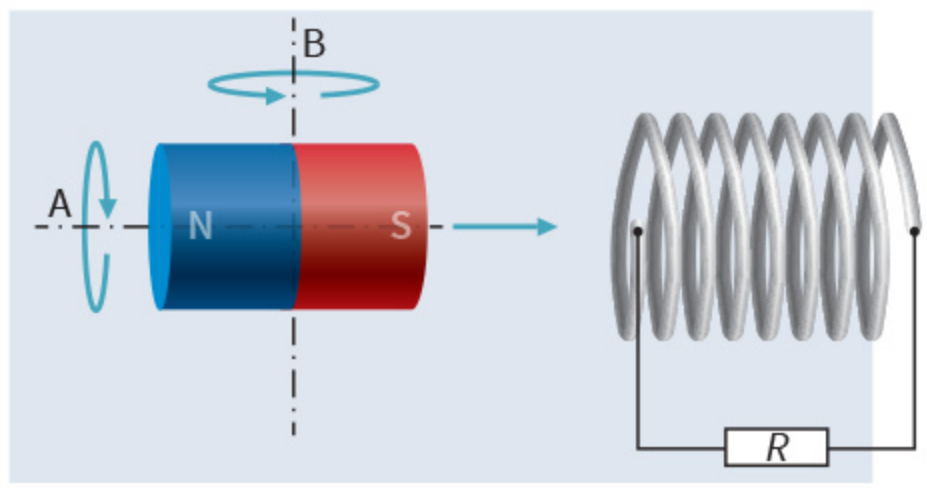
**1.** W pobliżu nieruchomej zwojnicy umieszczono magnes. W których przypadkach w zwojnicy powstanie prąd elektryczny?

**a)** Obrót magnesu wokół osi A.

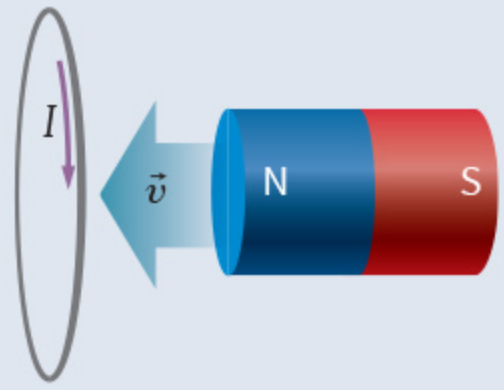
**b)** Obrót magnesu wokół osi B.

**c)** Ruch wzdłuż osi A.

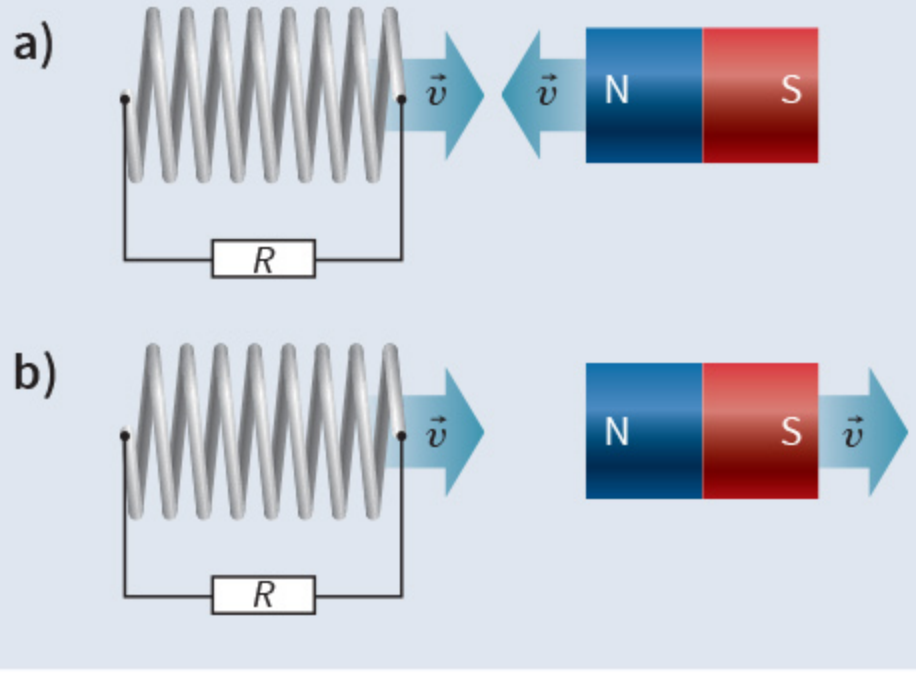
Uzasadnij odpowiedź.



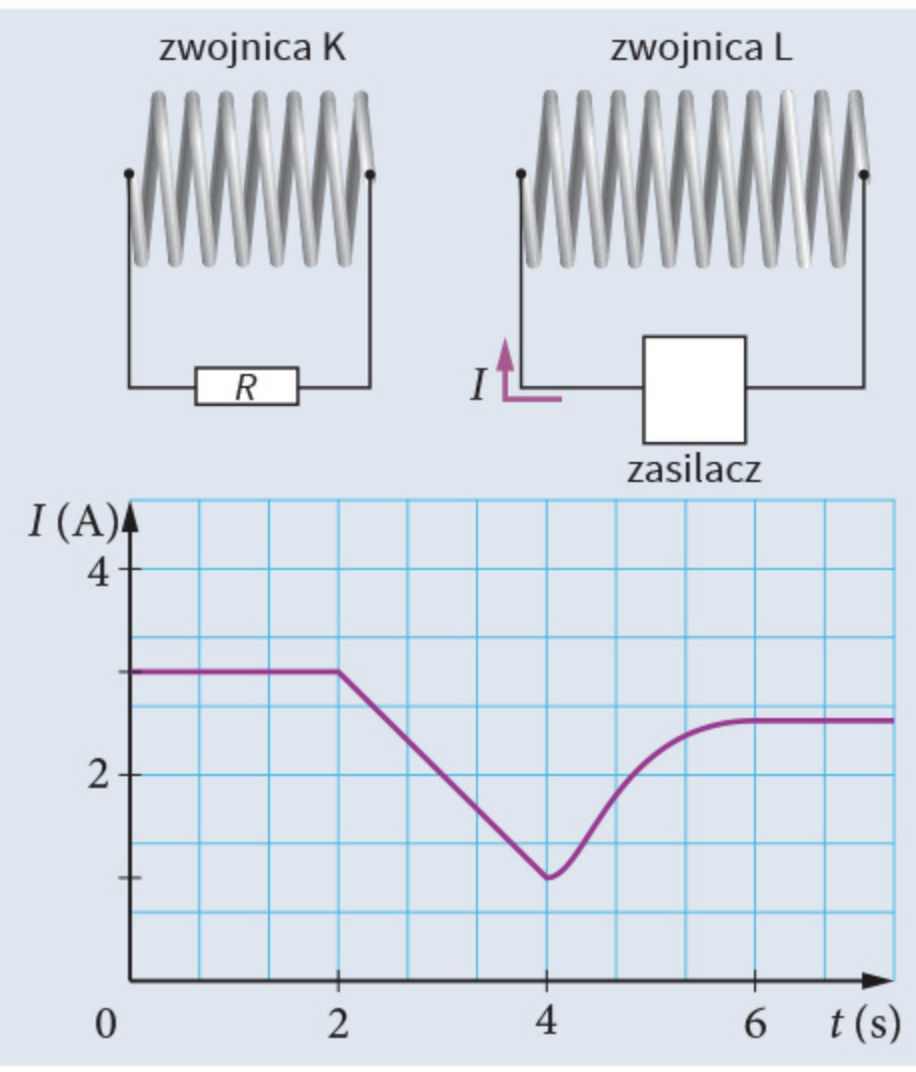
**2.** Podczas zbliżania magnesu do metalowego pierścienia płynie w nim prąd indukcyjny w stronę pokazaną na rysunku. W którą stronę będzie płynął prąd w pierścieniu, gdy magnes będzie się do niego zbliżał biegunem S?



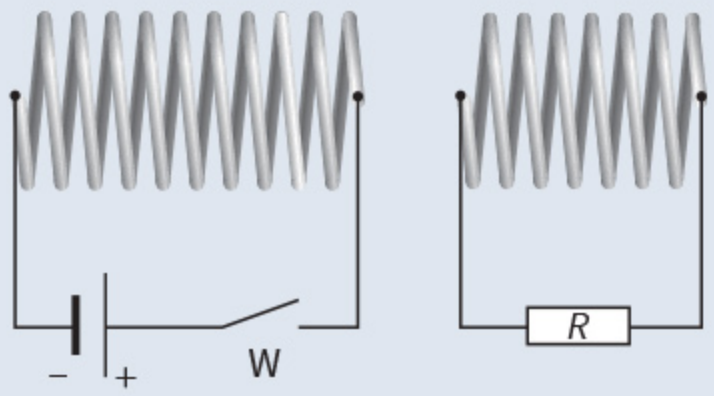

**3.** W której z sytuacji przedstawionych na rysunkach w zwojnicy zostanie wzbudzony prąd indukcyjny? Uzasadnij odpowiedź.




**4.** Obok zwojnicy L podłączonej do zasilacza ustawiono zwojnicę K, której końce połączono przewodem. Zależność natężenia prądu od czasu w zwojnicy L przedstawiono na wykresie. W których przedziałach czasu w zwojnicy K **nie** płynął prąd indukcyjny?




**5.** Obok siebie ustawiono dwie zwojnice. Do jednej z nich dołączono baterię, a do drugiej opornik. Za pomocą wyłącznika W można włączać i wyłączać prąd w zwojnicy podłączonej do baterii. W którym momencie w drugiej zwojnicy popłynie prąd indukcyjny: podczas włączania pierwszej zwojnicy, podczas jej wyłączania czy podczas przepływu przez pierwszą zwojnicę prądu stałego? Uzasadnij odpowiedź.



# 21. Prądnica

- Zasada działania prądnicy
- Przemiany energii w zjawisku indukcji elektromagnetycznej
- Odzyskiwanie energii elektrycznej

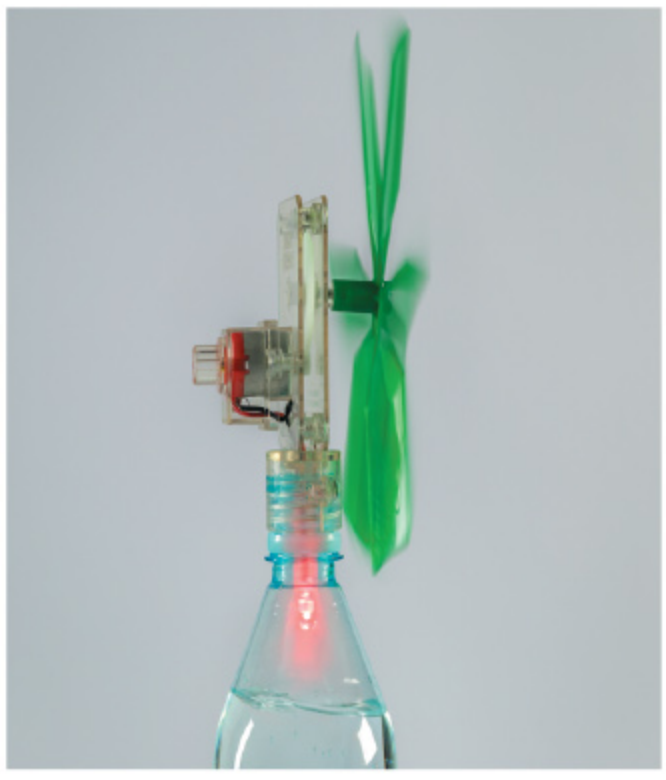
➔ **Przypomnij sobie** zjawisko indukcji elektromagnetycznej

Podczas podróży po Polsce można zobaczyć na polach obracające się wiatraki, które wytwarzają energię elektryczną. Nie są to podstawowe źródła energii elektrycznej w naszym kraju, ale łatwe do zauważenia. Obracające się śmigła wiatraków napędzają prądnice, czyli urządzenia wykorzystujące zjawisko indukcji elektromagnetycznej do wytwarzania prądu.

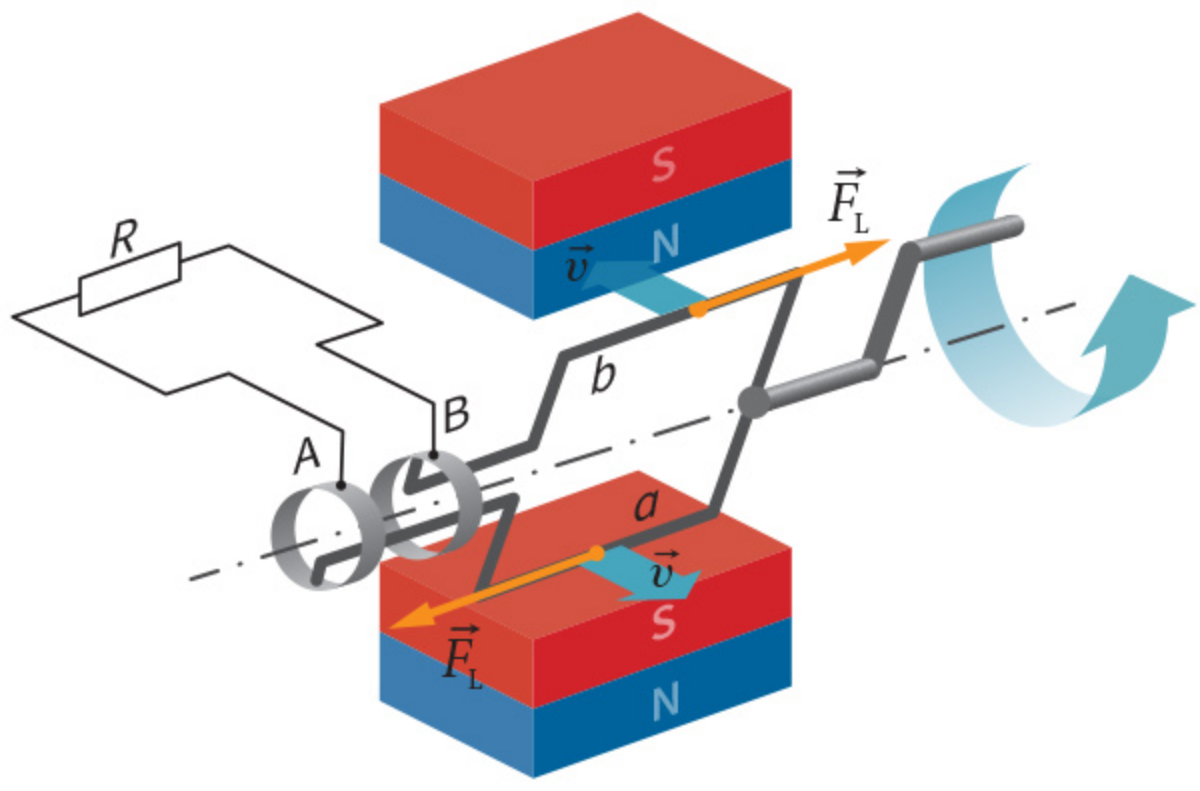
## Zasada działania prądnicy

W sklepach z zabawkami można kupić minielektrownie wiatrowe do samodzielnego złożenia (ryc. 21.1). Gotowe urządzenie postawione na wietrze wytwarza prąd, dzięki któremu świeci dioda. Tak właśnie działają elektrownie wiatrowe. Podstawowym urządzeniem w każdej elektrowni jest prądnica.

Wiemy już, że prąd elektryczny powstaje w obwodach, gdy zwojnica i magnes poruszają się względem siebie. Prąd powstanie również wówczas, gdy zwojnica będzie obracać się w polu magnetycznym. Najprostszym modelem prądnicy jest ramka z drutu umieszczona w polu magnetycznym (ryc. 21.2). Ramka jest tak zamocowana, aby mogła się obracać wokół osi prostopadłej do linii pola magnetycznego. Obrót ramki wymuszany



**Ryc. 21.1.** Po skierowaniu strumienia powietrza na łopatki wiatraka zaczyna świecić dioda

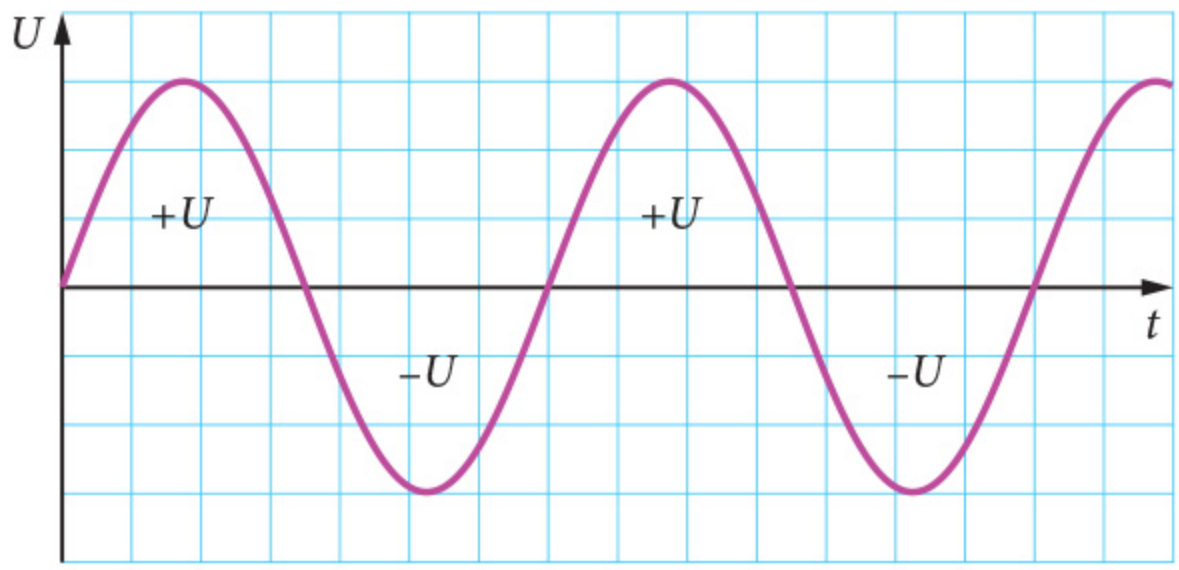



**Ryc. 21.2.** Model prądnicy

jest siłą zewnętrzną działającą na korbę. Do końców ramki przymocowane są metalowe pierścienie umożliwiające kontakt elektryczny z dołączonym obwodem.

Gdy bok *b* ramki będzie się od nas oddalał (jak na ryc. 21.2), siła magnetyczna działająca na elektrony w tym boku ramki będzie przesuwała je w prawo, natomiast siła działająca na elektrony w boku *a* – w lewo. W wyniku przesunięcia elektronów pomiędzy końcami ramki (zaciskami prądnicy) powstanie napięcie. Znak „ –” będzie przy zacisku A, gdyż w tę stronę przesuwane są elektrony, a przy zacisku B będzie wówczas ich niedomiar, czyli znak „+”.

Gdy wskutek obrotu bok *a* ramki znajdzie się na górze, elektrony będą kierowane do zacisku B, więc tym razem będzie przy nim znak „–”. W praktyce zmiany napięcia zachodzą płynnie. Na rycinie 21.3 przedstawiono zależność napięcia na zaciskach prądnicy od czasu. Napięcie przeciwne oznacza, że „plus” i „minus” na zaciskach zamieniają się miejscami.




**Ryc. 21.3.** Zależność napięcia na zaciskach prądnicy od czasu

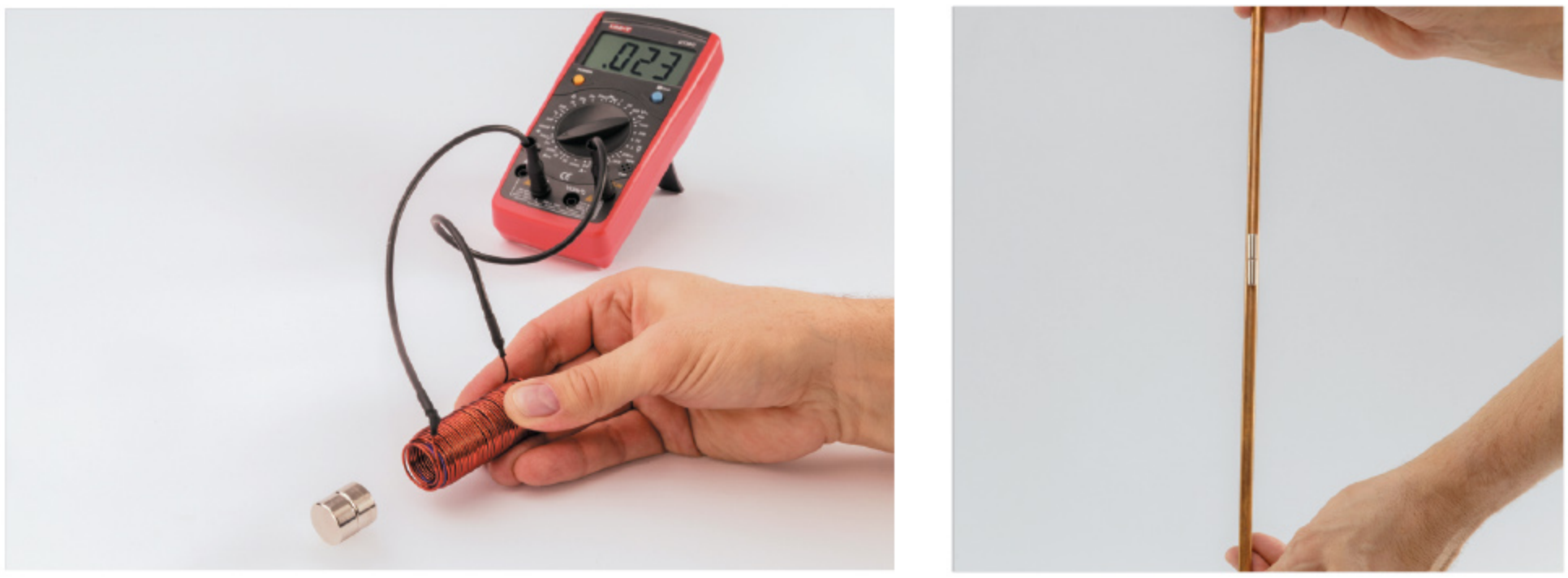
**Ryc. 21.4.** Zewnętrzna część prądnicy, która będzie używana w elektrowni

W rzeczywistych prądnicach obracający się element (wirnik) ma wiele zwojów. Są one jak ogniwa połączone szeregowo, więc całkowite napięcie jest równe sumie napięć na poszczególnych zwojach. Dlatego maksymalne napięcie uzyskiwane przez prądnicę jest tym większe, im więcej jest zwojów w obracającej się zwojnicy i – oczywiście – im szybciej ona wiruje. Często zresztą ze względów konstrukcyjnych bywa i tak, że zwojnica jest nieruchoma (ryc. 21.4), a wirującym elementem jest magnes.

## Przemiany energii w zjawisku indukcji elektromagnetycznej

Gdy źródłem napięcia w obwodzie jest bateria, to ona „wytwarza" energię elektryczną, którą do odbiorników przenosi prąd. Źródłem energii elektrycznej jest w tym przypadku energia wiązań między cząsteczkami. Co jest źródłem energii elektrycznej, którą przenosi prąd indukcyjny?

Gdy zbliżamy magnes do zwojnicy, płynie w niej prąd elektryczny. Przekonują nas o tym wskazania amperomierza (ryc. 21.5a). Źródłem energii potrzebnej do wytworzenia prądu jest praca siły przesuwającej magnes.



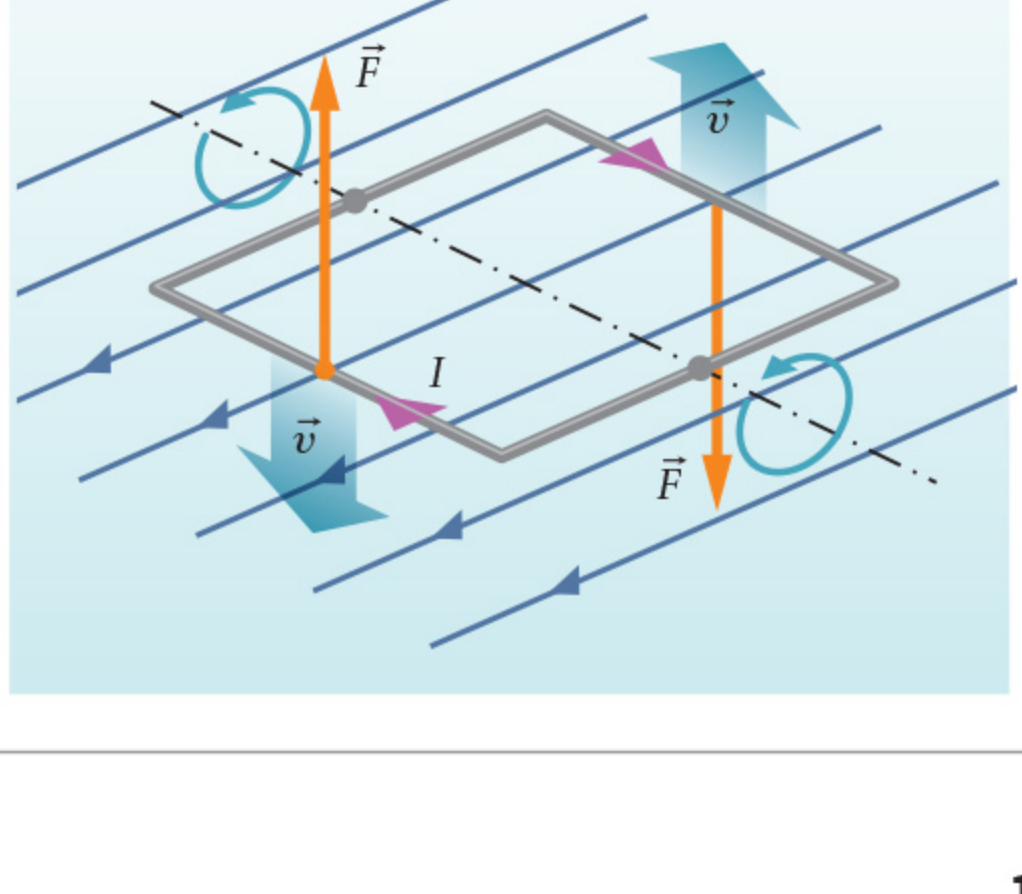

**Ryc. 21.5. a)** Powstawanie prądu indukcyjnego w zwojnicy podczas zbliżania magnesu. **b)** Hamowanie spadającego magnesu w miedzianej rurce

Gdy puścimy swobodnie magnes w miedzianej rurce (ryc. 21.5b), będzie spadał ze stałą prędkością. W tym przypadku maleje energia grawitacji magnesu, ale jego prędkość nie zwiększa się, zatem nie rośnie jego energia kinetyczna. Energia grawitacji podczas spadania zamienia się na energię powstającego wewnątrz rurki prądu indukcyjnego.

### WARTO WIEDZIEĆ

**Czy prąd może powstać „za darmo"?**

Jeśli w ramce obracającej się w polu magnetycznym płynie prąd, na jej boki działa siła elektrodynamiczna skierowana przeciwnie do prędkości jej ramion (ryc.). Siła ta hamuje obrót ramki. Aby mogła się ona ciągle obracać, na jej boki muszą działać siły zewnętrzne równoważące siłę elektrodynamiczną. Energia elektryczna, jak każda inna, nie może być uzyskana „za darmo".



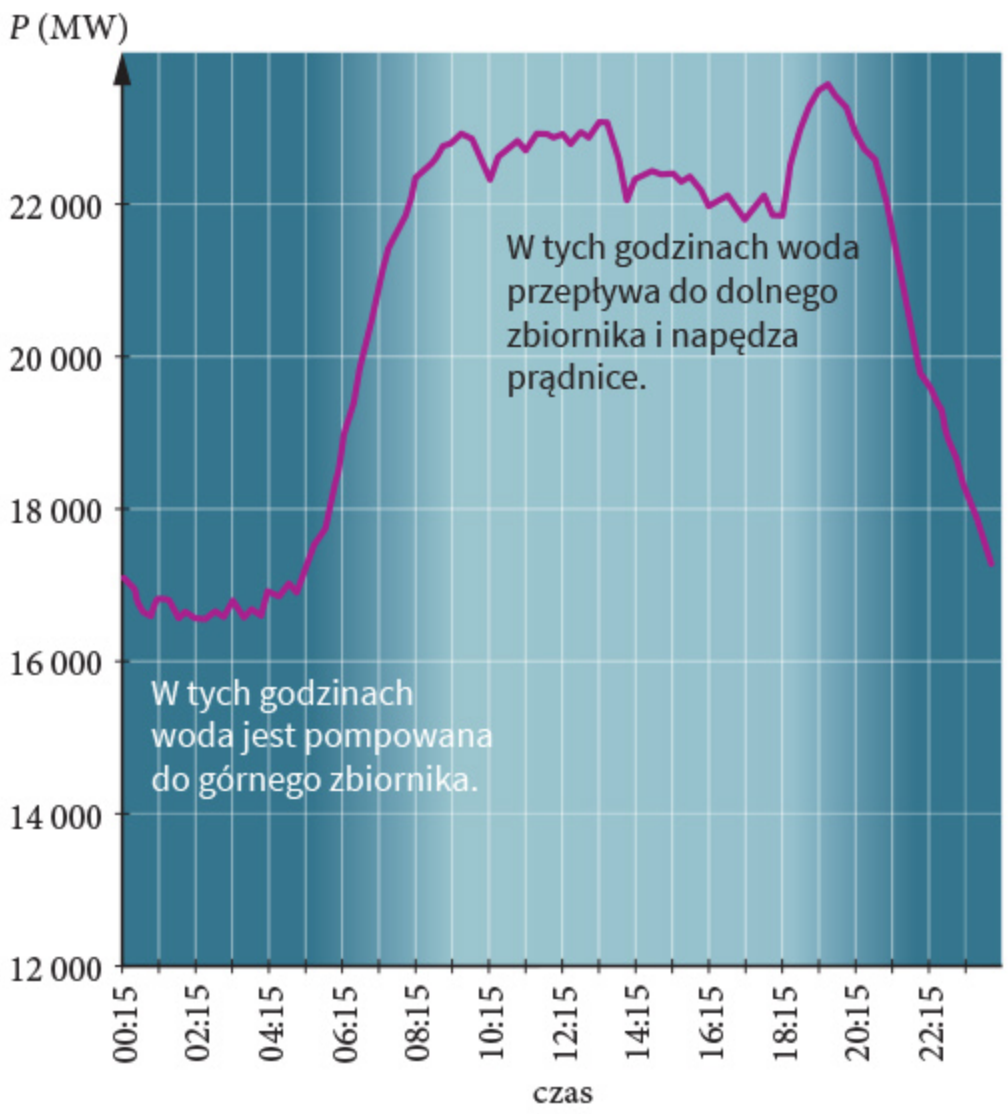
Do poruszania wirników prądnic potrzebna jest energia. Jej źródła mogą być różne. W niedużej prądnicy rowerowej jest to praca naszych mięśni. W samochodach prądnicę napędza silnik spalinowy. W elektrowniach wodnych wykorzystuje się energię grawitacji wody, która spadając, porusza wirniki prądnic. Elektrownie wiatrowe wykorzystują energię kinetyczną wiatru. W elektrowniach konwencjonalnych wykorzystuje się część energii wewnętrznej paliwa.

## WARTO WIEDZIEĆ

### Elektrownia szczytowo-pompowa

Dobowe zapotrzebowanie na energię elektryczną nie jest stałe, gdyż w ciągu dnia zużycie energii jest większe niż nocą. Nie jest łatwo szybko zmienić moc pracującej dużej elektrowni. O wiele łatwiej jest zgromadzić nadmiar energii i wykorzystać ją wówczas, gdy jest ona potrzebna.

Elektrownia szczytowo-pompowa jest pewnego rodzaju magazynem energii. Taka elektrownia ma dwa zbiorniki wodne: górny służy do gromadzenia wody podczas mniejszego zapotrzebowania na energię, a dolny jest rezerwuarem wody. Turbiny mogą tu odgrywać rolę pomp. Gdy przez prądnice przepuszczamy prąd elektryczny, stają się one silnikami elektrycznymi napędzającymi pompy, a podczas przepływu wody z górnego zbiornika do dolnego stają się turbinami napędzającymi prądnice.



Dobowe zmiany zapotrzebowania na moc w Polsce

Największą w Polsce elektrownią tego typu jest elektrownia wodna Żarnowiec. Jej moc podczas pompowania wody do górnego zbiornika jest równa 800 MW, a podczas wytwarzania energii elektrycznej wynosi 700 MW.

## Odzyskiwanie energii elektrycznej

Podczas klasycznego hamowania za pomocą hamulców energia kinetyczna pojazdu zamienia się w ciepło. Sposobem na ograniczenie zużycia energii w transporcie jest rekuperacja, czyli odzyskiwanie energii w trakcie hamowania pojazdów (ryc. 21.6).

**Ryc. 21.6.** Pociąg podmiejski wykorzystujący odzyskiwanie energii kinetycznej

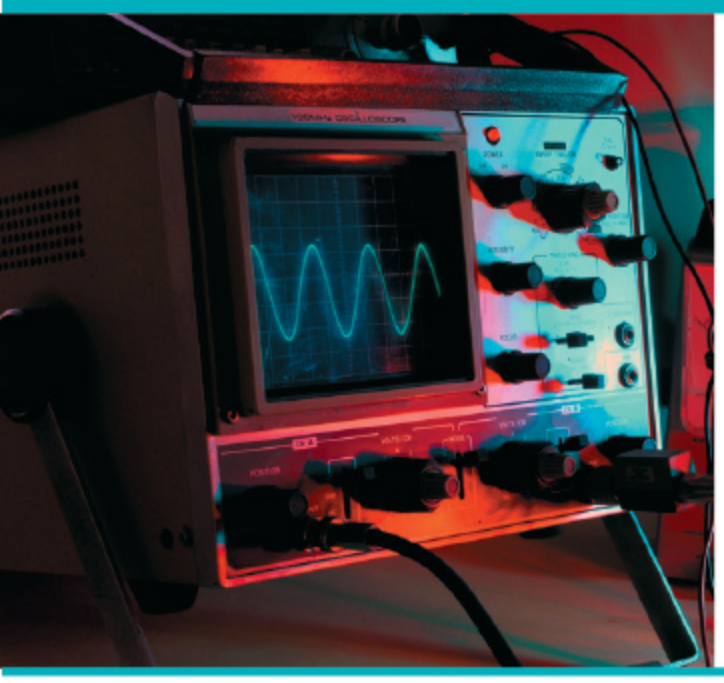
Do tego celu wykorzystuje się fakt, że budowa silnika elektrycznego i prądnicy jest bardzo podobna. Podczas rozpędzania pojazdu pod wpływem przyłożonego napięcia przez uzwojenia silników przepływa prąd elektryczny. Gdy pojazd hamuje, źródło napięcia jest odłączane i silnik staje się prądnicą, która zamienia energię kinetyczną obracających się kół w energię elektryczną. Powstający w prądnicy prąd może służyć do ładowania akumulatorów lub kondensatorów, a w przypadku pojazdów szynowych może być kierowany do sieci trakcyjnej. W niektórych sytuacjach system taki pozwala na zaoszczędzenie nawet 25 % zużywanej energii. Zapewnienie rekuperacji energii w pojazdach wymaga stosowania dość skomplikowanych układów elektronicznych sterowania. Również zdobywające coraz większą popularność samochody elektryczne i hybrydowe są wyposażane w systemy pozwalające odzyskiwać część zużytej energii.

## Podsumowanie

- **Prądnica** to urządzenie wytwarzające napięcie elektryczne dzięki pracy siły zewnętrznej.
- Na końcach ramki wirującej w polu magnetycznym powstaje napięcie.
- Praca wykonana przy obrocie wirnika prądnicy jest źródłem energii elektrycznej.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Czy obrót ramki prądnicy, której zaciski nie są podłączone do odbiornika, wymaga większej czy mniejszej siły, niż gdy prądnica zasila jakieś urządzenie? Uzasadnij odpowiedź.
2. Wewnątrz piasty niektórych kół w rowerach umieszcza się prądnice pozwalające na uzyskanie energii elektrycznej niezbędnej do oświetlenia roweru. Czy jazda takim rowerem z włączonym oświetleniem wymaga większego wysiłku niż jazda bez oświetlenia? Uzasadnij odpowiedź.
3. Czy jest możliwe zaprojektowanie układu, który będzie odzyskiwał ponad 100 % energii kinetycznej jadącego pojazdu? Uzasadnij odpowiedź.
4. Dlaczego podczas słabego wiatru elektrownie wiatrowe mają mniejszą moc niż podczas silnego wiatru?
5. Michał zbudował prądnicę, w której oś obrotu ramki była równoległa do linii pola magnetycznego. Czy taka prądnica wytworzy napięcie? Uzasadnij odpowiedź.



# 22. Prąd przemienny

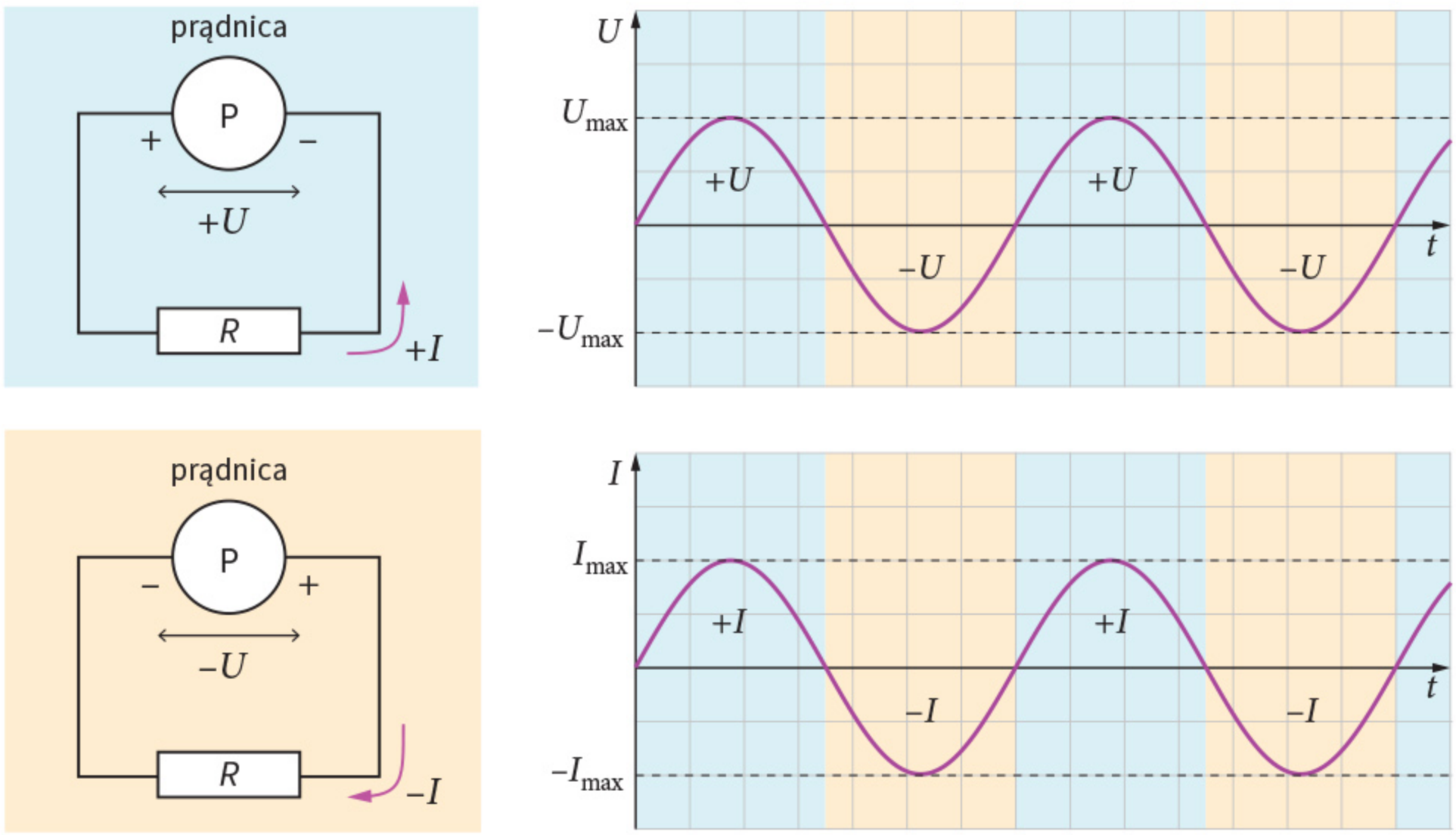
- Prąd przemienny
- Dane znamionowe

➔ **Przypomnij sobie** zjawisko indukcji elektromagnetycznej oraz definicję mocy prądu elektrycznego.

Powstały w prądnicy prąd elektryczny ma nieco inne cechy niż prąd, którego źródłem jest bateria. W tym rozdziale wyjaśnimy podstawowe właściwości prądu przemiennego.

## Prąd przemienny

Napięcie elektryczne wytwarzane na zaciskach prądnicy opisanej w poprzednim rozdziale jest nazywane **napięciem przemiennym**. Prąd płynący w obwodzie zasilanym takim źródłem jest **prądem przemiennym**. Na rycinie 22.1 przedstawiono schemat obwodu z prądnicą prądu przemiennego jako źródłem napięcia. Zgodnie z prawem Ohma natężenie prądu płynącego przez opornik jest wprost proporcjonalne do przyłożonego napięcia. Stąd wynika, że zależności napięcia i natężenia prądu od czasu są podobne.




**Ryc. 22.1.** Schemat obwodu z prądnicą prądu przemiennego oraz wykresy zależności napięcia na zaciskach prądnicy i natężenia prądu w obwodzie od czasu

Na wykresie napięcie traktujemy jako dodatnie, gdy lewy zacisk prądnicy z rysunku ma wyższy potencjał (znak „+”). Prąd, którego przepływ spowodowany jest takim napięciem, ma dodatnie natężenie. Jednak po chwili drugi zacisk prądnicy zaczyna mieć wyższy potencjał (napięcie jest przeciwne), więc prąd płynie w drugą stronę, co oznaczamy jako „–*I*”. Natężenie prądu w odbiorniku osiąga pewną wartość maksymalną $I_{max}$ (ryc. 22.1), po czym maleje do zera, aby ponownie osiągnąć wartość maksymalną, choć tym razem prąd płynie w przeciwną stronę. Moc wydzielona na odbiorniku nie zależy od kierunku prądu, ale zależy od jego natężenia i napięcia:

$$P = U \cdot I$$

Ze wzoru tego wynika, że jeśli zmienia się napięcie lub natężenie prądu, to zmienia się również moc. Okres zmian napięcia i natężenia prądu przemiennego jest taki sam jak okres obrotu wirnika prądnicy, więc jest bardzo krótki. Prądnica natomiast zasila urządzenia zwykle przez dłuższy czas, dlatego interesuje nas średnia moc prądu przemiennego, czyli stosunek wydzielonej energii do czasu, gdy czas pracy urządzenia jest znacznie dłuższy od okresu zmian prądu.

Okazuje się, że średnią moc prądu przemiennego można wyrazić następująco:

$$P = \frac{U_{max} \cdot I_{max}}{2} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

Pierwszy czynnik w powyższym wzorze nazywamy napięciem skutecznym, drugi – natężeniem skutecznym:

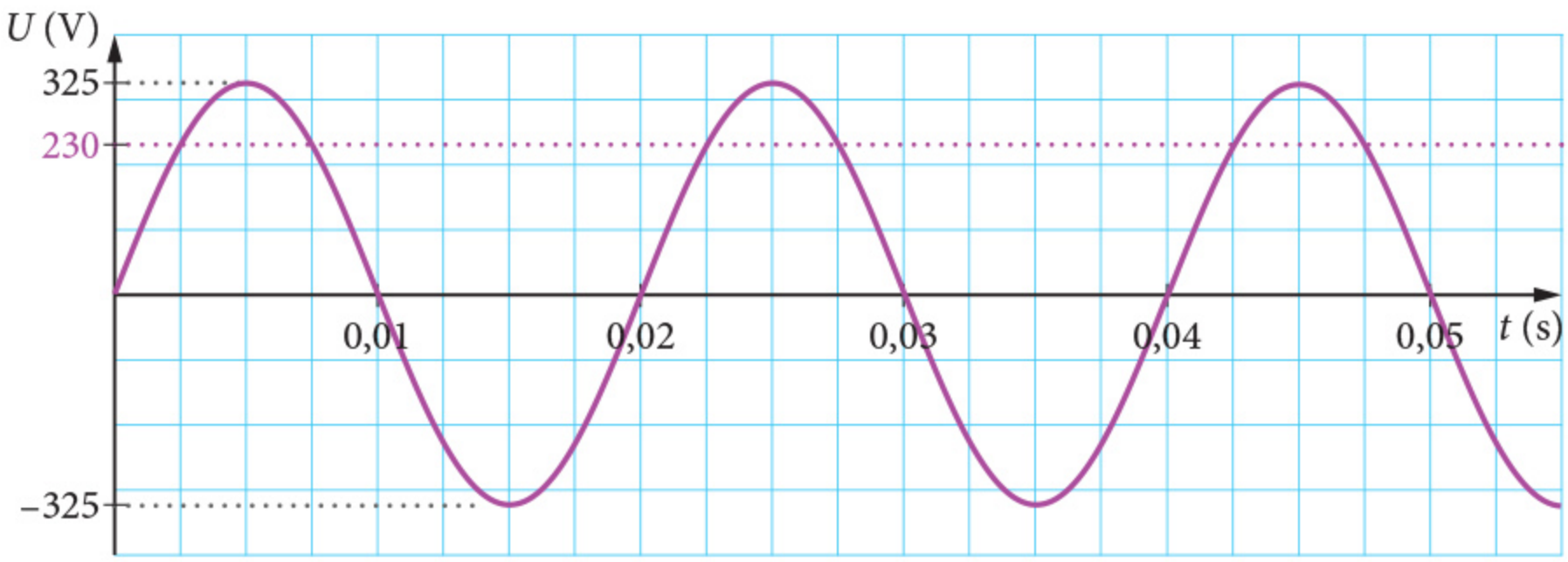
$$U_{sk} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \text{ oraz } I_{sk} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

Wobec tego możemy napisać:

$$P = U_{sk} \cdot I_{sk} \qquad (1)$$

Średnia moc prądu przemiennego (nazywana mocą skuteczną) jest zatem równa iloczynowi napięcia skutecznego i natężenia skutecznego.

W gniazdach sieci elektrycznej, z których korzystamy na co dzień, jest właśnie napięcie przemienne. Częstotliwość zmian tego napięcia jest równa 50 Hz. Oznacza to, że w ciągu sekundy zachodzi 50 pełnych cykli zmian napięcia. Taką częstotliwość zmian ma również prąd w urządzeniach podłączonych do tej sieci. Napięcie skuteczne jest równe 230 V, podczas gdy maksymalne napięcie wynosi 325 V. Przebieg zmian napięcia w gniazdku elektrycznym przedstawiono na rycinie 22.2.

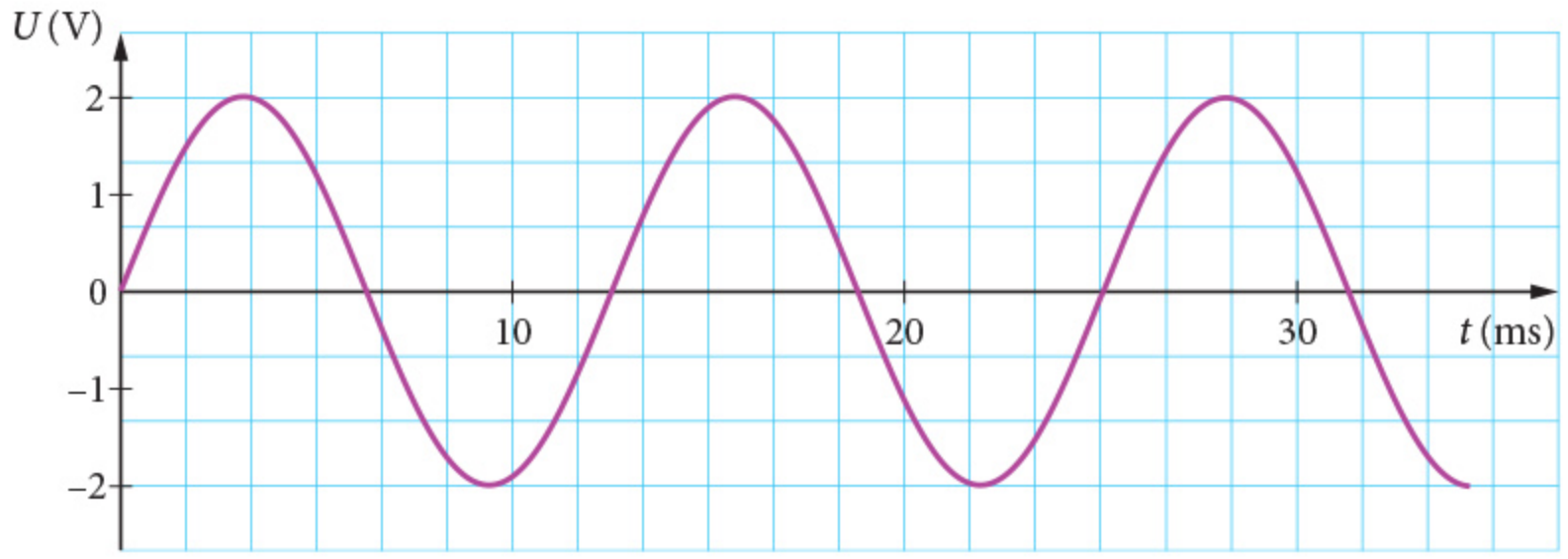



**Ryc. 22.2.** Wykres zależności napięcia w gniazdku elektrycznym od czasu

**PRZYKŁAD 1.**

Na wykresie przedstawiono zależność napięcia na zaciskach pewnej prądnicy od czasu. Do prądnicy podłączono odbiornik o oporze 7 Ω.

Na podstawie wykresu wyznaczmy: częstotliwość zmian napięcia, napięcie skuteczne oraz moc wydzieloną na odbiorniku.




Z wykresu odczytujemy, że czas dwóch pełnych okresów zmian wynosi 25 ms, stąd okres zmian napięcia jest równy 12,5 ms. Częstotliwość obliczymy ze wzoru:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{12{,}5 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{s}} = 80\ \mathrm{Hz}$$

Maksymalne napięcie jest równe 2 V, zatem napięcie skuteczne wynosi:

$$U_{\mathrm{sk}} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\ \mathrm{V}}{\sqrt{2}} \approx 1{,}4\ \mathrm{V}$$

Aby obliczyć moc prądu wydzieloną w odbiorniku, najpierw wyznaczymy z prawa Ohma natężenie skuteczne:

$$I_{\mathrm{sk}} = \frac{U_{\mathrm{sk}}}{R} = \frac{1{,}4\ \mathrm{V}}{7\ \Omega} = 0{,}2\ \mathrm{A}$$

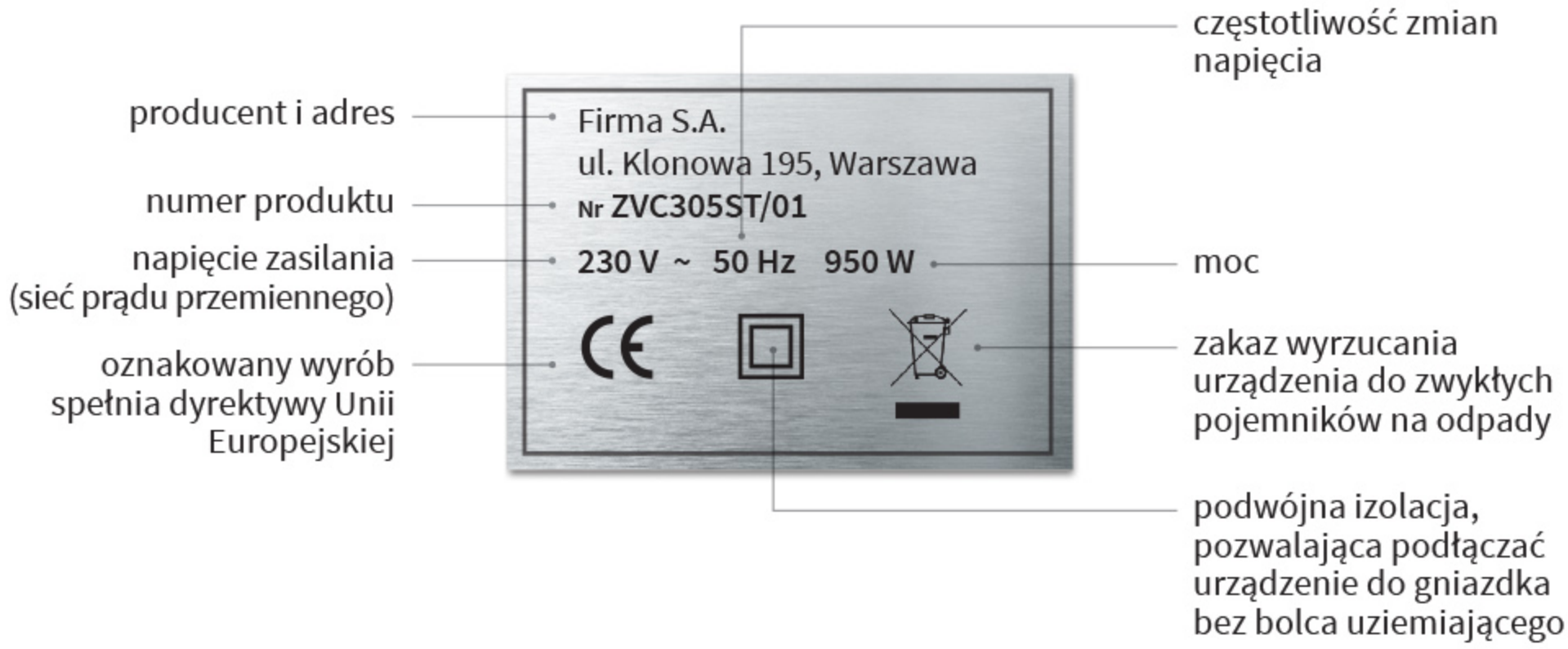
Po podstawieniu danych do wzoru (1) otrzymamy moc:

$$P = 1{,}4\ \mathrm{V} \cdot 0{,}2\ \mathrm{A} = 0{,}28\ \mathrm{W}$$

Mierniki elektryczne (np. woltomierz, amperomierz) podłączone do obwodu prądu przemiennego wskazują wartości skuteczne mierzonych wielkości. Również informacje podane w instrukcjach obsługi lub na tabliczkach znamionowych, dotyczące napięć i natężeń prądów przepływających przez urządzenia elektryczne, dotyczą ich wartości skutecznych.

## Dane znamionowe urządzeń elektrycznych

Do każdego urządzenia elektrycznego, z którym mamy do czynienia na co dzień, jest przymocowana tabliczka znamionowa. Tabliczka ta zawiera podstawowe dane techniczne urządzenia. Można się z niej dowiedzieć, kto jest producentem tego urządzenia oraz jaki jest numer seryjny produktu. Jest też informacja o spełnieniu wymagań Unii Europejskiej. Na rycinie 22.3 przedstawiono tabliczkę znamionową odkurzacza.




**Ryc. 22.3.** Tabliczka znamionowa odkurzacza

Na tabliczce znamionowej zapisano, jakie powinno być napięcie skuteczne zasilania, aby urządzenie pracowało prawidłowo. Jest to tak zwane **napięcie znamionowe**. Podane w tym przypadku 230 V jest napięciem znamionowym. Symbol falki przy tej wartości oznacza, że jest to napięcie przemienne. Częstotliwość zmian napięcia to 50 Hz. Na tabliczce zapisana jest również **moc znamionowa** odkurzacza, która zostanie osiągnięta, gdy urządzenie będzie podłączone do napięcia znamionowego.

Czasami producenci podają przedział wartości napięć dla danego urządzenia (np. 220–240 V). Taki zapis oznacza, że nie trzeba się przejmować niewielkimi, kilkuprocentowymi zmianami napięcia w domowej instalacji elektrycznej, zachodzącymi wtedy, gdy w wyniku włączenia lub wyłączenia innego odbiornika o dużej mocy zmienia się natężenie prądu w sieci. Takie zmiany napięcia nie wpływają negatywnie na funkcjonowanie danego urządzenia.

**PRZYKŁAD 2.**

Na ilustracji przedstawiono tabliczkę znamionową wentylatora elektrycznego. Na podstawie danych z tej tabliczki obliczmy natężenie skuteczne prądu zasilającego wentylator podczas jego pracy.

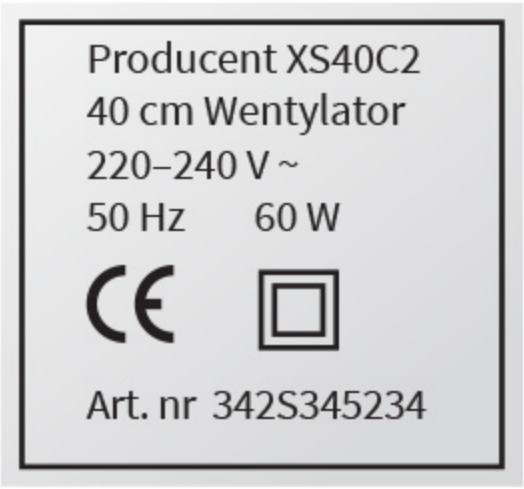
Wentylator jest przeznaczony do pracy pod napięciem 230 V. Takie napięcie jest stosowane w Unii Europejskiej (znaczek CE). Zakres 220–240 V podany przez producenta oznacza, że niewielkie wahania napięcia w sieci nie mają znaczącego wpływu na działanie urządzenia oraz jego moc. Zakładamy więc, że napięcie, do którego podłączamy wentylator, jest równe 230 V i przy takim napięciu moc urządzenia jest równa 60 W. Aby obliczyć natężenie prądu, skorzystamy z przekształconego wzoru na moc:

$$I_{sk} = \frac{P}{U_{sk}}$$

Po podstawieniu danych do wzoru otrzymamy:

$$I_{sk} = \frac{60\ \text{W}}{230\ \text{V}} \approx 0{,}26\ \text{A}$$

Natężenie skuteczne prądu zasilającego wentylator wynosi ok. 0,26 A.




## PODSUMOWANIE

- Napięcie powstające na zaciskach prądnicy jest **napięciem przemiennym**.
- W odbiornikach podłączonych do napięcia przemiennego płynie **prąd przemienny**.
- Średnia **moc prądu przemiennego** jest iloczynem napięcia i natężenia skutecznego.

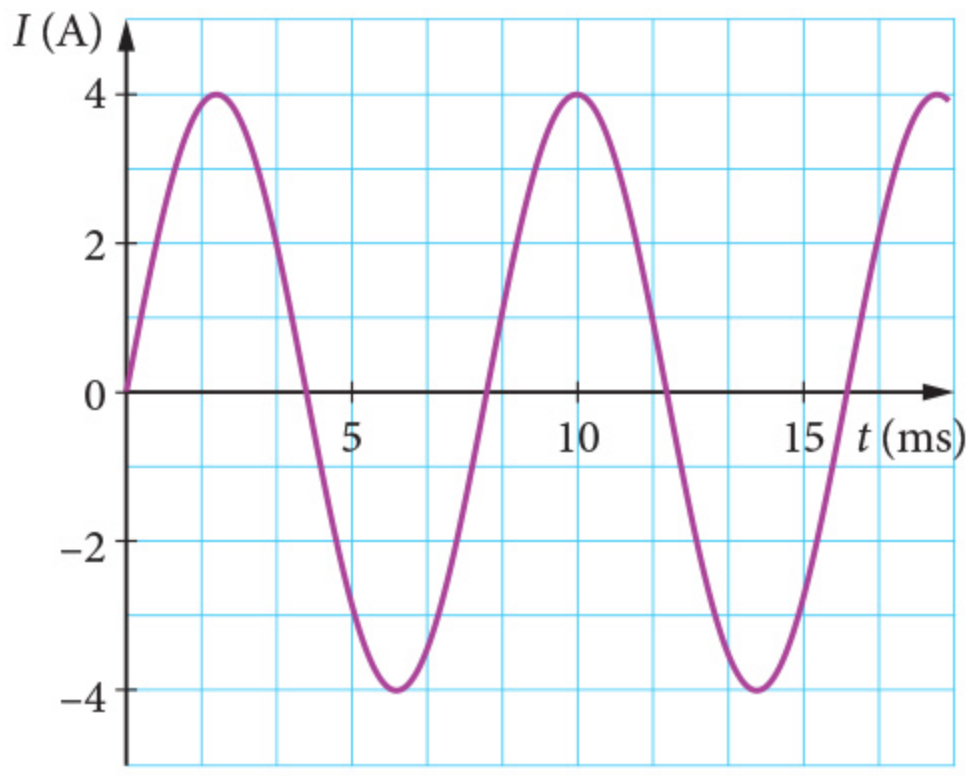
$$P = U_{sk} I_{sk}$$

- **Napięcie znamionowe** to napięcie, przy którym dane urządzenie pracuje prawidłowo.

## PYTANIA I ZADANIA

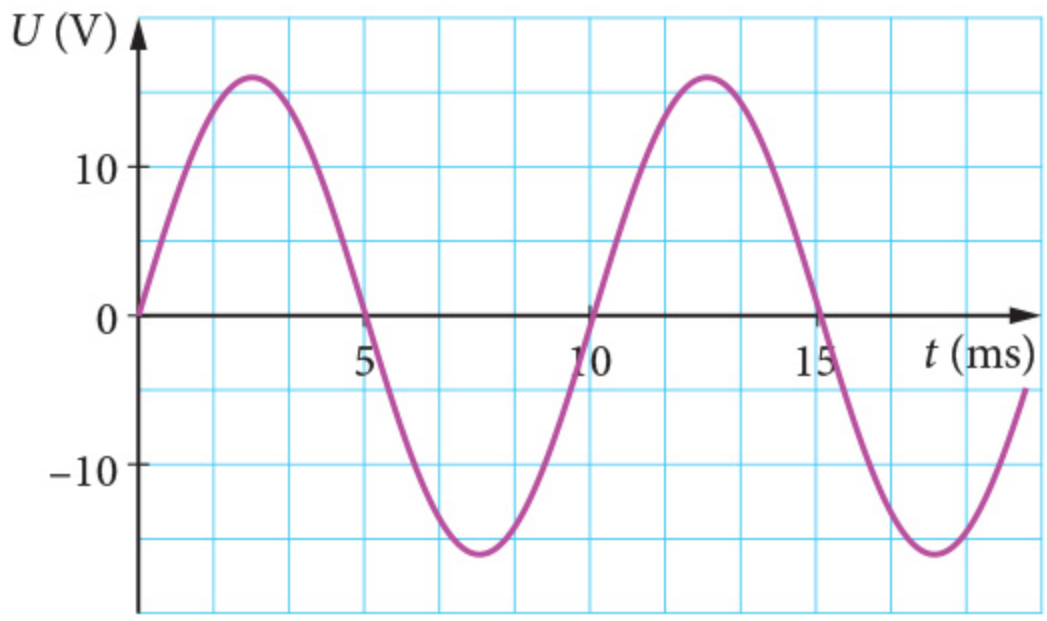
**1.** Na opakowaniu lampy LED znajduje się napis: MIO LED 4W GU10-WW 220–240 V~ 300 lm. Na podstawie zapisanych informacji podaj moc i napięcie znamionowe lampy.

**2.** Na wykresie przedstawiono zależność natężenia prądu przepływającego przez opornik o oporze 60 Ω od czasu. Oblicz natężenie skuteczne tego prądu oraz jego częstotliwość.



**3.** Woltomierz podłączono do źródła napięcia przemiennego, a wynik pomiaru napięcia przedstawiono na zdjęciu. Na podstawie wyniku tego pomiaru zapisz napięcie skuteczne oraz napięcie maksymalne tego źródła.

**4.** Na wykresie przedstawiono zależność napięcia na zaciskach prądnicy od czasu. Na podstawie wykresu oblicz częstotliwość zmian napięcia i napięcie skuteczne.




**5.** W domowej instalacji elektrycznej zamontowano bezpiecznik, na którym znajduje się napis: 230 V~ L16A. Jaką największą moc może mieć urządzenie włączone do instalacji zabezpieczonej takim bezpiecznikiem?

# 23. Transformator, sieci energetyczne

- Budowa i zasada działania transformatora
- Zastosowanie transformatorów
- Sieci energetyczne

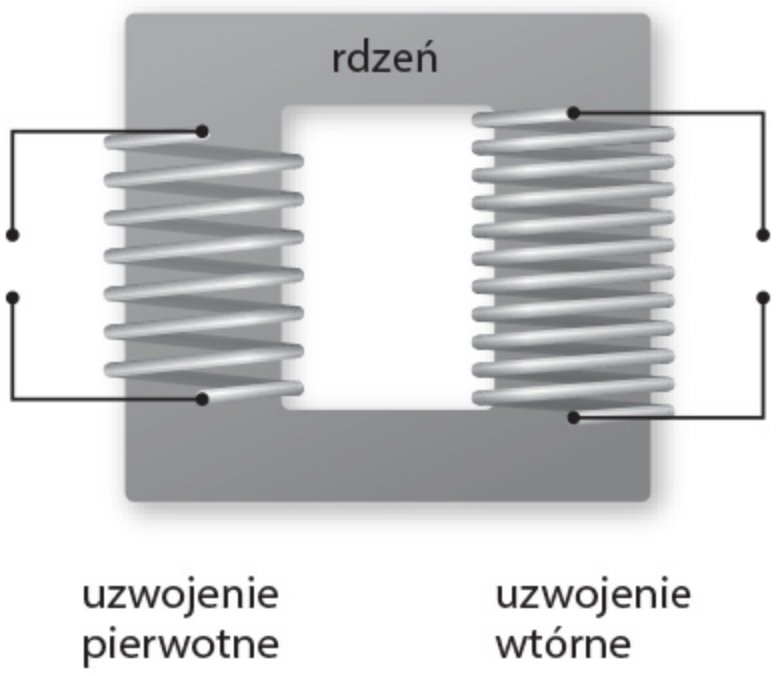
➔ **Przypomnij sobie** wiadomości o polu magnetycznym prądu, indukcji elektromagnetycznej oraz prądzie przemiennym.

Dlaczego tak powszechne jest stosowanie prądu przemiennego, a nie stałego? Okazuje się, że ma on wiele zalet. Jedną z najważniejszych jest łatwość zmiany przemiennego napięcia elektrycznego. Do tego celu służy urządzenie zwane transformatorem.

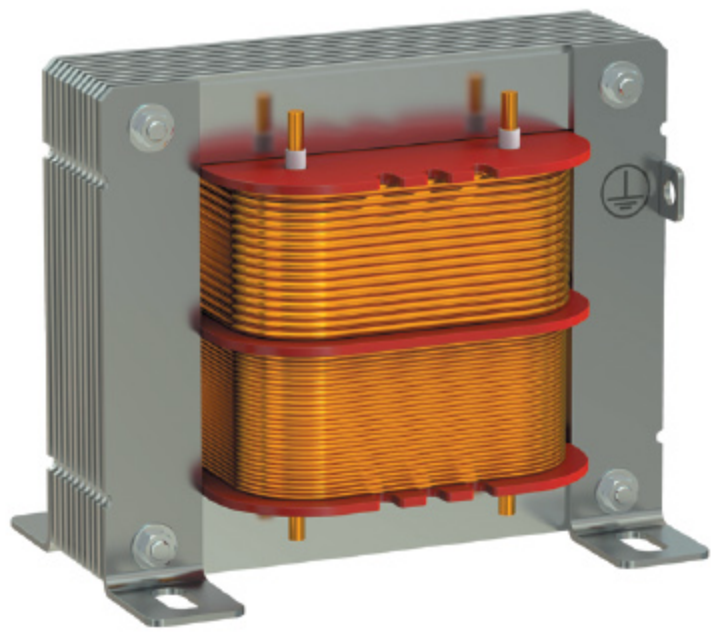
## Budowa i zasada działania transformatora

Transformator składa się z dwóch (lub więcej) zwojnic (uzwojeń) umieszczonych na wspólnym ferromagnetycznym rdzeniu. Uzwojenie, które podłączamy do źródła napięcia, nazywamy pierwotnym, a drugie, do którego podłączony jest odbiornik prądu – wtórnym (ryc. 23.1). Uzwojenia są od siebie odizolowane elektrycznie. Podstawą działania transformatora jest istnienie wspólnego pola magnetycznego, którego linie przechodzą przez obie zwojnice. Zapewnia to rdzeń tworzący zamkniętą pętlę, który można łatwo namagnesować i rozmagnesować. Pole magnetyczne w rdzeniu wytwarzają prądy elektryczne płynące w obu zwojnicach.

a)

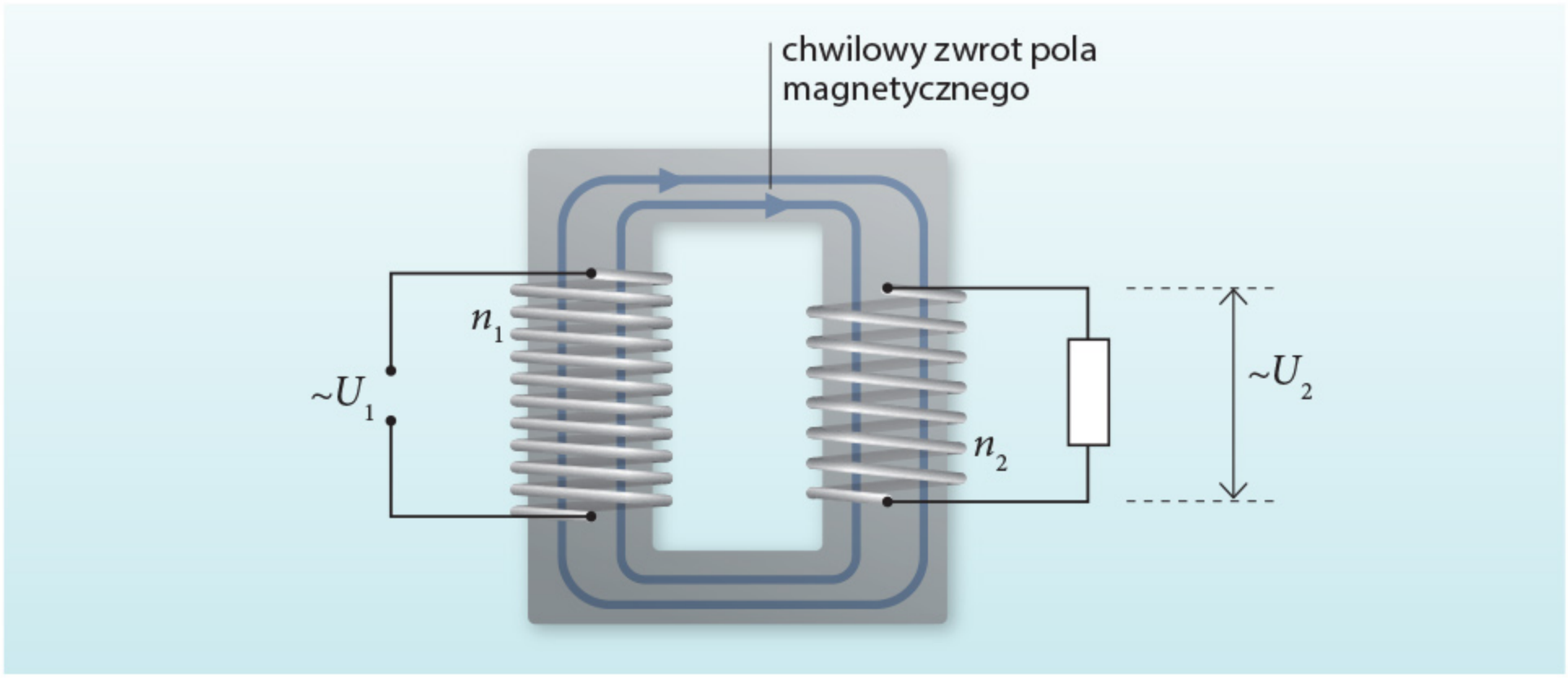



b)



**Ryc. 23.1. a)** Schemat budowy transformatora. **b)** Fotografia transformatora, widoczne są fragmenty uzwojeń

F Gdy uzwojenie pierwotne transformatora podłączymy do źródła napięcia przemiennego, płynący w nim prąd wytworzy w rdzeniu pole magnetyczne (ryc. 23.2). To pole będzie się zmieniać, gdyż prąd płynący przez uzwojenie pierwotne zmienia zarówno swoje natężenie, jak i swój kierunek.




**Ryc. 23.2.** Schemat działania transformatora, gdzie: $U_1$ i $U_2$ – napięcia na uzwojeniu pierwotnym i wtórnym, a $n_1$ i $n_2$ – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego.

Zmienne pole magnetyczne w rdzeniu spowoduje, że w wyniku indukcji elektromagnetycznej na zaciskach uzwojenia wtórnego pojawi się również napięcie przemienne. Pole magnetyczne jest takie samo w całym rdzeniu, dlatego w każdym zwoju powstanie takie samo napięcie $U$. Zwoje są połączone szeregowo, więc całkowite napięcie na końcach uzwojenia wtórnego jest równe:

$$U_2 = n_2 \cdot U$$

Analogicznie dla uzwojenia pierwotnego:

$$U_1 = n_1 \cdot U$$

Uzwojenie pierwotne jest podłączone do źródła zasilania. W obwodzie z uzwojeniem pierwotnym nie ma oporu, więc napięcie, które w nim powstaje w wyniku indukcji, musi być zawsze przeciwne do napięcia źródła (całkowite napięcie jest równe zeru).

Z powyższych wzorów można ustalić stosunek napięć na uzwojeniach transformatora:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (1)$$

gdzie:
$U_1$ i $U_2$ – napięcia na uzwojeniu pierwotnym i wtórnym,
$n_1$ i $n_2$ – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego.

Z tego wzoru wynika, że gdy uzwojenie wtórne ma więcej zwojów od uzwojenia pierwotnego, transformator podwyższa napięcie. W przypadku przeciwnym – obniża.

**PRZYKŁAD 1.**

Transformator, który obniża napięcie z 230 V do 24 V, ma w uzwojeniu wtórnym 180 zwojów. Obliczmy liczbę zwojów w uzwojeniu pierwotnym tego transformatora.

Korzystamy ze wzoru (1) i po przekształceniu go do odpowiedniej postaci otrzymujemy, że liczba zwojów w uzwojeniu pierwotnym jest równa:

$$n_1 = n_2 \frac{U_1}{U_2} = 180 \cdot \frac{230\ \text{V}}{24\ \text{V}} = 1725$$

Transformator opisany w przykładzie ma 1725 zwojów w uzwojeniu pierwotnym.

Jak będzie działał transformator podłączony do napięcia stałego? W takiej sytuacji pole magnetyczne w rdzeniu się nie zmienia, zatem w uzwojeniu wtórnym nie wzbudzi się prąd. Napięcie na uzwojeniu wtórnym będzie równe zeru.

## Przemiany energii w transformatorze

Do uzwojenia wtórnego podłączamy odbiornik. Zacznie on pobierać energię, którą przekazuje prąd w uzwojeniu pierwotnym poprzez pole magnetyczne w rdzeniu. Konstrukcja transformatora sprawia, że straty energii podczas tych przemian są do pominięcia. Wobec tego moc dostarczana do uzwojenia pierwotnego jest równa mocy odbieranej z uzwojenia wtórnego:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

**PRZYKŁAD 2.**

Do transformatora, który obniża napięcie z 230 V do 12 V, podłączono odkurzacz samochodowy o mocy 60 W. Obliczmy natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym i pierwotnym.

Natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym jest takie samo jak prądu płynącego przez odkurzacz, zatem:

$$I_2 = \frac{P}{U_2} = \frac{60\ \text{W}}{12\ \text{V}} = 5\ \text{A}$$

Zakładamy, że w transformatorze nie ma strat energii, czyli:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

Po przekształceniu otrzymujemy:

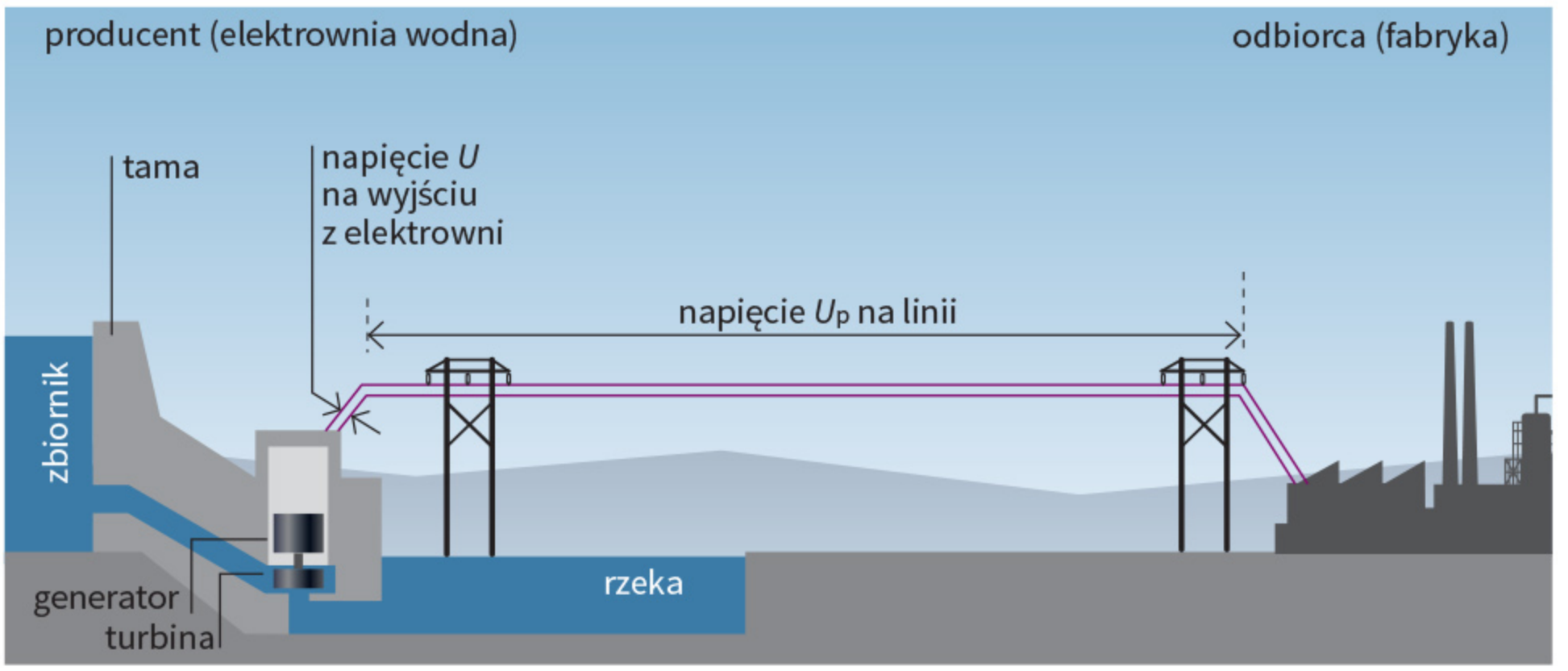
$$I_1 = \frac{U_2}{U_1} \cdot I_2 = \frac{12\ \text{V}}{230\ \text{V}} \cdot 5\ \text{A} \approx 0{,}26\ \text{A}$$

Natężenie prądu w uzwojeniu wtórnym jest równe 5 A, w pierwotnym zaś wynosi ok. 0,26 A.

## Zastosowanie transformatorów

Nieodłącznym elementem krajobrazu w krajach uprzemysłowionych są linie wysokiego napięcia. Za pomocą tych linii dostarcza się energię elektryczną z elektrowni do odbiorców. Napięcia między poszczególnymi przewodami tych linii są naprawdę wysokie, wynoszą nawet kilkaset tysięcy woltów. Dlaczego do przesyłania energii elektrycznej używa się tak niebezpiecznych napięć? Okazuje się, że im wyższe napięcie, tym mniejsze

straty energii podczas jej przesyłania. Rycina 23.3 przedstawia schemat przesyłania energii elektrycznej z elektrowni do odbiorcy. Zwróćmy uwagę, że czym innym jest napięcie na końcach linii przesyłowej, a czym innym – napięcie między przewodami wychodzącymi z elektrowni. Napięcie $U$ między przewodami może być rzędu wielu tysięcy woltów, a napięcie $U_p$ na linii, wynikające z oporu przewodów, powinno być jak najmniejsze.




**Ryc. 23.3.** Schemat przesyłania energii z elektrowni do odbiorcy

**Ryc. 23.4.** Transformator zamocowany na słupie energetycznym

Natężenie prądu w przewodach linii wysokiego napięcia zależy od tego, jak duża moc jest przesyłana do odbiorcy:

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

gdzie:
$P$ – moc przesyłana do odbiorcy,
$U$ – napięcie między przewodami wychodzącymi z elektrowni.

Wobec tego im wyższe napięcie jest zastosowane do przesyłania energii, tym mniejsze jest natężenie prądu.

Moc $P_c$ wydzielającą się w postaci ciepła w przewodach linii wysokiego napięcia można obliczyć ze wzoru:

$$P_c = U_p \cdot I$$

gdzie $U_p$ – napięcie na końcach przewodów. Napięcie to można obliczyć z prawa Ohma:

$$U_p = I \cdot R$$

gdzie $R$ – opór elektryczny przewodów.

Im mniejsze jest natężenie prądu, tym mniej ciepła wydziela się na przewodach, a zatem mniejsze są straty energii podczas jej przesyłania do odbiorcy. Oczywiście wysokie napięcie jest bardzo niebezpieczne dla użytkownika energii elektrycznej, stąd konieczność jego obniżenia przed skierowaniem tej energii do naszych mieszkań. Do podwyższania oraz obniżania napięcia w sieci energetycznej służą właśnie transformatory (ryc. 23.4).

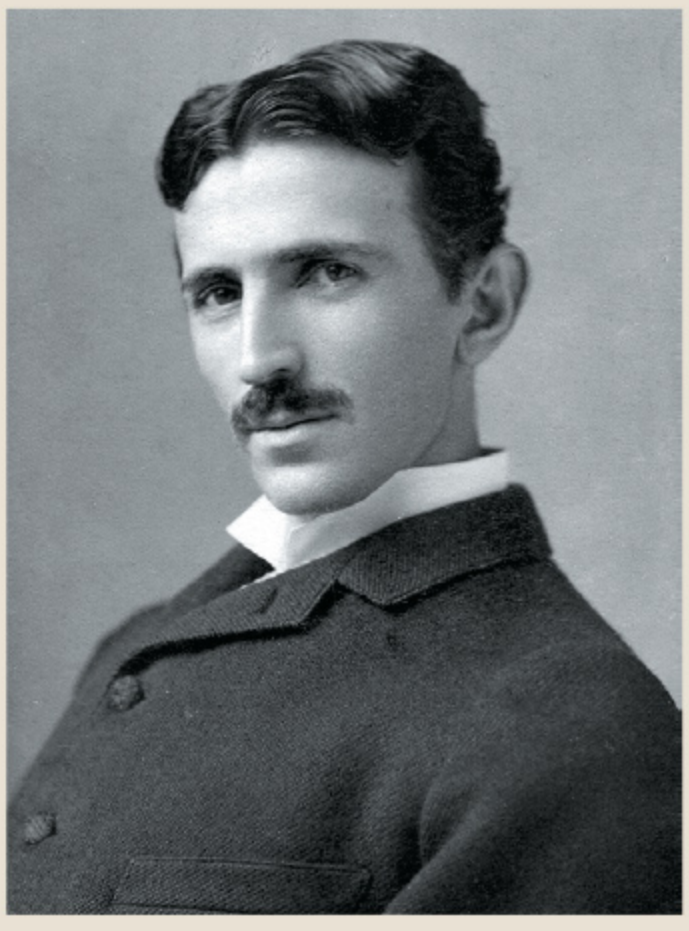
## WARTO WIEDZIEĆ

**Wojna o prąd**

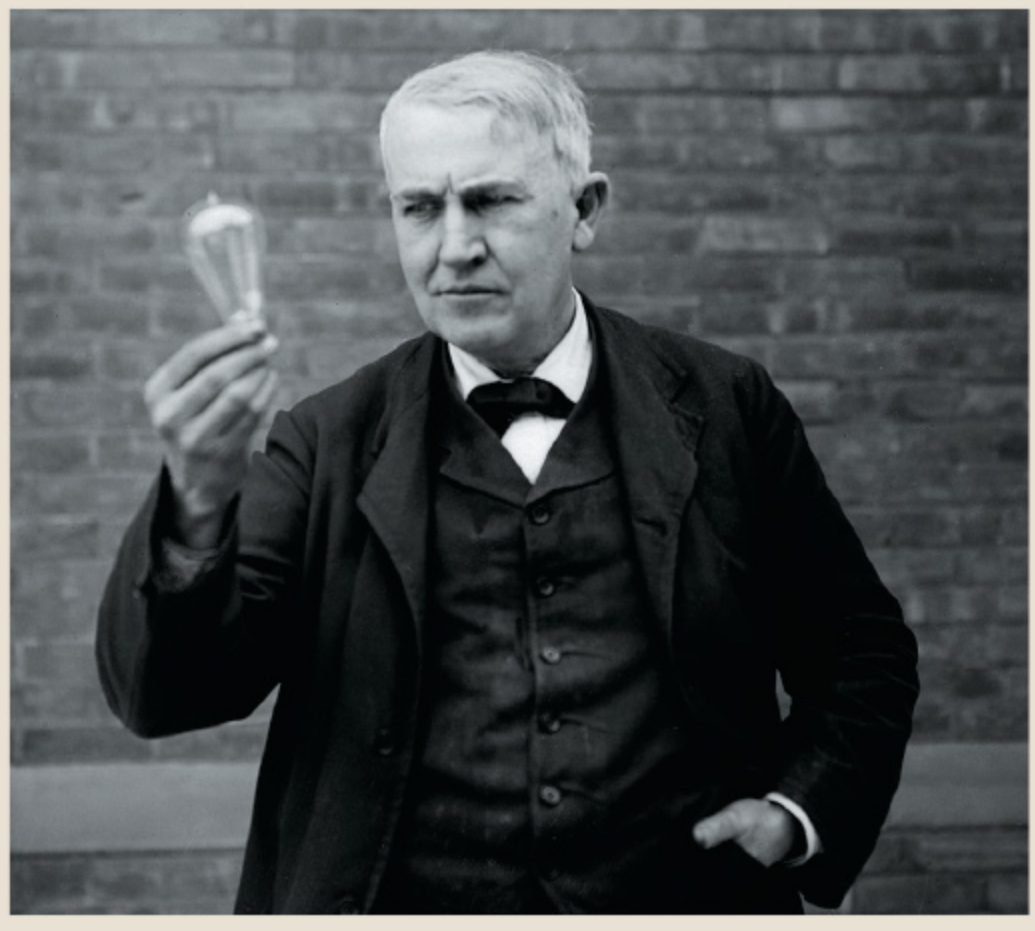
Wiek XIX był wiekiem pary, ale jego końcówka była etapem przejścia do ery elektryczności. O szybkim rozwoju elektryczności zadecydowało dwóch wynalazców – Thomas Alva Edison oraz Nikola Tesla. Pierwszy z nich był tytanem pracy twierdzącym, że geniusz to 1 % natchnienia i 99 % wypocenia. W każdym wynalazku widział pieniądze, które można zarobić dzięki jego sprzedaży. Drugi był raczej genialnym idealistą, obdarzonym nadzwyczajnym darem wizualizacji swoich pomysłów.

Tesla, początkowo zafascynowany Edisonem, zatrudnił się w jego firmie. Jednak ich drogi się rozeszły, gdy Edison odmówił zapłaty za udoskonalenie, którego dokonał Tesla w urządzeniach produkowanych przez tę firmę. Dalszy konflikt był podsycany przez spór o wyższości prądu przemiennego nad stałym.

Żarówka, którą wynalazł Edison, wymagała zasilania prądem elektrycznym. Prądnice używane w elektrowniach budowanych przez Edisona wytwarzały prąd stały, co bardzo ograniczało zasięg ich działania. Gdybyśmy do dzisiaj używali systemu Edisona, elektrownie musiałyby stać co kilkaset metrów. Tesla zaprojektował system energetyczny oparty na prądzie przemiennym. Dzięki możliwości przesyłania energii elektrycznej pod wysokim napięciem odległość od elektrowni do odbiorcy mogła być znacznie większa. O sukcesie prądu przemiennego zadecydowało opracowanie silników na prąd przemienny, używanych na skalę przemysłową.

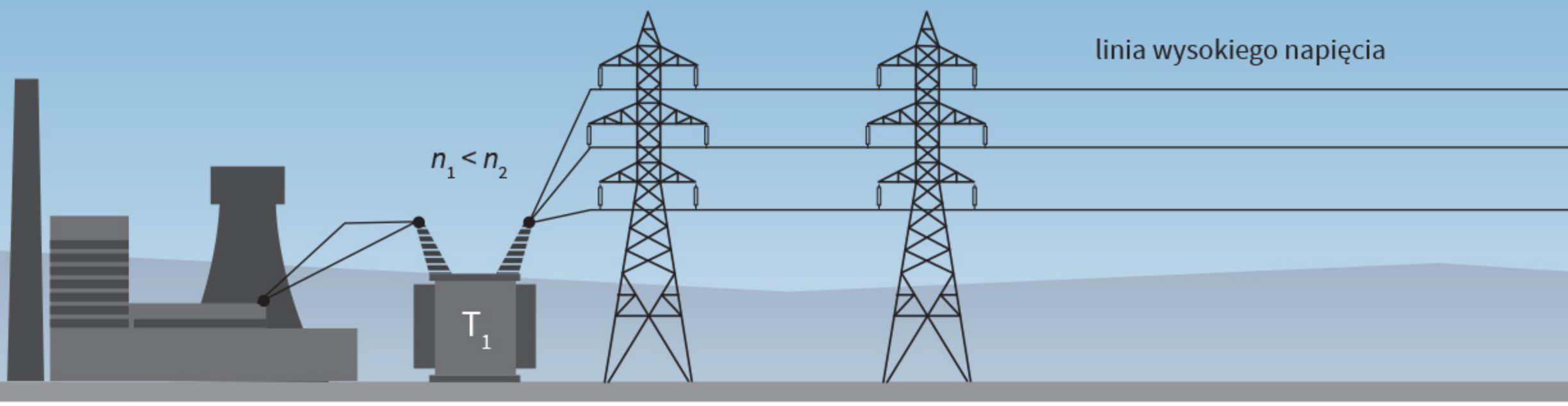


Nikola Tesla



Thomas Edison

**Ryc. 23.5.** Schemat sieci energetycznej



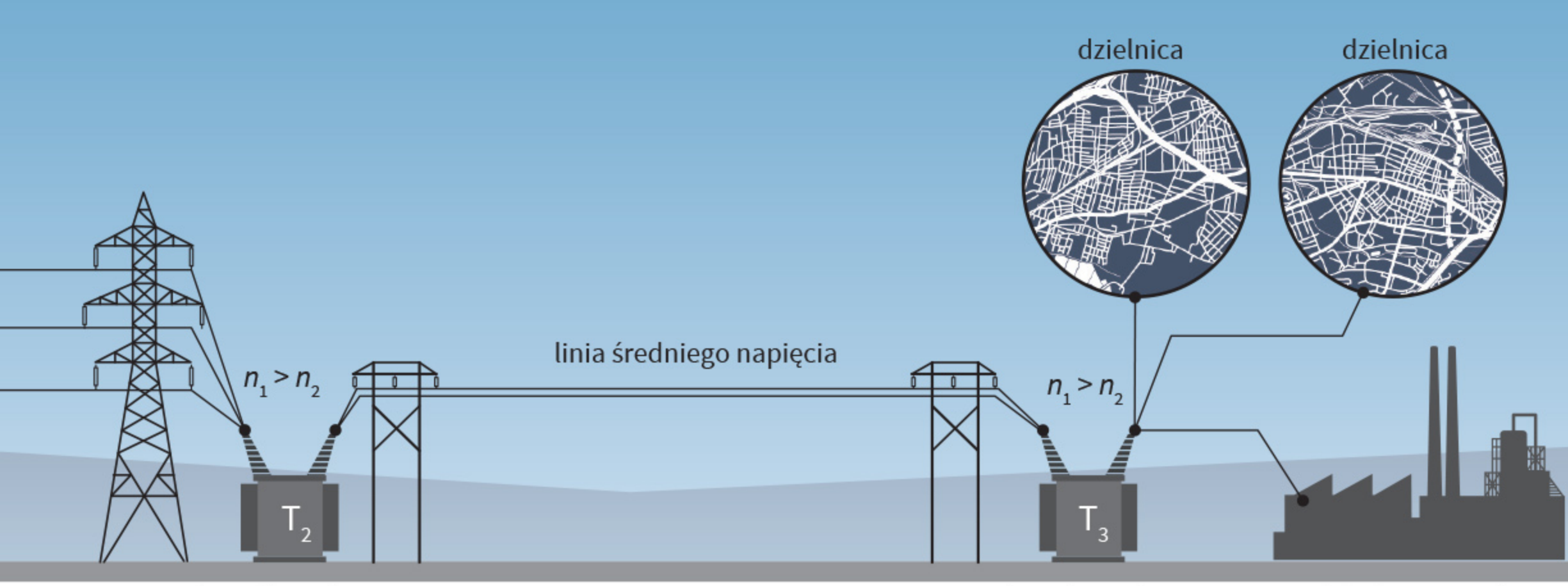

## Sieci energetyczne

Zastosowanie prądu przemiennego pod wysokim napięciem do przesyłania energii elektrycznej na duże odległości znacząco obniża straty energii w sieciach przesyłowych. Stąd możliwość budowy elektrowni w pobliżu źródeł energii i przesyłanie energii do miast znajdujących się daleko od tych źródeł. Polska energetyka oparta jest ciągle głównie na węglu kamiennym i brunatnym. Na szczęście nie musimy budować miast i fabryk wyłącznie w pobliżu Bełchatowa lub Rybnika i mieszkańcy np. Gdańska mogą korzystać z energii elektrycznej, która jest wytwarzana setki kilometrów od ich miasta. Polska ma również połączenia energetyczne z sąsiednimi krajami, więc czasem droga od wytwórcy do odbiorcy energii elektrycznej wydłuża się jeszcze bardziej.

Na rycinie 23.5 przedstawiono uproszczony schemat sieci energetycznej. W dużych elektrowniach generatory wytwarzają napięcie wynoszące ok. 22 kV. Przesyłanie energii elektrycznej pod takim napięciem wiąże się z bardzo dużymi stratami, stąd konieczność podwyższenia napięcia przed skierowaniem prądu do linii przesyłowej. W polskiej sieci energetycznej istnieją linie energetyczne o napięciu 400 kV oraz 220 kV, a ich odgałęzieniami są linie o napięciu 110 kV. Linie te docierają do rozdzielni, z których prąd kierowany jest do poszczególnych miejscowości i dużych odbiorców, np. zakładów przemysłowych.

Oprócz dużych elektrowni do sieci energetycznej włączone są również małe elektrownie, w tym pojedyncze wiatraki oraz indywidualni odbiorcy, dostarczający nadwyżki energii wyprodukowanej np. przez ich domową instalację fotowoltaiczną.

Sieci energetyczne są wrażliwe na zmiany pól elektrycznych i magnetycznych. W 1989 roku w kanadyjskiej prowincji Quebec nastąpiła poważna awaria sieci energetycznej. Jej przyczyną był gwałtowny wyrzut materii na Słońcu. Strumień naładowanych cząstek dotarł do Ziemi i wywołał duże zmiany pola magnetycznego. To wzbudziło dodatkowe napięcia w sieci elektrycznej i spowodowało jej uszkodzenie.




## PODSUMOWANIE

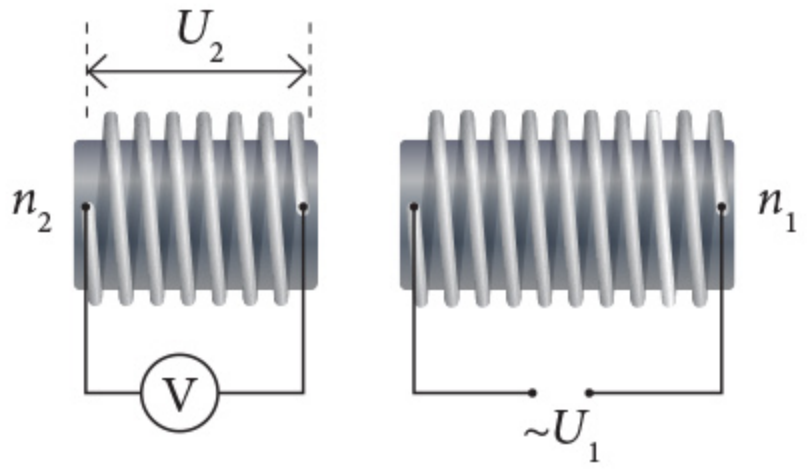
- **Transformator** zbudowany jest z dwóch (lub więcej) zwojnic umieszczonych na wspólnym rdzeniu. Dzięki transformatorom można zmienić napięcie prądu przemiennego.
- Stosunek napięć na uzwojeniach transformatora jest równy stosunkowi liczby zwojów:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

- Zastosowanie prądu przemiennego ogranicza straty podczas przesyłania energii elektrycznej na duże odległości.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Transformator obniża napięcie z 230 V do 24 V. Uzwojenie wtórne tego transformatora ma 240 zwojów. Oblicz liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego.
2. Do uzwojenia pierwotnego transformatora mającego 20 razy więcej zwojów na uzwojeniu wtórnym podłączono baterię o napięciu 4,5 V. Jakie będzie napięcie na uzwojeniu wtórnym?
3. Aneta umieściła obok siebie dwie zwojnice, tak jak przedstawiono na rysunku. Okazało się, że napięcie na zwojnicy $n_2$ było mniejsze niż to, które można obliczyć ze wzoru (1). Dlaczego do obliczenia napięcia na zwojnicy $n_2$ nie można stosować tego wzoru?

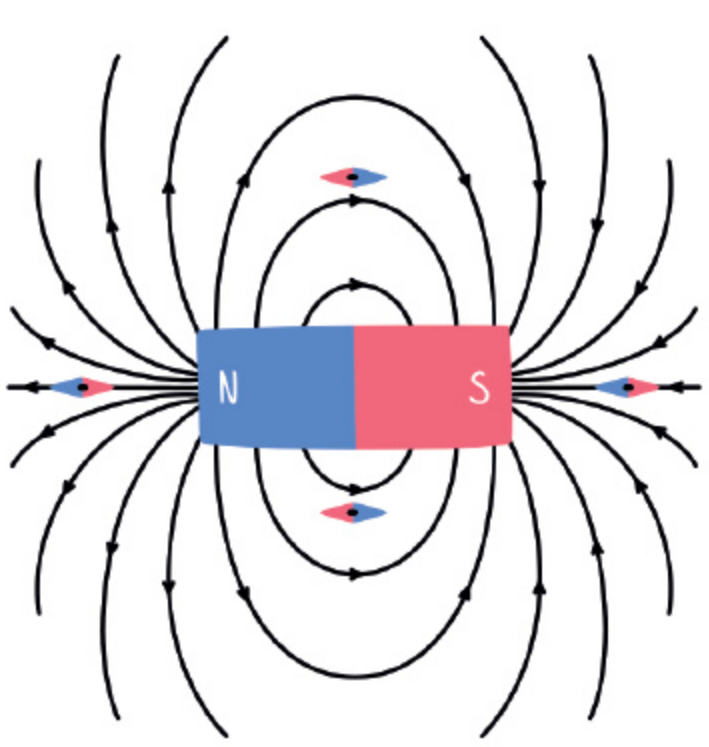



4. Gdy zmienimy odbiornik podłączony do uzwojenia wtórnego transformatora (bez zmiany napięcia zasilającego), zmieni się natężenie prądu płynącego przez to uzwojenie. Czy równocześnie zmieni się natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym? Uzasadnij odpowiedź.
5. Elektrownia przesyła w ciągu doby 2,5 GWh energii elektrycznej za pomocą sieci o napięciu 110 kV. Oblicz średnie dobowe natężenie prądu elektrycznego w tej sieci.

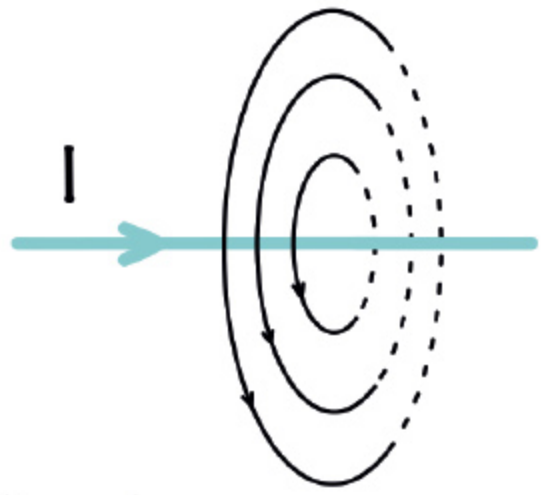
# ELEKTROMAGNETYZM

## POLE MAGNETYCZNE

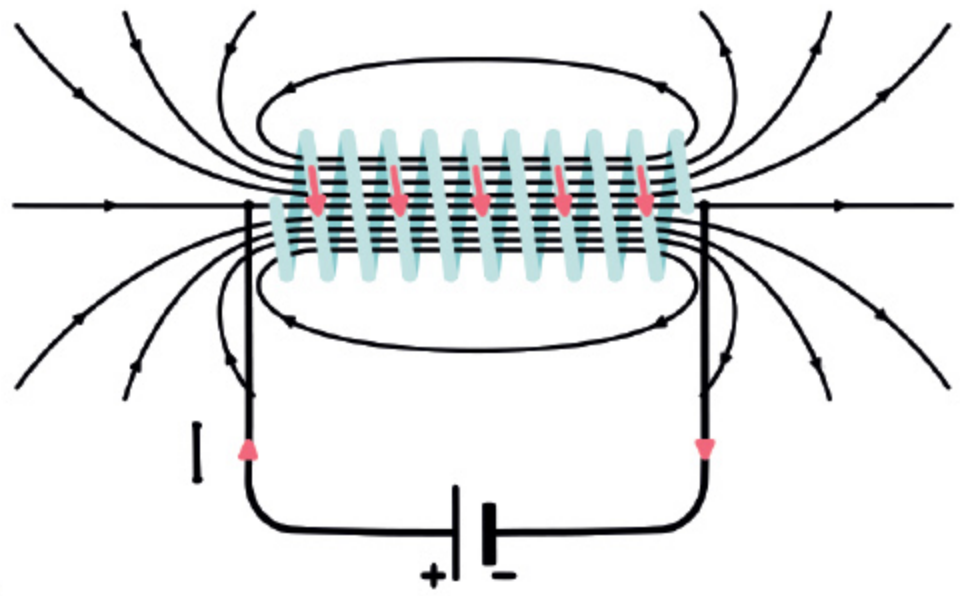
magnes sztabkowy




prostoliniowy przewodnik z prądem

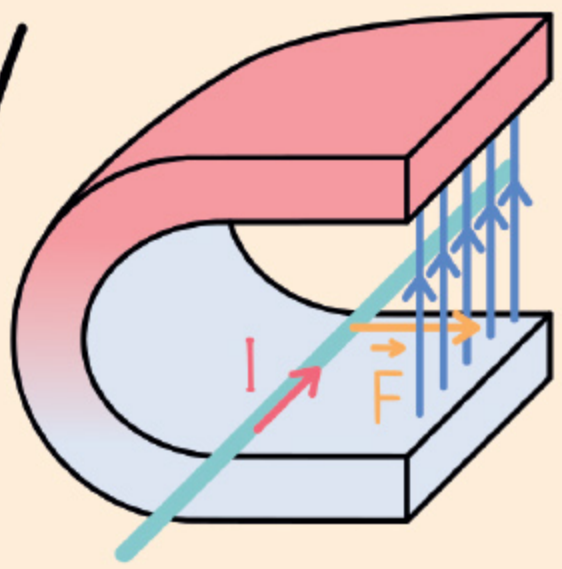



zwojnica

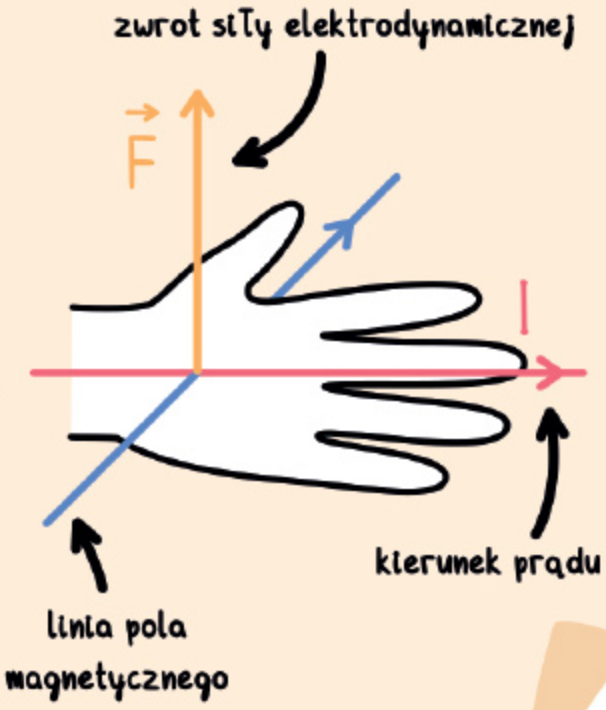



## SIŁY MAGNETYCZNE

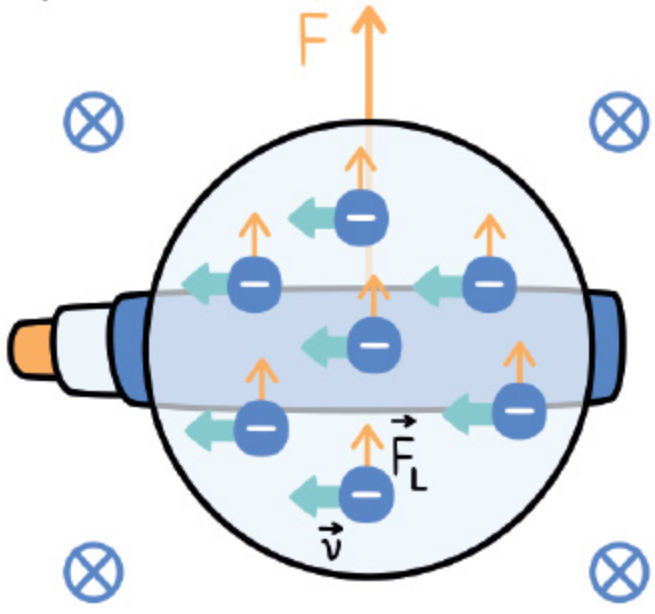
### siła elektrodynamiczna



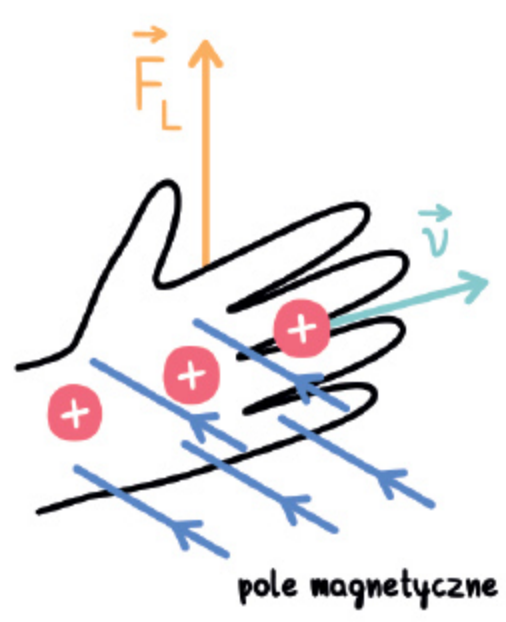

Na przewód z prądem umieszczony nierównolegle do linii pola magnetycznego działa siła elektrodynamiczna prostopadła do przewodu i do linii tego pola.




### siła Lorentza

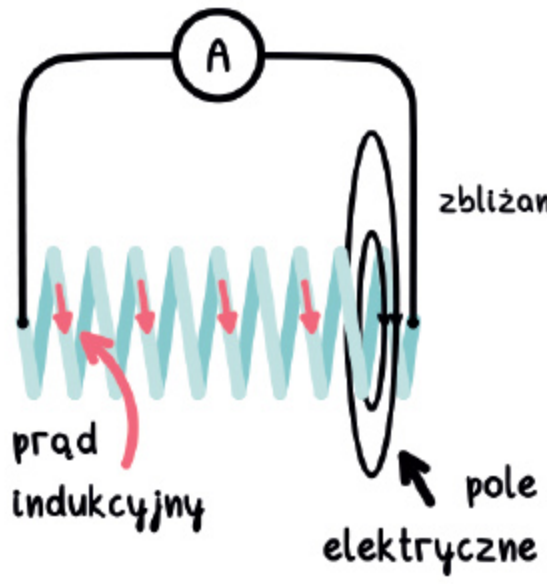


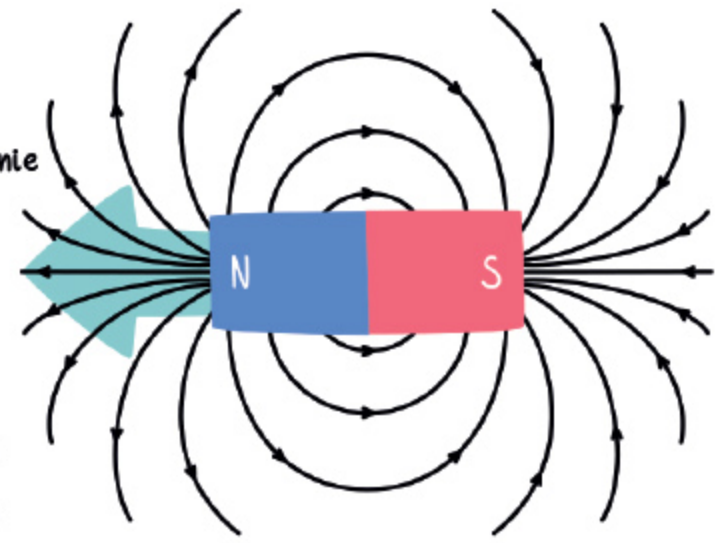

Pole magnetyczne oddziałuje na cząstki naładowane poruszające się nierównolegle do linii pola

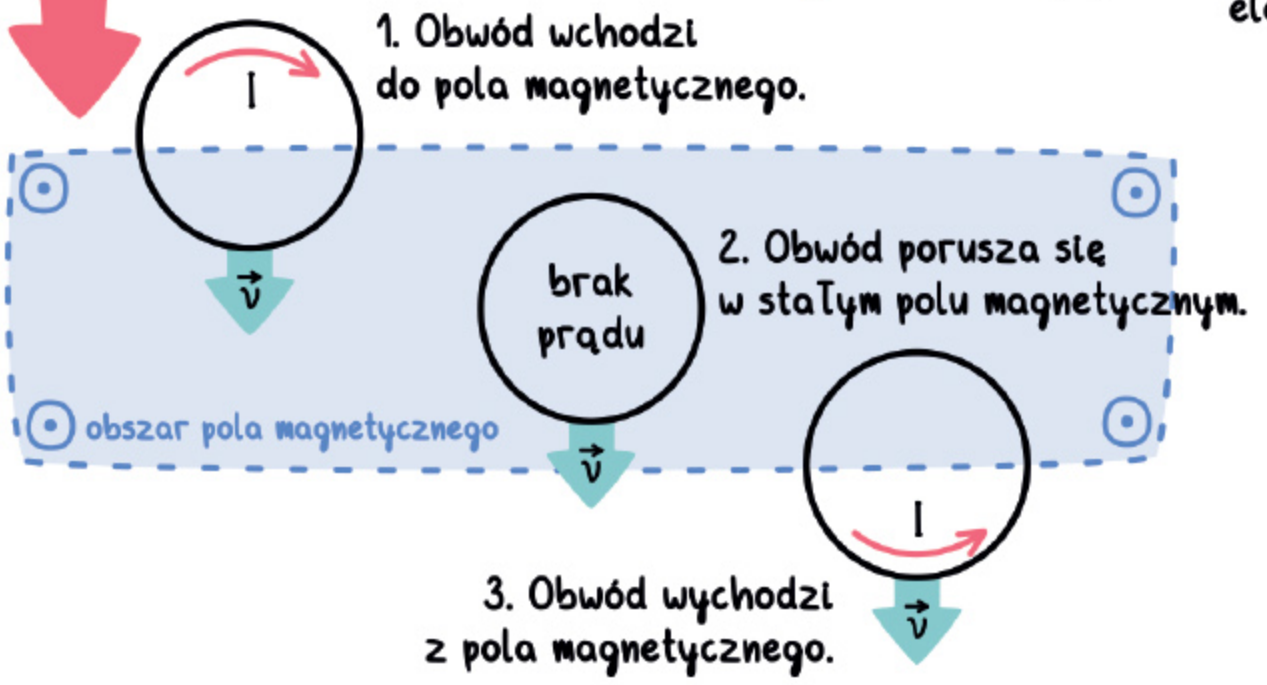


## Indukcja elektromagnetyczna

Wzbudzanie prądu w wyniku zmian pola magnetycznego obejmowanego przez obwód.

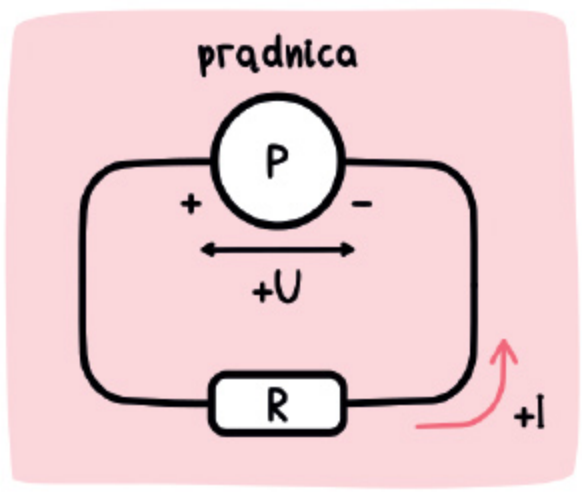


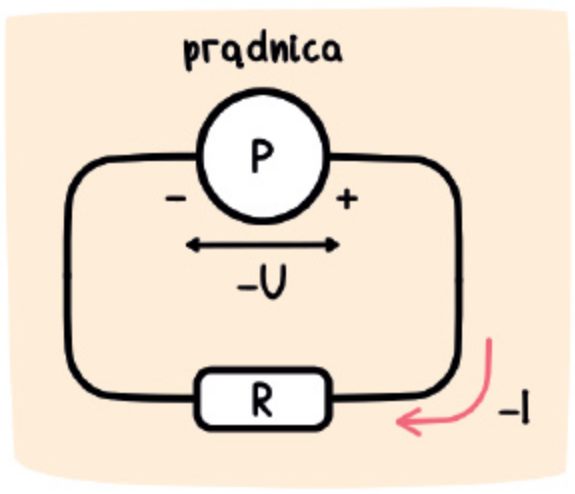



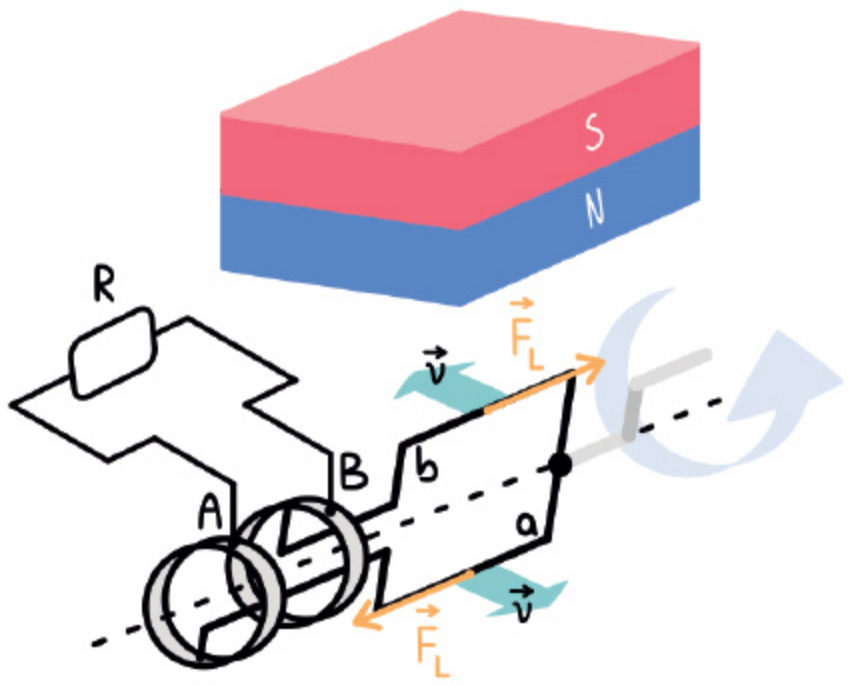



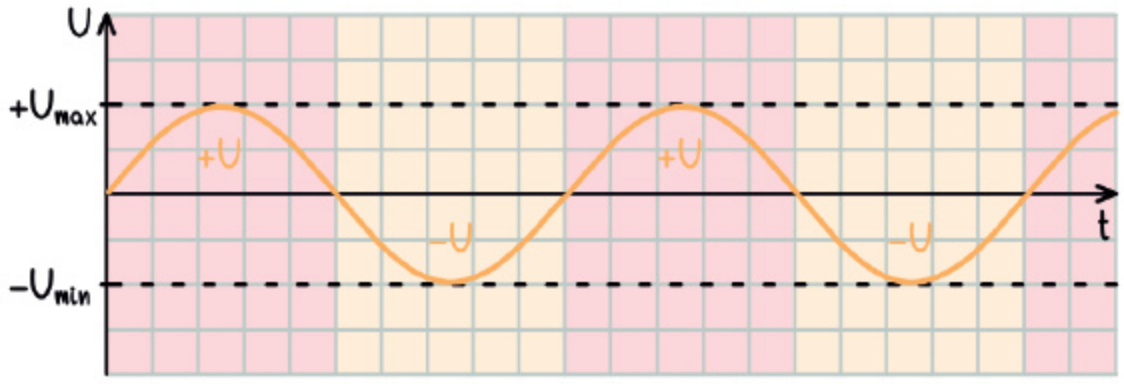

## PRĄDNICA

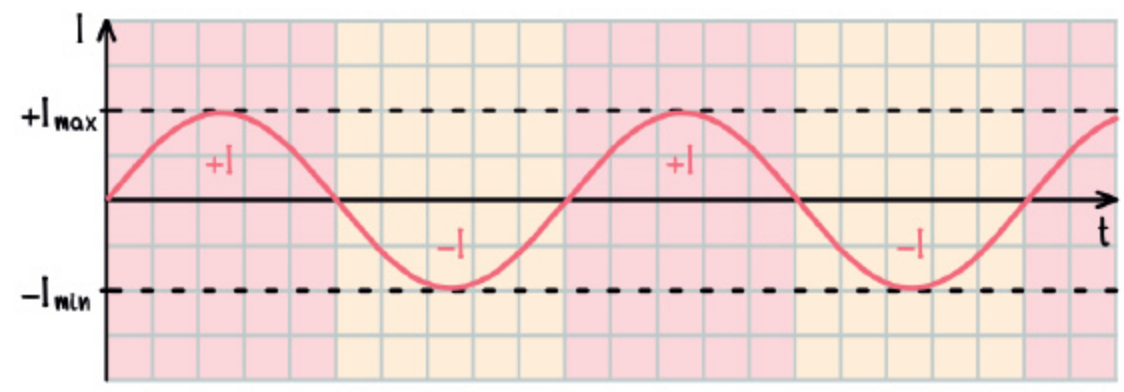
**Prądnica** to urządzenie wytwarzające napięcie elektryczne dzięki pracy siły zewnętrznej.

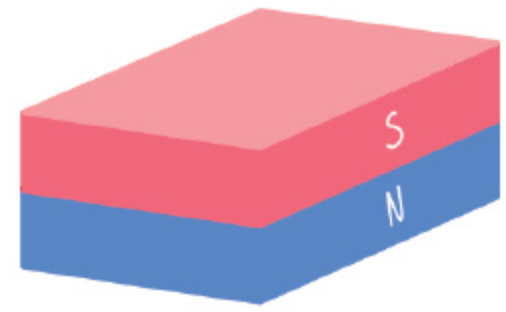



Napięcie powstające na zaciskach prądnicy jest **napięciem przemiennym.**

W odbiornikach podłączonych do napięcia przemiennego płynie **prąd przemienny.**

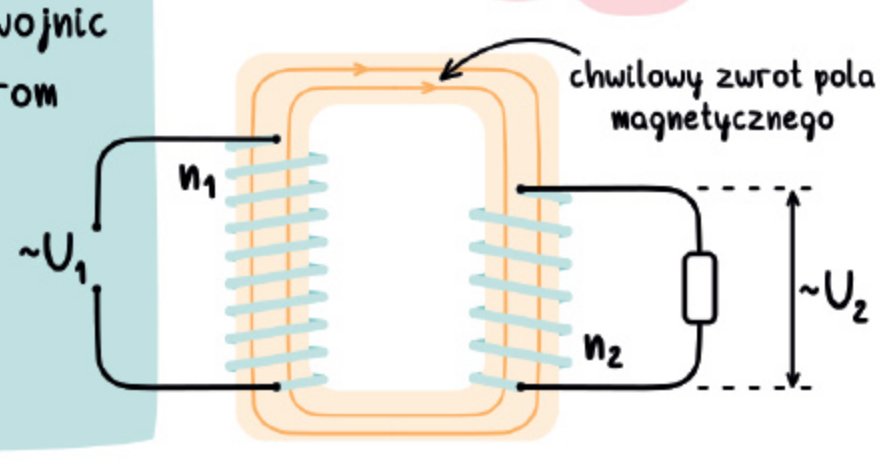
średnia moc prądu przemiennego

$$P = U_{sk} \cdot I_{sk}$$

F

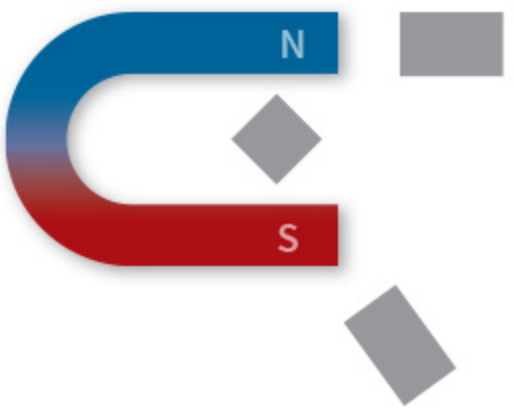
**Transformator** zbudowany jest z dwóch (lub więcej) zwojnic umieszczonych na wspólnym rdzeniu. Dzięki transformatorom można zmienić napięcie prądu przemiennego.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

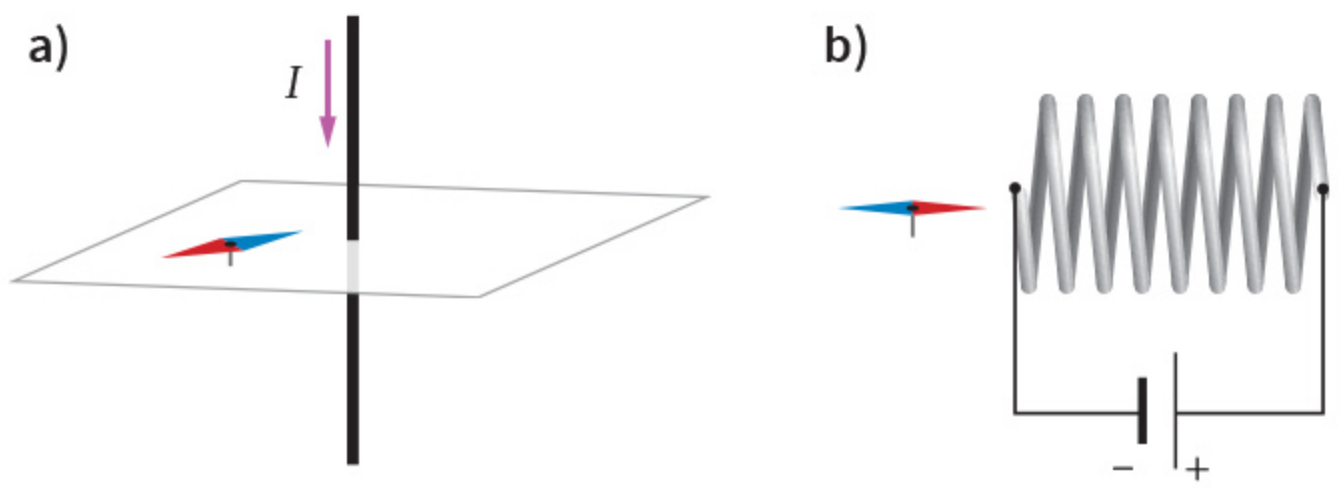


## PYTANIA I ZADANIA

1. W pobliżu silnego magnesu trwałego umieszczono niewielkie kawałki żelaza. Przerysuj schemat do zeszytu i zaznacz na nim bieguny magnetyczne w tych kawałkach.




2. Na rysunkach przedstawiono źródła pól magnetycznych w postaci przewodów z prądem.




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

| | | | |
|---|---|---|---|
| **1.** | Gdy w prostoliniowym przewodzie popłynie prąd, to igła magnetyczna ustawi się tak, jak przedstawiono na rysunku a. | **P** | **F** |
| **2.** | Gdy w zwojnicy popłynie prąd, to igła magnetyczna ustawi się tak, jak przedstawiono na rysunku b. | **P** | **F** |
| **3.** | Im dalej od przewodu z prądem ustawiona jest igła, tym słabiej pole magnetyczne działa na tę igłę. | **P** | **F** |

3. Do obszaru jednorodnego pola magnetycznego skierowano dwie cząstki naładowane o takich samych prędkościach. Cząstki poruszały się niezależnie od siebie. Na rysunku przedstawiono tory obu cząstek.

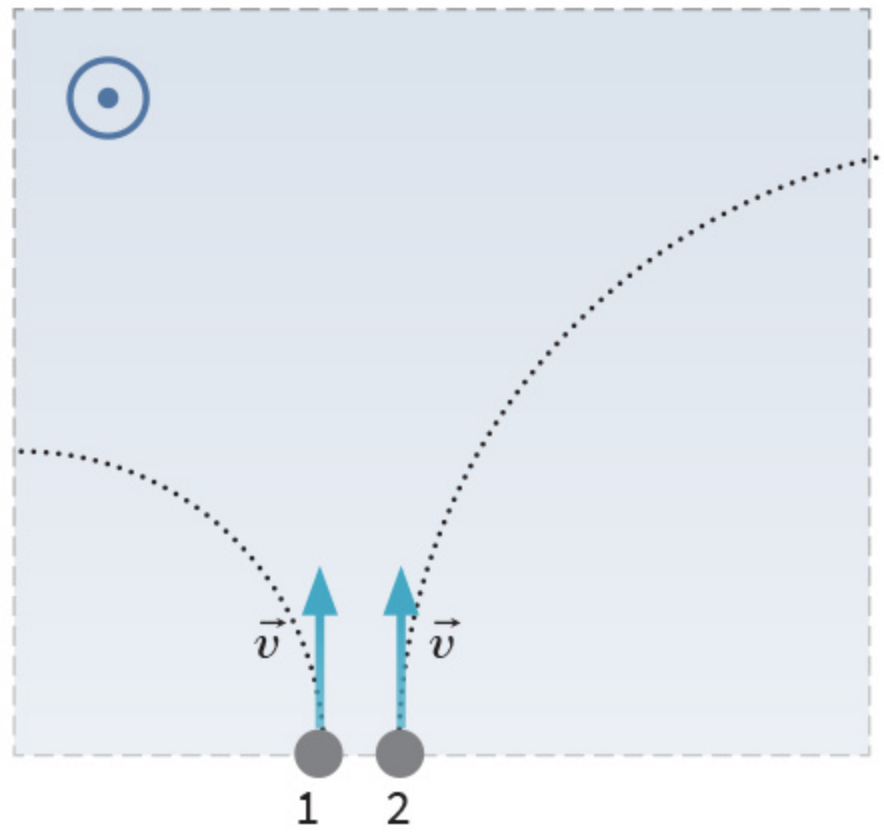
**Wybierz wszystkie zdania prawdziwe.**

**A.** Jeśli cząstki miały taką samą wartość bezwzględną ładunku, to cząstka 1 miała większą masę.

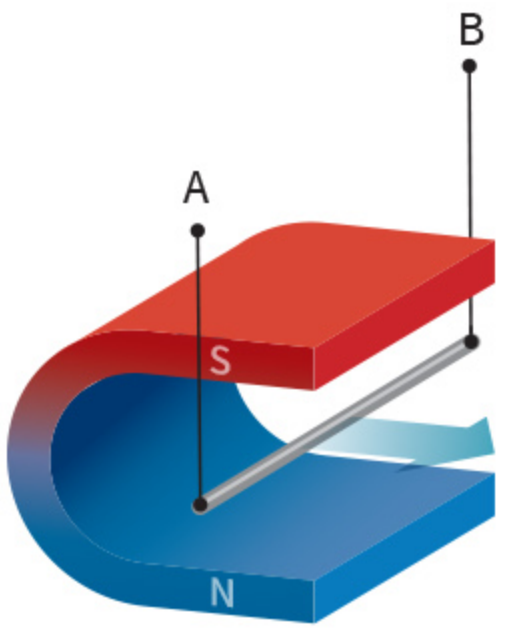
**B.** Jeśli cząstki miały taką samą masę, to cząstka 1 miała ładunek o większej wartości bezwzględnej.

**C.** Cząstka 1 miała ładunek ujemny, a cząstka 2 dodatni.

**D.** Gdyby prędkości cząstek były równoległe do linii pola magnetycznego, to cząstki poruszałyby się po spirali.

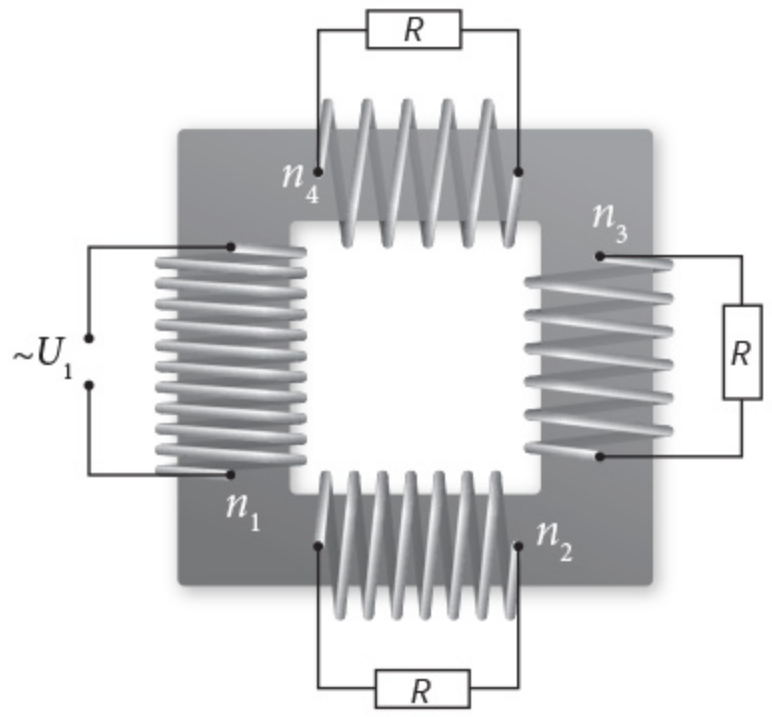


**4.** W polu magnetycznym zawieszono przewód w sposób przedstawiony na rysunku (w punktach A i B podłączony do źródła napięcia). Gdy w przewodzie zaczął płynąć prąd, wychylił się on w stronę pokazaną za pomocą strzałki.
Ustal kierunek przepływu prądu w przewodzie.




**5.** Ziemię można traktować jak wielki magnes. Opisz, w których częściach naszej planety linie pola magnetycznego są w przybliżeniu równoległe do jej powierzchni, a w których są do niej prostopadłe.

**6.** Transformator może również pełnić funkcję rozdzielni. W tym celu oprócz uzwojenia pierwotnego na rdzeniu umieszcza się kilka uzwojeń wtórnych. Na rysunku przedstawiono schemat takiego transformatora. Do każdego z uzwojeń wtórnych dołączony jest opornik o takim samym oporze. Możemy założyć, że w opisywanym układzie nie ma strat energii.



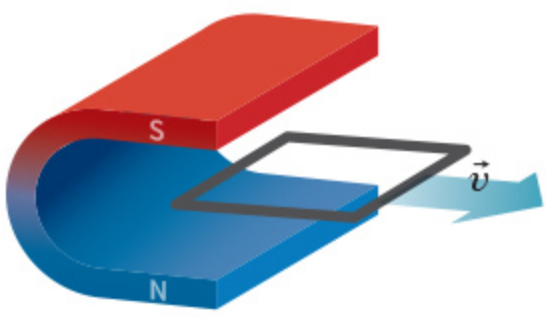

$n_1 = 800$ $n_3 = 300$
$n_2 = 400$ $n_4 = 200$

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

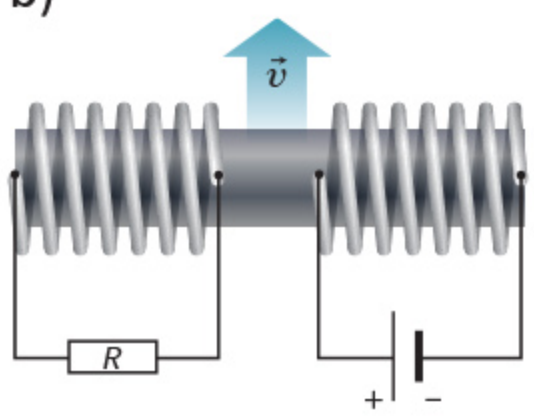
| | | | |
|---|---|---|---|
| **1.** | Najmniejsze napięcie jest na uzwojeniu $n_4$. | **P** | **F** |
| **2.** | Pole magnetyczne w rdzeniu jest wytwarzane wyłącznie przez uzwojenie pierwotne. | **P** | **F** |
| **3.** | Suma mocy na uzwojeniach wtórnych jest równa mocy na uzwojeniu pierwotnym. | **P** | **F** |

**7.** W których z przedstawionych sytuacji powstanie prąd indukcyjny? W każdej z nich ruch jest jednostajny i odbywa się po linii prostej. Uzasadnij odpowiedź

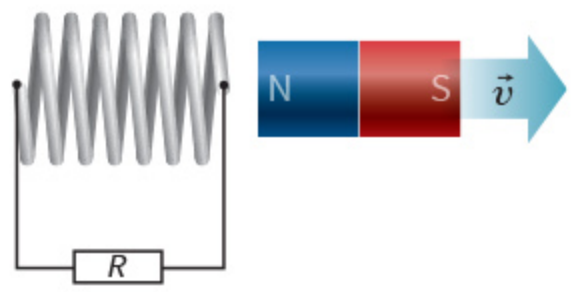
a)



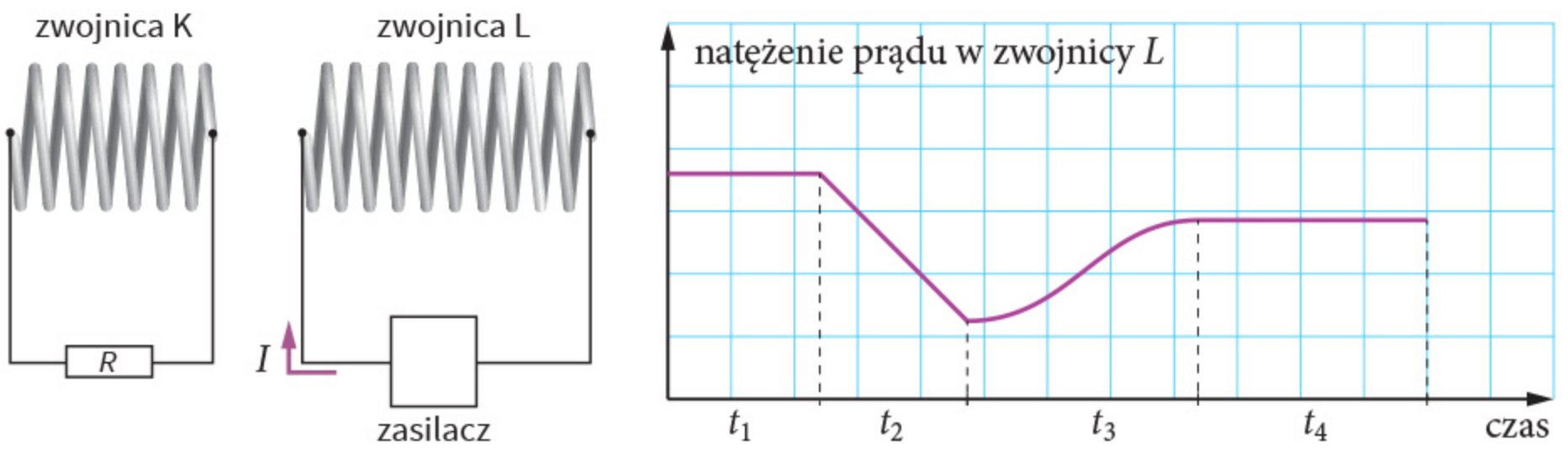

b)




c)



**8.** W pobliżu zwojnicy L umieszczono zwojnicę K. Przez zwojnicę L płynie prąd, którego natężenie można zmieniać. Końce zwojnicy K są podłączone do opornika *R*. W których przedziałach czasu w zwojnicy K popłynie prąd indukcyjny?




**9.** Napięcie w sieci elektrycznej w USA jest równe 110 V. Karol podczas podróży po tym kraju używał grzałki, którą zabrał z Polski. Moc grzałki w Polsce była równa 600 W. Oszacuj moc grzałki po podłączeniu jej do sieci elektrycznej w USA. Zakładamy, że opór grzałki nie zmienił się po podłączeniu do innego niż w Polsce napięcia.

**10.** Amperomierz podłączono do obwodu prądu przemiennego i otrzymano wynik pomiaru przedstawiony na fotografii. Na podstawie tego wyniku zapisz natężenie skuteczne oraz natężenie maksymalne prądu w tym obwodzie.

## Najważniejsze pojęcia

- elektromagnes [*electromagnet*] 115
- ferromagnetyk [*ferromagnetic*] 109–110
- indukcja elektromagnetyczna [*electromagnetic induction*] 140–149
- indukcja magnetyczna [*magnetic induction*] 109
- linie pola magnetycznego [*magnetic fieldlines*] 106–107
- magnes [*magnet*] 106
- magnetosfera [*magnetosphere*] 134
- napięcie znamionowe [*nominal voltage*] 160
- pole magnetyczne [*magnetic field*] 106
- prądnica [*generator*] 151
- prąd przemienny [*alternating current*] 157
- sieci energetyczne [*energy networks*] 168
- silnik elektryczny [*electric engine*] 121
- siła elektrodynamiczna [*electrodynamic force, magnetic force*] 119, 121
- siła Lorentza [*Lorentz force, magnetic force*] 126
- siła magnetyczna [*magnetic force*] 118, 126
- transformator [*transformer*] 163
- wiatr słoneczny [*solar wind*] 134
- zorza polarna [*aurora borealis*] 138
- zwojnica [*coil*] 114

# FIZYKA ATOMOWA

Skąd wiemy, z czego są zbudowane odległe gwiazdy? Dlaczego świeci dioda?
Dlaczego trawa jest zielona? Odpowiedzi na te pytania daje **FIZYKA ATOMOWA.**

# 24. Promieniowanie elektromagnetyczne

- Emisja fali elektromagnetycznej
- Pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego
- Właściwości różnych fal elektromagnetycznych

➔ **Przypomnij sobie** podstawowe wielkości opisujące fale oraz wiadomości na temat zjawiska rezonansu.

Fale elektromagnetyczne, które nazywa się też promieniowaniem elektromagnetycznym, otaczają nas ze wszystkich stron. To fale radiowe, dzięki którym korzystamy z radia i telewizji, promieniowanie podczerwone, które skrzętnie wykorzystujemy, gdy wystawiamy w marcu twarz do słońca, by poczuć przyjemne ciepło, czy wreszcie światło, na które czuły jest nasz wzrok. To także promieniowanie nadfioletowe, które nas opala, i promieniowanie rentgenowskie, niekiedy niezbędne do postawienia precyzyjnej diagnozy lekarskiej. Wszystkie te rodzaje promieniowania oraz mikrofale i promieniowanie gamma mają tę samą naturę.

## Powstawanie i pochłanianie fali elektromagnetycznej

**Fala elektromagnetyczna** to rozchodzące się i wzajemnie przenikające zmienne pola elektryczne i magnetyczne.

Prędkość fali elektromagnetycznej w próżni wynosi ok. 300 000 km/s i jest to największa w przyrodzie prędkość, z jaką przekazywana jest energia. Źródłem takiej fali jest każdy ładunek elektryczny poruszający się z przyspieszeniem. Materia na Ziemi zbudowana jest z cząsteczek, których składniki mające ładunek są w ciągłym ruchu drgającym i tym samym emitują fale elektromagnetyczne. Z kolei w dalekim kosmosie zdecydowana większość materii to jony, czyli cząsteczki naładowane. One również są w ciągłym ruchu, więc są źródłem fal elektromagnetycznych, które docierają m.in. do Ziemi. Nadajnikiem fal elektromagnetycznych jest również każdy obwód ze zmieniającym się prądem elektrycznym, bo ładunki tworzące ten prąd zmieniają prędkość. Częstotliwość emitowanych fal jest w tym przypadku równa częstotliwości zmian prądu.

Do opisu fal elektromagnetycznych używamy wielkości opisujących również inne fale: częstotliwości $f$ oraz długości fali $\lambda$. Te dwie wielkości w przypadku fal elektromagnetycznych rozchodzących się w próżni lub w powietrzu związane są ze sobą zależnością:

$$\lambda \cdot f = c \tag{1}$$

gdzie $c = 3 \cdot 10^8$ m/s – prędkość światła w próżni.

Fala elektromagnetyczna napotykająca ładunek elektryczny pobudza go do drgań, podobnie jak fala na wodzie wprawia w drgania łódkę lub kajak. Wówczas energia fali jest przekazywana drgającemu ciału. Każde ciało ma swoją częstotliwość drgań swobodnych nazywaną częstotliwością własną. Przekaz energii jest największy, gdy częstotliwość fali jest równa częstotliwości własnej ciała. To zjawisko nazywamy **rezonansem**. Cząsteczki w różnym stopniu pochłaniają padające promieniowanie. Jeśli częstotliwość fali padającej na cząsteczki ośrodka jest zupełnie różna od ich częstotliwości własnej, fala przechodzi przez ośrodek niemal w całości (np. światło przez szkło). Natomiast gdy częstotliwość fali jest zbliżona do jednej z częstotliwości własnych cząsteczek ciała, fala zostanie w dużym stopniu pochłonięta. Energia fali w tym przypadku zmienia się w energię wewnętrzną ciała.

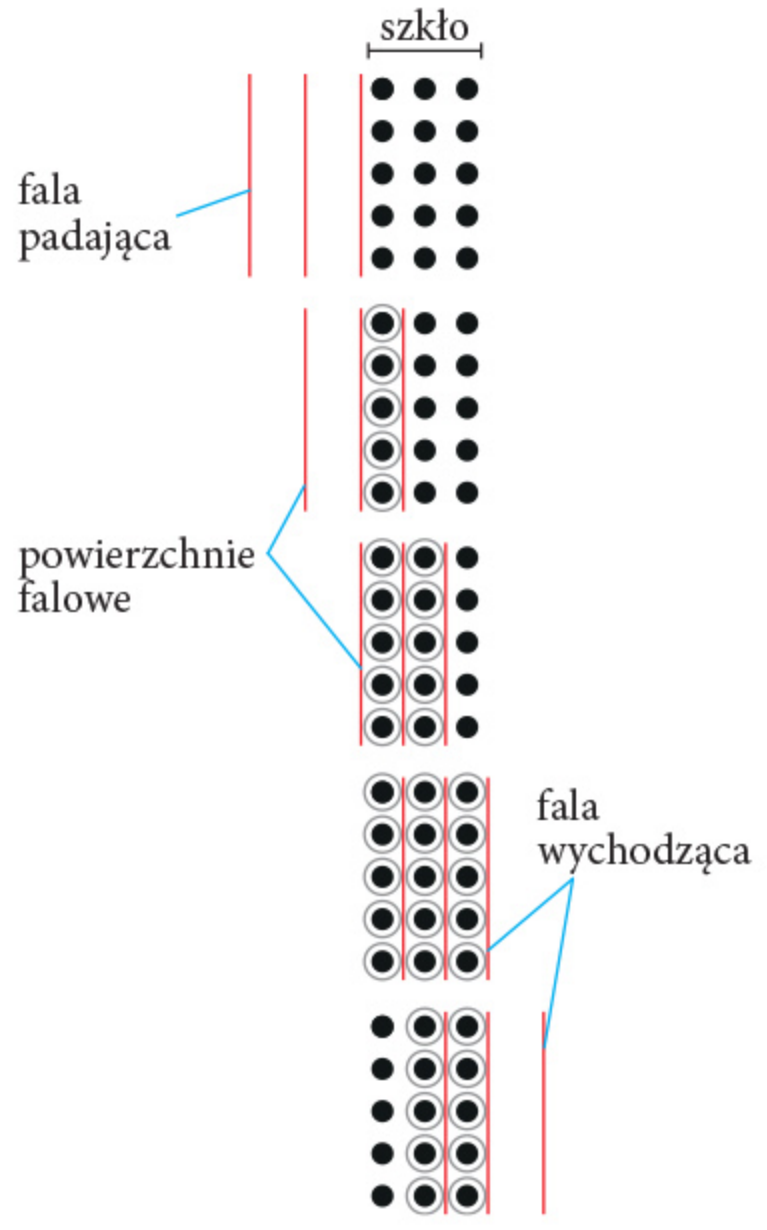
Drgające pod wpływem fali ładunki w cząsteczkach same emitują fale elektromagnetyczne o tej samej częstotliwości, co fala padająca. Mówimy wtedy o **rozpraszaniu fali**. Na przykład cząsteczki tworzące powietrze rozpraszają światło słoneczne, dlatego dzienne niebo nie jest czarne. W rzeczywistości, gdy patrzymy na ściany, meble czy jakikolwiek przedmiot, widzimy światło rozproszone przez ładunki elektryczne w cząsteczkach tych ciał. Należy przy tym pamiętać, że tak naprawdę to widzimy efekt superpozycji (nakładania się) olbrzymiej liczby drobnych fal rozproszonych. Szczegółowy opis tych zjawisk jest bardzo skomplikowany.

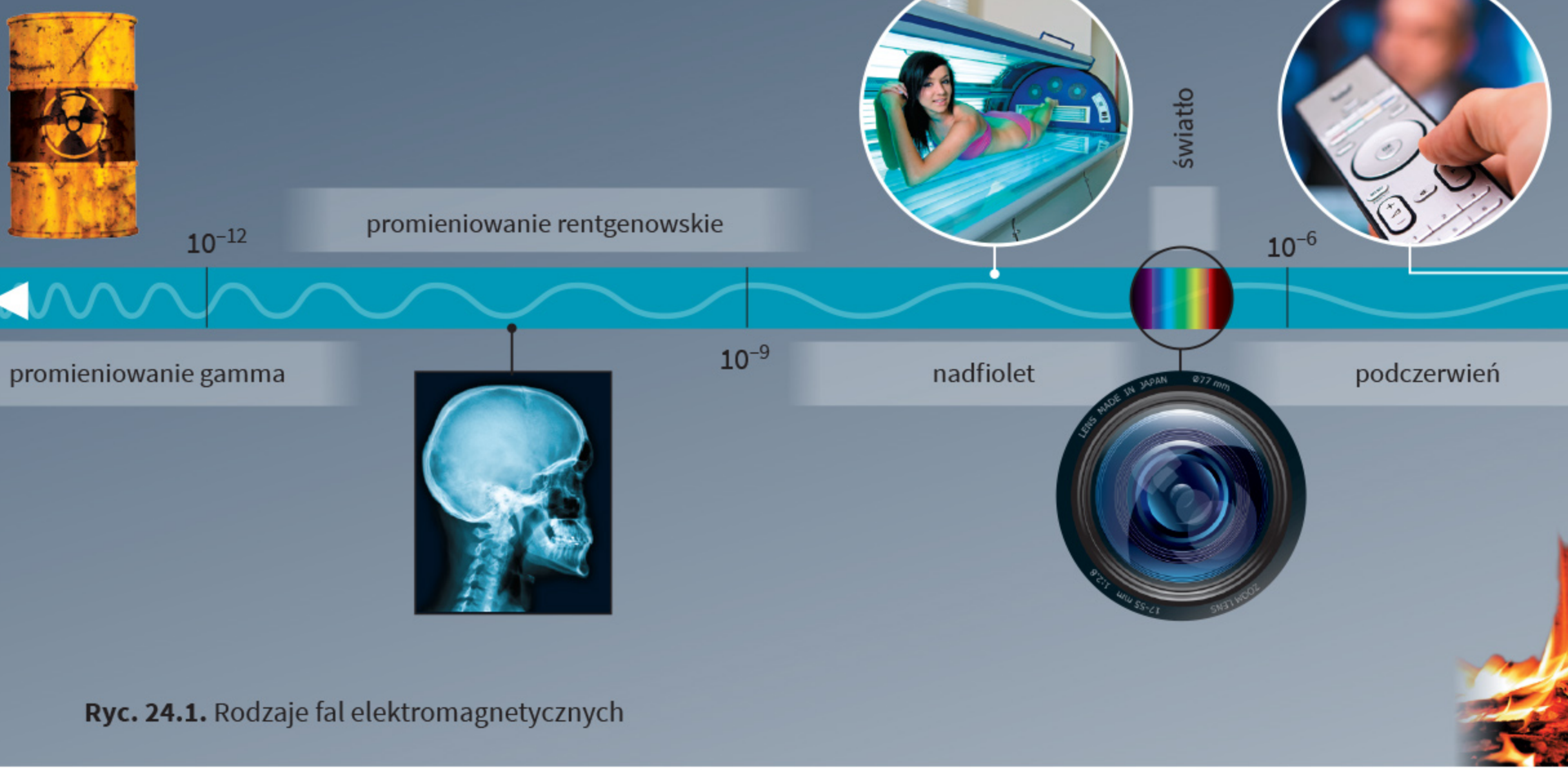
## WARTO WIEDZIEĆ

### Jak światło przechodzi przez szkło

Światło, jak każda fala elektromagnetyczna, wchodząc do szkła pobudza do drgań ładunki znajdujące się w atomach. Drgające ładunki stają się źródłami kulistych fal rozproszonych. Fale kuliste nakładają się na siebie. Te biegnące wstecz wygaszają się wzajemnie. Wskutek tego po wyjściu ze szkła obserwujemy jedną falę płaską (ryc.). To minimalne opóźnienie związane z pochłanianiem i zaraz potem emisją fali sprawia, że światło w szkle porusza się z mniejszą prędkością niż w próżni.

Częstotliwość rezonansowa atomów tworzących szkło jest zupełnie różna od częstotliwości światła. Drgania atomów spowodowane przez światło są na tyle małe, że nie powodują one zderzeń z innymi atomami. Energia fali „przechodzi” przez szkło prawie bez strat. Dlatego właśnie szkło jest przezroczyste.

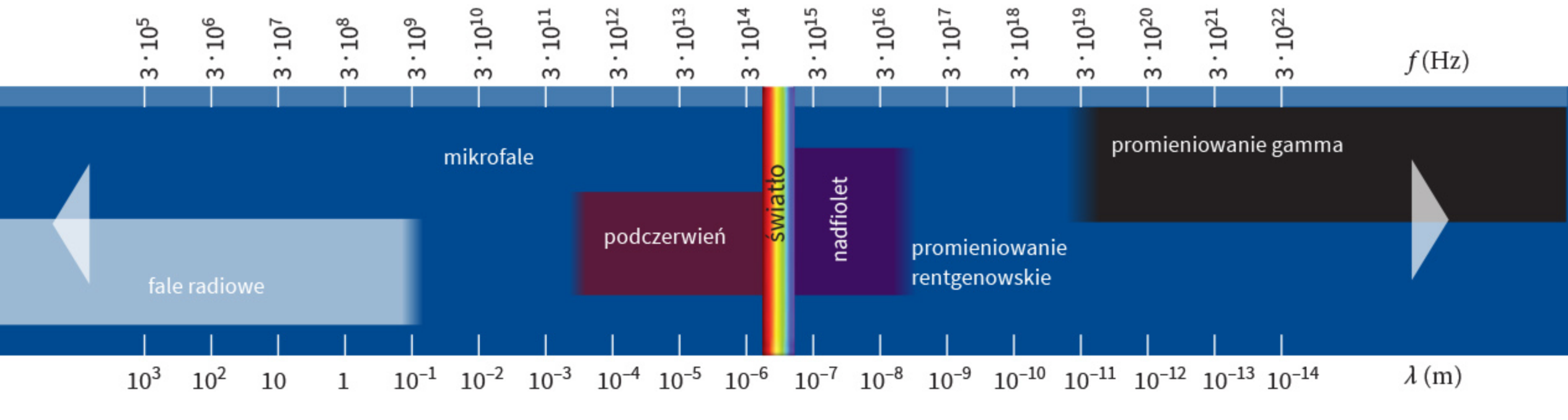





**Ryc. 24.1.** Rodzaje fal elektromagnetycznych

## Rodzaje i właściwości fal elektromagnetycznych

Skutki oddziaływania fali elektromagnetycznej z materią zależą od częstotliwości fali. Z tego powodu fale elektromagnetyczne o różnych częstotliwościach znalazły różne zastosowania i nadano im różne nazwy (ryc. 24.1). Na rycinie 24.2 poszczególne rodzaje fal elektromagnetycznych powiązane są z częstotliwością i długością fali.




**Ryc. 24.2.** Podział fal elektromagnetycznych. Granice między poszczególnymi zakresami mają charakter umowny. Skala nie jest liniowa, gdyż na osi zaznaczono kolejne potęgi liczby 10

mikrofale

$10^3$

$\lambda$ (m)

$10^{-3}$

1

fale radiowe

fale radiowe

**Fale radiowe** to fale elektromagnetyczne o najmniejszych częstotliwościach. Ich źródłem może być przemienny prąd elektryczny płynący w antenie. Prąd przemienny charakteryzuje się tym, że płynie raz w jedną, raz w drugą stronę. To znaczy, że elektrony w przewodniku poruszają się ruchem drgającym w sposób zsynchronizowany. Wytworzone w ten sposób fale elektromagnetyczne są w stanie wzbudzić taki sam ruch elektronów w antenie odbiorczej. Układy elektroniczne wzmacniają sygnał przekazywany przez fale i przekształcają go do postaci zrozumiałej dla człowieka. Dzięki falom radiowym przekazujemy informacje w postaci obrazu i dźwięku (telewizja, radio itp.). Sieci telefonii komórkowej wykorzystują częstotliwości z pogranicza fal radiowych i mikrofal.

W dalekim kosmosie znajdziemy naturalne silne źródła fal radiowych. Astronomowie prowadzą „nasłuch" tych fal za pomocą specjalnych anten, zwanych **radioteleskopami** (ryc. 24.3).

**Ryc. 24.3.** Radioteleskop w Piwnicach koło Torunia. Średnica czaszy tego radioteleskopu to 32 metry

**PRZYKŁAD 1.**

Częstotliwość fal elektromagnetycznych używanych przez pewien smartfon do odbierania połączeń to ok. 1,8 GHz.

a) Jaka jest częstotliwość drgań elektronów w antenie tego smartfona w trakcie rozmowy?

b) Obliczmy długość fali o takiej częstotliwości.

a) Częstotliwość drgań elektronów w antenie jest równa częstotliwości fali elektromagnetycznej, zatem elektrony wykonują 1,8 miliarda drgań w ciągu sekundy. Aż trudno to sobie wyobrazić.

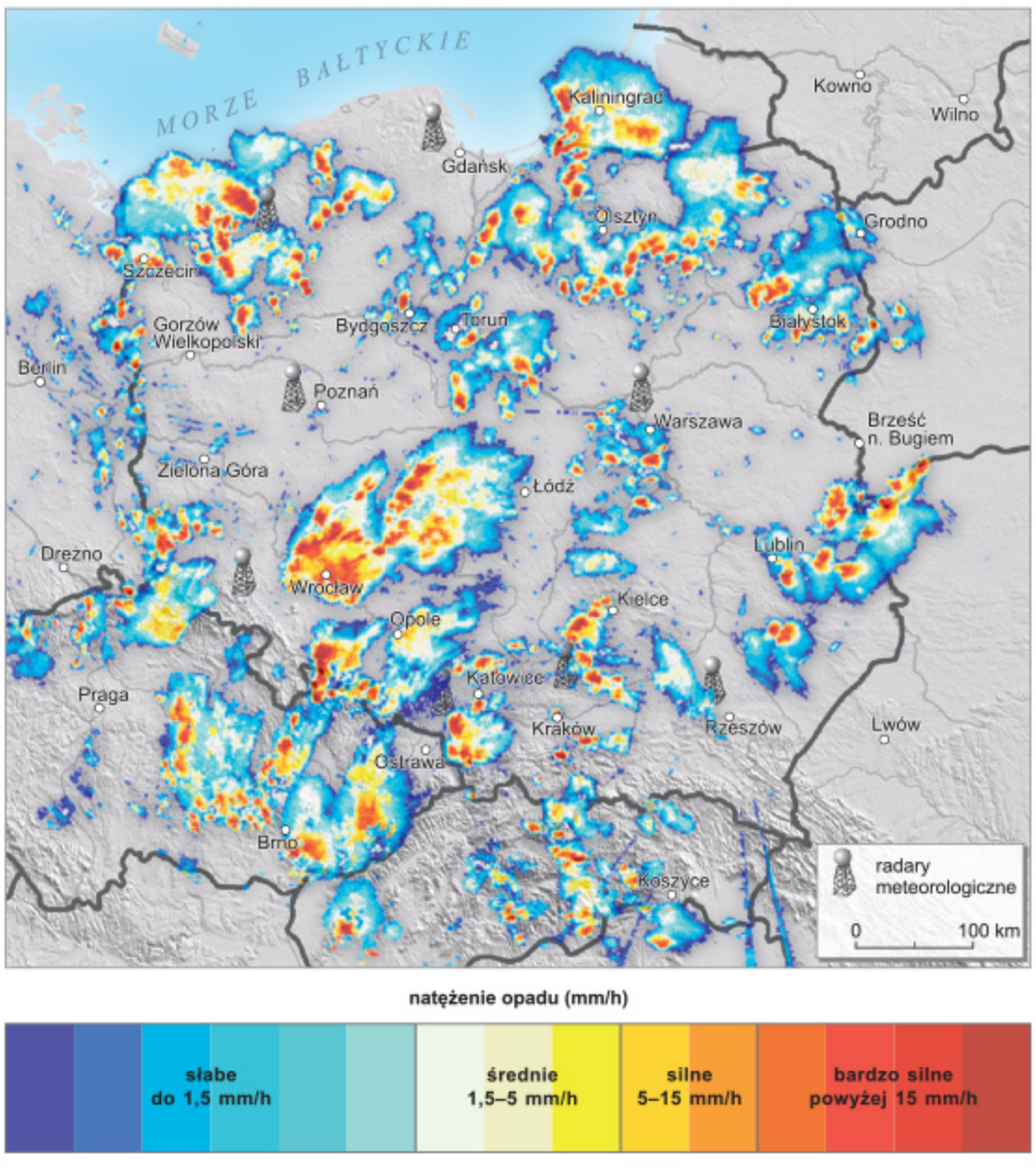
b) Długość fali możemy obliczyć z przekształconej postaci wzoru (1):

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

Podstawiamy dane:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{1{,}8 \cdot 10^9 \ \frac{1}{\mathrm{s}}} \approx 0{,}17 \ \mathrm{m}$$

**Mikrofale** wytwarzane są przez specjalne lampy elektronowe, w których częstotliwości zmian prądu elektrycznego mogą sięgać dziesiątek GHz. Fale te mają długość mniejszą od fal radiowych, są zatem skuteczniej od nich rozpraszane na niewielkich obiektach, takich jak elementy konstrukcji samochodu, samolotu, a nawet krople wody. Z tego powodu mikrofale wykorzystuje się w radarach. Radar po wysłaniu kilku impulsów mikrofal przestawia się na odbiór fali rozproszonej przez namierzane obiekty. Na podstawie analizy fali rozproszonej można wyciągnąć wnioski o odległości, prędkości i rozmiarach tych obiektów. Na stronie internetowej Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej można znaleźć obrazy radarowe chmur niosących opady deszczu nad Polską (ryc. 24.4).

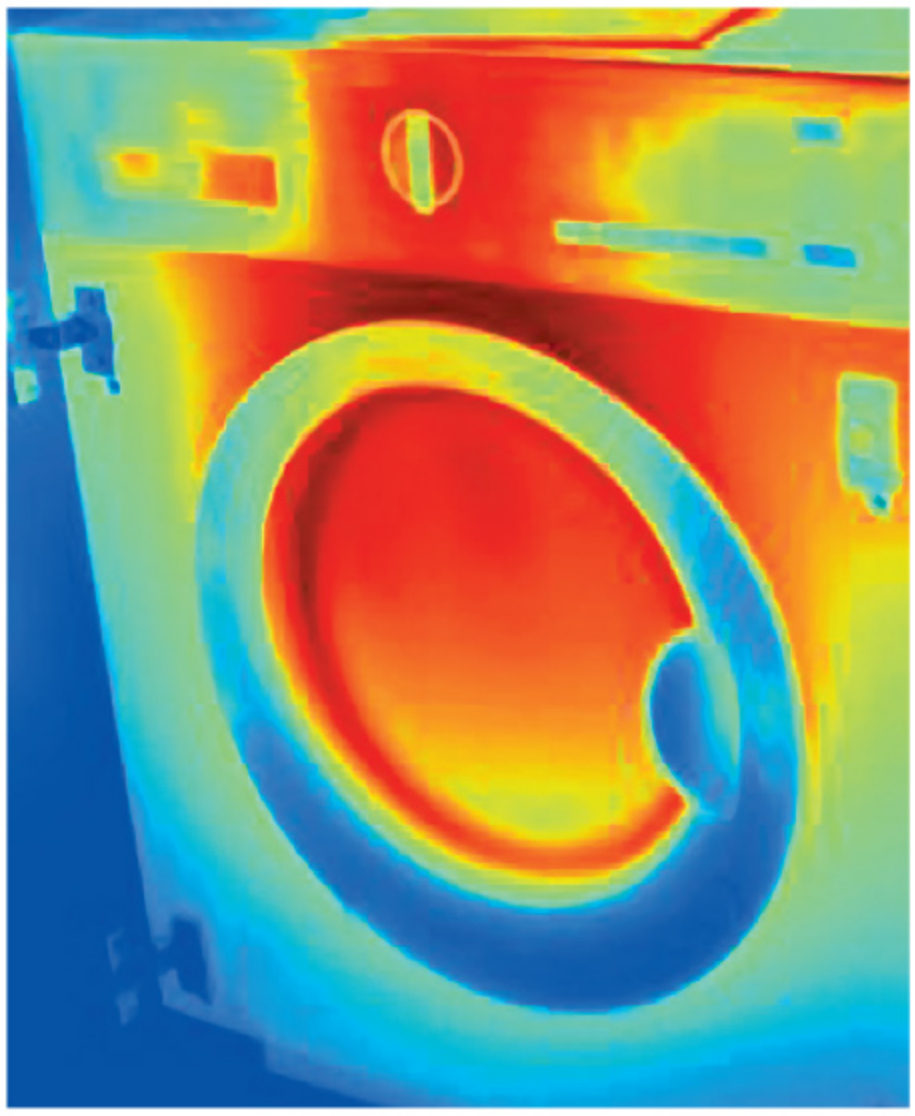



**Ryc. 24.4.** Mapa radarowa chmur deszczowych nad Polską. Im większa jest zawartość wody w chmurach, tym silniejsze jest echo radarowe; stąd można wnioskować o intensywności opadu

Promieniowanie mikrofalowe o częstotliwości 2,45 GHz wykorzystywane jest w kuchenkach mikrofalowych. Ta częstotliwość odpowiada jednej z częstotliwości drgań własnych cząsteczek wody. Mikrofale w kuchence powodują zatem silne drgania cząsteczek wody zawartych w potrawach (rezonans), dzięki czemu potrawy stają się gorące (im szybciej poruszają się cząsteczki tworzące dane ciało, tym wyższa jest jego temperatura).

**DOŚWIADCZENIE 1.**
W zamkniętej przestrzeni kuchenki mikrofalowej powstaje elektromagnetyczna fala stojąca. Spróbuj ją zobaczyć. Usuń z kuchenki obracający się talerz i wstaw na tacce plasterek żółtego sera o długości ok. 20 cm. Tacka powinna być podparta tak, by nie obracała się podczas pracy kuchenki. Uruchom kuchenkę na taki czas, by tylko niektóre części sera się stopiły. Zaobserwuj, jak są położone roztopione fragmenty sera. Jakie możesz wyciągnąć wnioski?

**Promieniowanie podczerwone** jest emitowane przez ciała ciepłe i gorące. Cząsteczki, z których zbudowane są ciała stałe i ciecze, pozostają w ciągłym ruchu, tak jak np. drgające jony sieci krystalicznej w ciałach stałych. Każda cząsteczka jest zatem źródłem fali elektromagnetycznej o częstotliwości równej częstotliwości jej drgań. Podczerwień powoduje nagrzewanie się powierzchni ciał, na które pada, gdyż częstotliwości fal z tego zakresu odpowiadają częstotliwościom drgań własnych cząsteczek wielu ciał stałych i cieczy. W tej sytuacji cząsteczki bardzo efektywnie pochłaniają energię niesioną przez falę.



Ryc. 24.5. Zdjęcie pralki zrobione kamerą termowizyjną. Na podstawie zdjęcia można określić temperaturę wody w pralce

Dzięki podczerwieni jest nam ciepło, gdy siedzimy przy ognisku. W wyniku pochłaniania światła i podczerwieni dochodzących ze Słońca nagrzewa się powierzchnia Ziemi. Promieniowanie podczerwone znalazło również zastosowanie techniczne w takich urządzeniach jak piloty do urządzeń RTV. Z kolei dzięki kamerom termowizyjnym można zobaczyć podczerwień emitowaną przez otaczające nas ciała, a nawet zmierzyć ich temperaturę (ryc. 24.5).

**DOŚWIADCZENIE 2.**

Uruchom aparat fotograficzny smartfona, a w stronę obiektywu skieruj pilot telewizyjny. Naciskaj różne przyciski pilota. Czy smartfon rejestruje jakiś błysk?

## WARTO WIEDZIEĆ

### Zdjęcia w podczerwieni

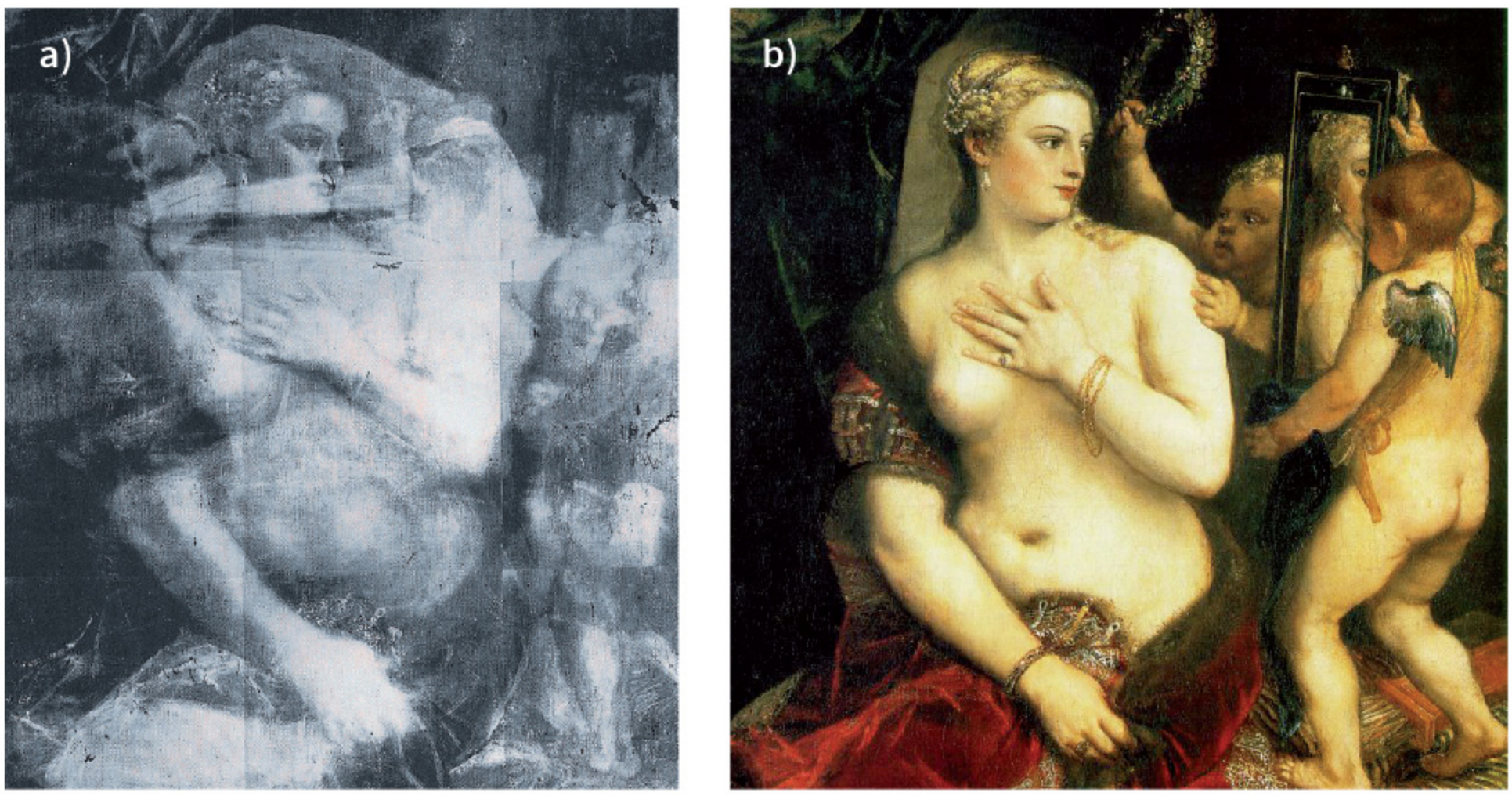
Pilot do sterowania telewizorem komunikuje się z nim dzięki wiązce podczerwieni. Można ją zobaczyć za pośrednictwem zwykłego aparatu fotograficznego smartfona (doświadczenie 2). Jest to tzw. bliska podczerwień, o częstotliwościach zbliżonych do zakresu światła, i detektory światła używane w aparatach również są na nią czułe. Za pomocą wielu pilotów jednocześnie można w zupełnej ciemności (bez lampy błyskowej) zrobić sobie zdjęcie w podczerwieni. Zdjęcie zamieszczone obok zostało wykonane zwykłą kamerką internetową z usuniętym filtrem pochłaniającym podczerwień.

**Światło**, czyli promieniowanie widzialne, jest dla nas zazwyczaj głównym źródłem informacji o otoczeniu. Ten wąski przedział długości fal – od 0,4 μm do 0,7 μm – wyróżniamy tylko dlatego, że nasze oczy są na nie niebywale czułe. Potrafimy rozróżniać fale o różnych częstotliwościach oraz ich złożenia, a nasz mózg interpretuje je jako kolory. Dlatego świat widziany naszymi oczami jest tak barwny i piękny.

**Promieniowanie nadfioletowe** (ultrafiolet, UV) ma bardzo małą długość fali, porównywalną z rozmiarami wirusów. To właśnie ten rodzaj fal, wchodzący również w skład promieniowania słonecznego, powoduje ciemnienie naszej skóry, czyli opaleniznę. Źródłem nadfioletu są obiekty o bardzo wysokiej temperaturze, np. łuk elektryczny wytwarzany podczas spawania, błyskawica i oczywiście Słońce. Silne promieniowanie nadfioletowe jest szkodliwe dla wszystkich organizmów. Ze względu na tę właściwość wykorzystuje się je m.in. w szpitalach do wyjaławiania pomieszczeń. Do tego typu zastosowań służą specjalne lampy będące źródłem nadfioletu. Mogą być one włączane tylko wtedy, gdy w pomieszczeniu nie ma nikogo. Podobnie działające lampy, tylko o dużo mniejszej mocy, stosuje się w solariach. Nadfiolet wykorzystuje się także podczas sprawdzania autentyczności banknotów. Żeby utrudnić ich fałszowanie, umieszcza się na nich znaki, które świecą po pochłonięciu nadfioletu. Promieniowanie nadfioletowe wykorzystuje się również do utwardzania wypełnień w stomatologii oraz lakierów do paznokci w kosmetyce.

Nadfiolet nie przenika przez większość substancji. Przed nadmiarem promieniowania nadfioletowego pochodzącego ze Słońca chroni nas warstwa ozonowa atmosfery. Co ciekawe, ten rodzaj promieniowania osłabiony przez ozon jest niezbędny do właściwego rozwoju człowieka, ponieważ pobudza organizm do wytwarzania witaminy D, potrzebnej do prawidłowego rozwoju kości.

**Promieniowanie rentgenowskie**, zwane też promieniowaniem X, zostało odkryte przez Wilhelma Roentgena w 1895 roku. Wytwarzane jest w specjalnych lampach, w których elektrony rozpędzone wysokim napięciem zderzają się z twardą metalową powierzchnią i promieniują w wyniku gwałtownego hamowania. To promieniowanie zrewolucjonizowało diagnostykę medyczną, a współcześnie stosowane jest również w innych obszarach badań, wszędzie tam, gdzie trzeba poznać wnętrze bez naruszania obiektu (ryc. 24.6). Można to zrobić dzięki temu, że promieniowanie rentgenowskie wnika do prawie wszystkich substancji (w tym do naszego ciała), ale jest w różnym stopniu przez nie pochłaniane. Dlatego na zdjęciach rentgenowskich kości wyraźnie odróżniają się od tkanek miękkich. Zbyt duża energia promieniowania rentgenowskiego pochłonięta przez narządy wewnętrzne może spowodować zmiany chorobowe.




**Ryc. 24.6.** Na zdjęciu rentgenowskim obrazu (a) ujawniają się postacie, które potem zostały zamalowane i w świetle są niewidoczne (b)

**Promieniowanie gamma** powstaje w wyniku procesów jądrowych, o których będziemy mówić w kolejnym dziale. Promieniowanie to łatwo wnika do wnętrza wielu ciał i dopiero grube blachy ołowiane lub kilkumetrowe warstwy ziemi wystarczająco przed nim chronią. Promieniowanie gamma może być niebezpieczne dla zdrowia.

## Fale elektromagnetyczne docierające z kosmosu

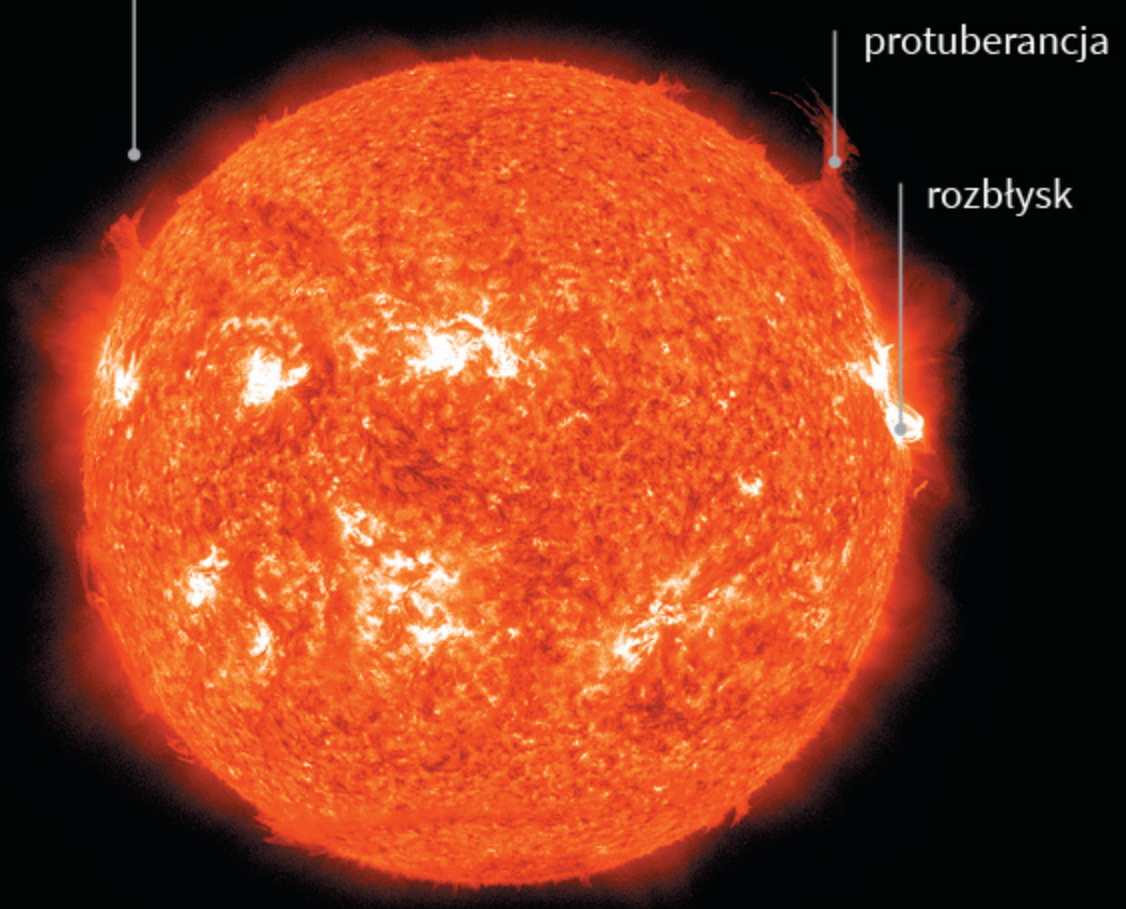
We Wszechświecie znajdują się naturalne silne źródła fal elektromagnetycznych o częstotliwościach ze wszystkich omówionych zakresów. Współcześnie obserwuje się niebo

# Słońce
## w różnych zakresach fal elektromagnetycznych

Podczas obserwacji Słońca w świetle widać tylko nieliczne plamy słoneczne na tle jednolitej tarczy (bez specjalnych filtrów nie wolno patrzeć na Słońce!). To światło jest emitowane przez gaz o temperaturze ok. 6000 K. Zupełnie inaczej wygląda Słońce obserwowane w innych zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Można wówczas dojrzeć struktury inne niż w świetle widzialnym. Wszystkie zdjęcia wykonano 17 maja 2012 roku, a kolory na nich są umowne.

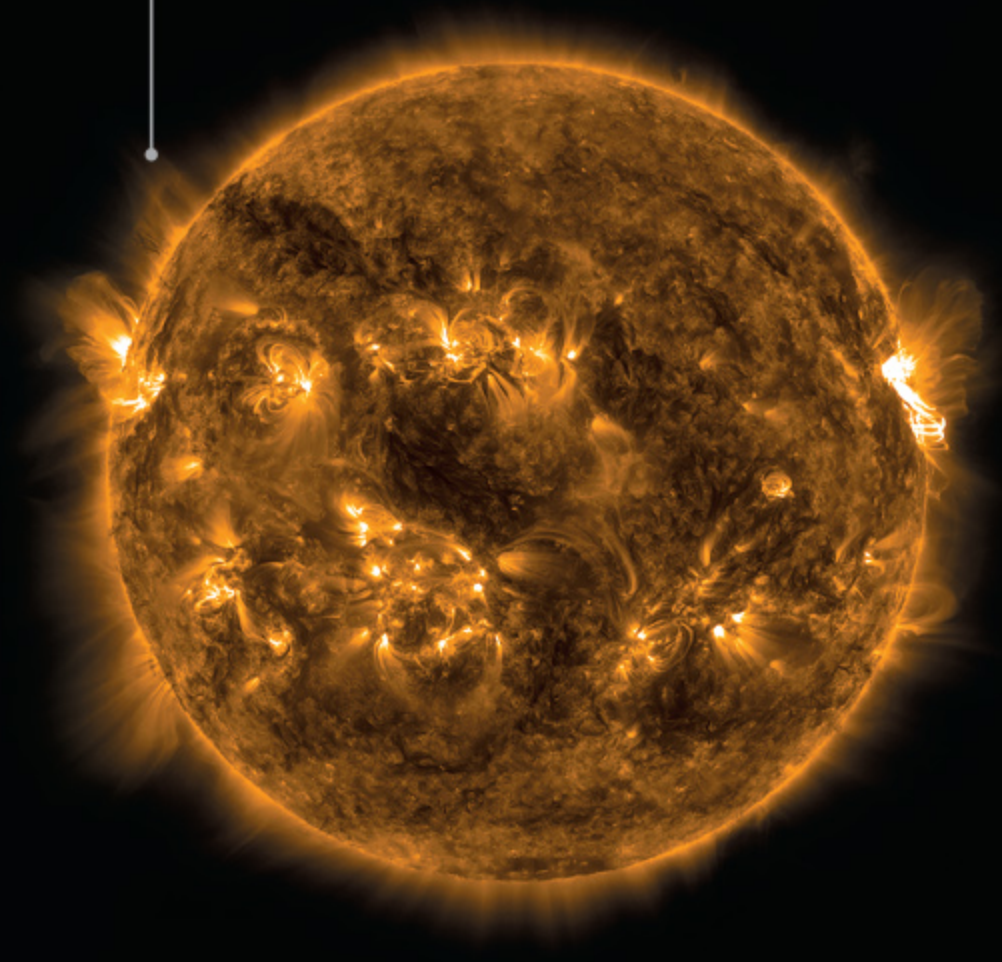
### $\lambda = 30$ nm

Obraz Słońca w nadfiolecie. Widoczne są struktury o temperaturze ok. 50 tys. K. Widać np. protuberancje i rozbłyski słoneczne.



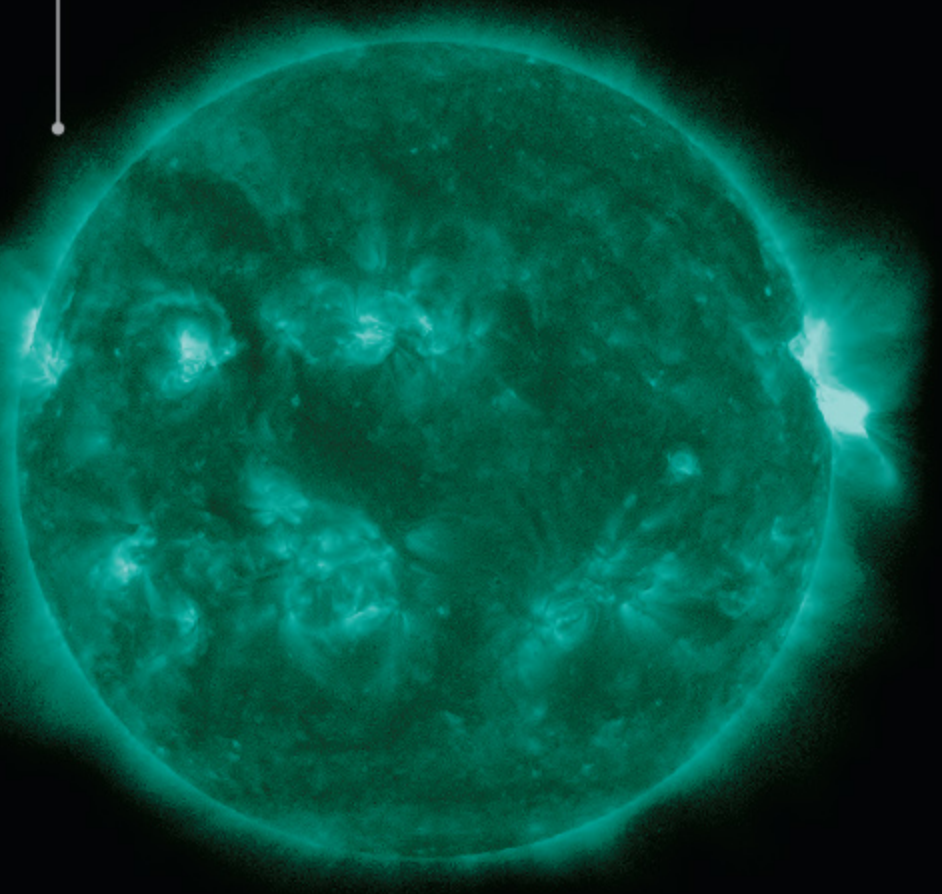

### $\lambda = 17$ nm

Kolejne zdjęcie, również wykonane w nadfiolecie, ukazuje plazmę o temperaturze ok. 600 tys. K. Widoczne są strugi plazmy związane z liniami pola magnetycznego.



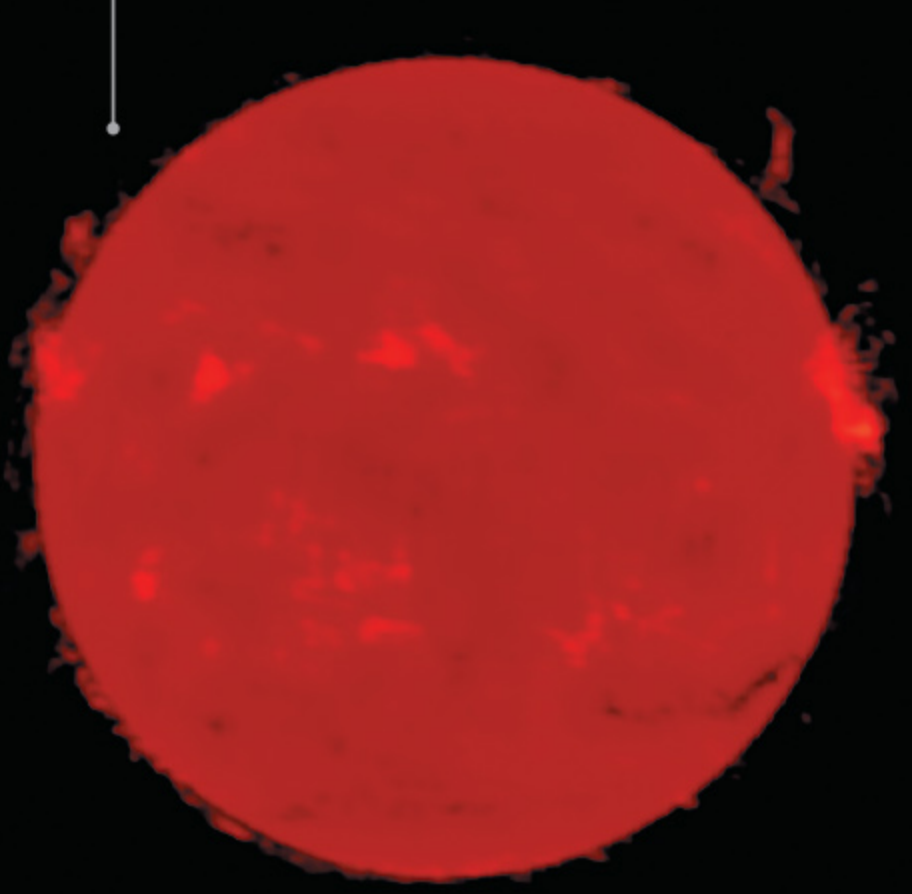
$\lambda = 9$ nm

Na obrazie Słońca w promieniach rentgenowskich nie widać protuberancji, ale rozbłyski są bardzo jasne. Widoczne są struktury o temperaturze ok. 6 mln K.



$\lambda = 2$ cm

Zdjęcie w zakresie mikrofalowym ma znacznie mniejszą rozdzielczość. Widoczne są liczne protuberancje nad powierzchnią Słońca.



z wykorzystaniem tych wszystkich zakresów promieniowania elektromagnetycznego, nawet promieniowania gamma. Świat oglądany w innym promieniowaniu niż światło wygląda zupełnie inaczej (patrz infografika na s. 184–185). Dzięki zaawansowanej technice umożliwiającej rejestrowanie różnych zakresów promieniowania nasza wiedza o otaczającym świecie staje się pełniejsza.

## PODSUMOWANIE

- **Fala elektromagnetyczna** to rozchodzące się w przestrzeni zmienne pole elektryczne i związane z nim pole magnetyczne.
- Wszystkie fale elektromagnetyczne rozchodzą się w próżni z **prędkością światła**.
- **Fale radiowe** rejestruje się za pomocą anten i wykorzystuje do przekazu informacji.
- W radarach i kuchenkach mikrofalowych wykorzystuje się **promieniowanie mikrofalowe**.
- **Podczerwień** emitowana jest przez ciała ciepłe i gorące, a pochłonięta przez materię powoduje jej ogrzanie.
- Światło o różnych częstotliwościach postrzegamy jako różne **barwy**.
- **Promieniowanie nadfioletowe** pobudza organizm do wytwarzania witaminy D.
- **Promieniowanie rentgenowskie** wykorzystuje się w diagnostyce.
- **Promieniowanie gamma** powstaje w wyniku procesów jądrowych.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Na podstawie mechanizmu emisji promieniowania elektromagnetycznego oszacuj zakres częstotliwości, z jakimi drgają cząsteczki w rozgrzanym żelazku.
2. Wyznacz zakres częstotliwości fal elektromagnetycznych rejestrowanych przez nasze oczy. Potrzebne dane znajdziesz w treści rozdziału.
3. Pod wpływem nadfioletu emitowanego przez lampę testera banknoty świecą. Czy oznacza to, że nasze oczy dostrzegają odbity nadfiolet?
4. W kuchence mikrofalowej powstaje fala stojąca. Oblicz odległość między dwiema strzałkami (miejscami o największych drganiach) tej fali. Potrzebne dane znajdziesz w treści rozdziału.
5. Z powodu dyfrakcji nie można bezpośrednio obserwować obiektów o rozmiarach mniejszych od długości fali wykorzystywanej do obserwacji.
   Koronawirus SARS ma średnicę ok. 100 nm.
   a) Czy można zrobić zdjęcie tego wirusa za pomocą światła? Uzasadnij odpowiedź.
   b) Wymień dwa zakresy fal elektromagnetycznych, za pomocą których można uzyskać obraz tego wirusa. Uzasadnij odpowiedź.

# 25. Widmo promieniowania

- Źródła światła
- Różne rodzaje widma
- Widmo a temperatura źródła

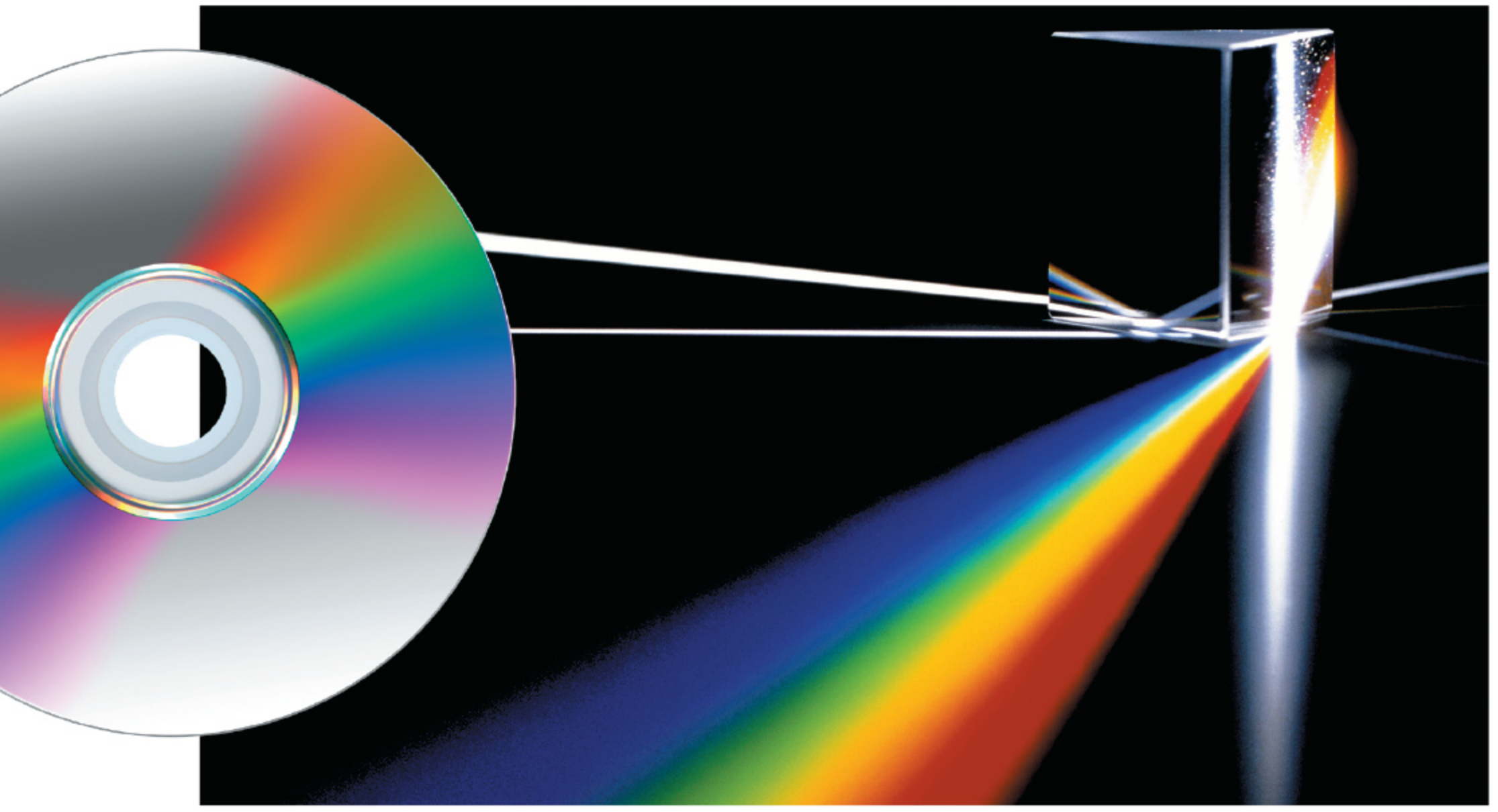
➔ **Przypomnij sobie**, na jakie zakresy dzieli się promieniowanie elektromagnetyczne.

Co jest źródłem światła? Każdy bez trudu wymieni ich wiele: Słońce, żarówka, laser, świeczka, robaczek świętojański itd. Podobnie potrafimy wymienić źródła promieniowania, którego nie rejestrują nasze oczy, np. promieniowania podczerwonego czy rentgenowskiego. Od czego zależy, jaki zakres częstotliwości będzie miało promieniowanie emitowane przez dane ciało?

## Termiczne i nietermiczne źródła światła

F

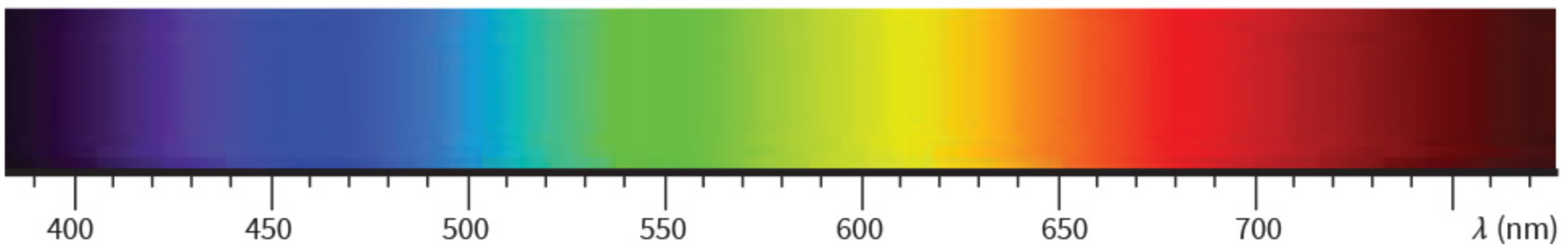
Źródłem światła mogą być obiekty o wysokiej temperaturze, np. Słońce, żarówka, łuk elektryczny powstający podczas spawania, gwiazdy. Takie źródła nazywamy **termicznymi**. Inne obiekty świecą, mimo że są zimne, np. ekran telewizora, latarka diodowa, zorza polarna. Te źródła nazywamy **nietermicznymi**. Dla naszych oczu światło z obu



**Ryc. 25.1.** Światło białe po przejściu przez pryzmat lub odpowiednio odbite od płyty kompaktowej tworzy kolorową wstęgę. Te kolory to właśnie widmo światła białego

rodzajów źródeł wygląda podobnie. Różnice pojawiają się dopiero wtedy, gdy uzyskamy **widmo światła** emitowanego przez dane źródło.

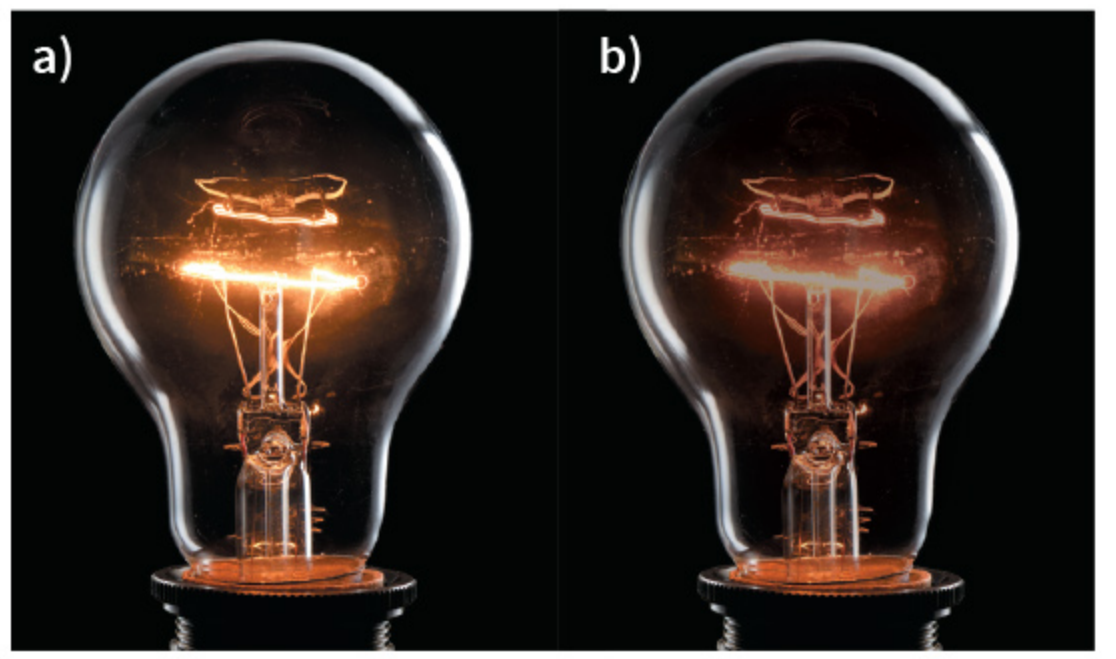
**Widmo to obraz promieniowania rozłożonego na poszczególne długości fali, dla światła — na poszczególne barwy.** Widmo uzyskamy, jeśli przepuścimy wiązkę światła przez pryzmat lub siatkę dyfrakcyjną, czyli układ równoległych szczelin lub rowków (ryc. 25.1). Najprostszą siatką dyfrakcyjną jest CD lub DVD. Scenariusz doświadczenia 6 na s. 346 s. 346 opisuje, jak z takiej płyty zrobić spektroskop, czyli przyrząd do oglądania widm.
Tęcza to widmo światła słonecznego, które powstało na kroplach deszczu – każdy z jej kolorów odpowiada określonej długości fali.
Okazuje się, że wszystkie źródła termiczne emitują światło o podobnym widmie – kolorową wstęgę, w której barwy łagodnie przechodzą jedna w drugą, od fioletowej do czerwonej (ryc. 25.2). Takie widmo nazywamy **ciągłym**. Każda barwa to określona długość fali, więc w promieniowaniu termicznym znajdziemy wszystkie długości fali z obserwowanego przedziału.




**Ryc. 25.2.** Widmo ciągłe źródła termicznego z podziałką długości fali

## Widmo a temperatura źródła

Na rycinie 25.3 przedstawione są dwa widma tej samej żarówki, zasilanej raz wyższym, a raz niższym napięciem. Widzimy, że żarówka zasilana niższym napięciem świeci na żółtopomarańczowo, bo świecący drucik ma niższą temperaturę. W widmie też widać różnicę — w drugim przypadku jest mniejsze natężenie koloru fioletowego i niebieskiego.




**Ryc. 25.3.** Dwa widma tej samej żarówki zasilanej wyższym (a) i niższym (b) napięciem. Natężenie koloru niebieskiego w widmie jest wyraźnie słabsze, gdy temperatura włókna żarówki jest niższa

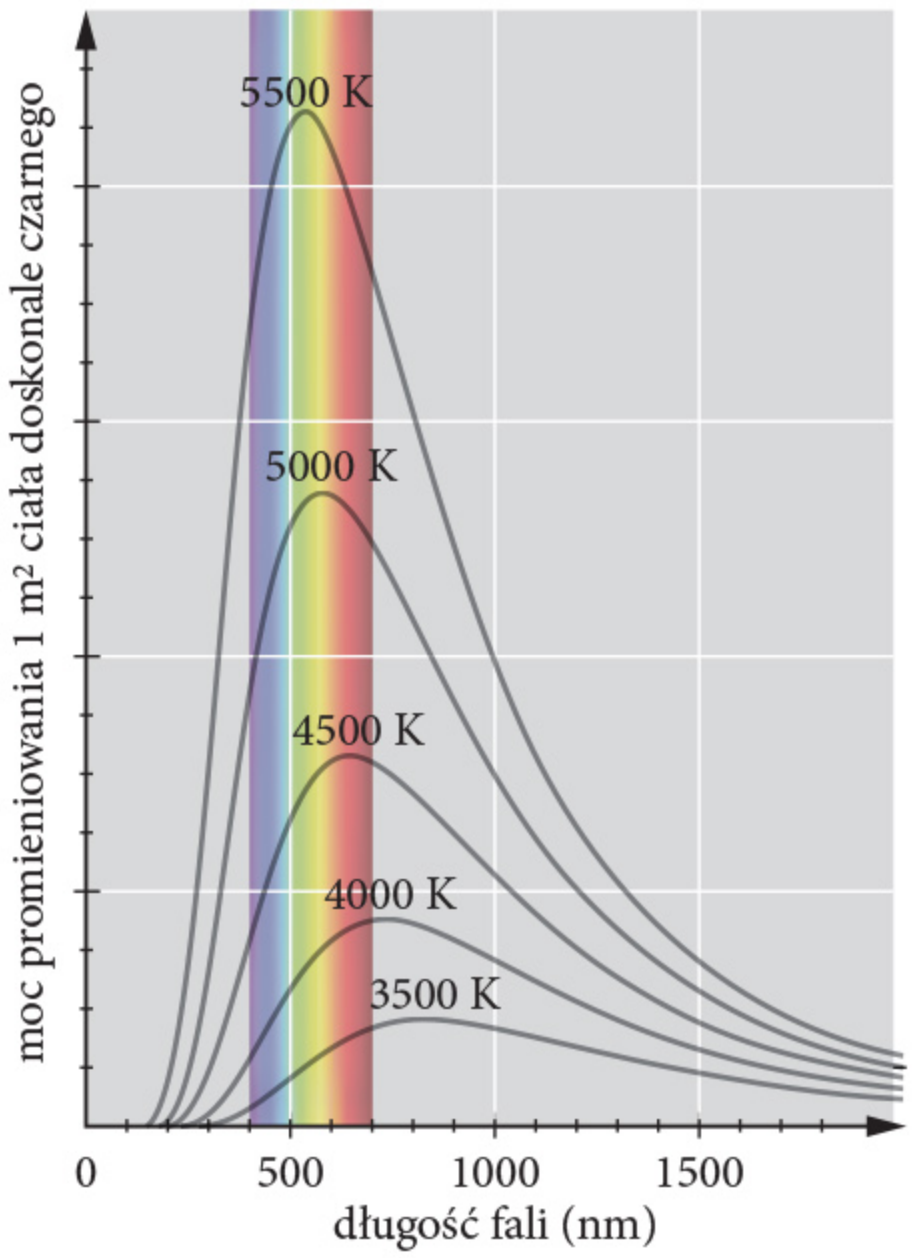
To właściwość źródeł termicznych: **stosunek natężenia barwy niebieskiej do czerwonej w widmie rośnie wraz z temperaturą**, niezależnie od źródła światła. Im wyższa jest temperatura źródła promieniowania, tym światło jest bardziej niebieskie (dlatego świat oświetlany błyskawicą podczas burzy jest niebieskawy – temperatura błyskawicy to kilkanaście tysięcy stopni Celsjusza). Na niebie znajdziemy gwiazdy świecące na niebiesko – to gwiazdy o bardzo wysokiej temperaturze; gwiazdy świecące na czerwono są chłodniejsze. Astronomowie dysponują odpowiednio wyskalowanymi przyrządami do precyzyjnego pomiaru natężenia światła w poszczególnych barwach, dzięki czemu mogą wyznaczyć temperaturę gwiazd. W podobny sposób działają kamery termowizyjne i termometry bezdotykowe (ryc. 25.4).

F

## WARTO WIEDZIEĆ

### Temperatura barwowa

Promieniowanie termiczne ciał dobrze opisuje tzw. model ciała doskonale czarnego. Na wykresie przedstawiono wynikającą z tego modelu moc promieniowania termicznego emitowanego z powierzchni 1 $m^2$ w zależności od długości fali dla ciał o różnych temperaturach. Można zauważyć, że powierzchnia Słońca mająca temperaturę prawie 6000 K ma największą moc dla długości fali z zakresu światła. Ciała o temperaturze pokojowej nie emitują światła, ale wyłącznie podczerwień.




Długość fali, na której ciało promieniuje z największą mocą, można obliczyć z tzw. prawa Wiena:

$$\lambda = \frac{b}{T}$$

gdzie: $b \approx 3 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{K}$ – stała Wiena,

$T$ – temperatura ciała w skali Kelvina.

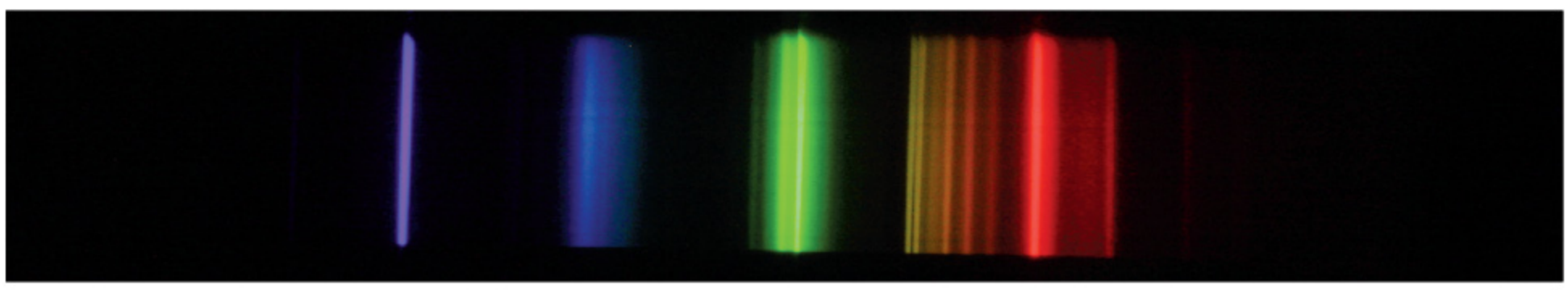
Z tego wzoru można obliczyć, że ciało człowieka promieniuje najintensywniej na długości fali ok. $10^{-5}$ m, czyli 10 000 nm.

Na opakowaniach lamp LED podana jest tzw. temperatura barwowa światła. Na przykład temperatura barwowa 2700 K oznacza, że lampa emituje światło o widmie podobnym do tego, jakie wysyła ciało rozgrzane do tej temperatury (chociaż sama lampa aż tak się nie rozgrzewa). Kolor światła o temperaturze barwowej 2700 K lub 3000 K określa się jako „ciepły biały". Barwy czerwone mają w nim większe natężenie niż niebieskie. Natomiast lampa LED o temperaturze barwowej 6500 K emituje światło „białe zimne". Jest w nim więcej światła niebieskiego niż czerwonego.

**Ryc. 25.4.** Rozkład temperatury uzyskany za pomocą kamery termowizyjnej

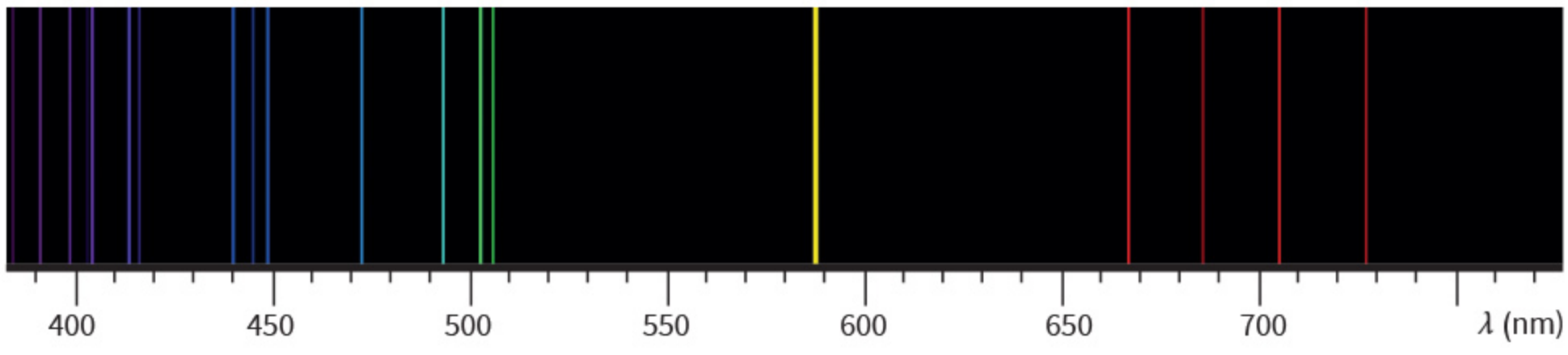
## Widma źródeł nietermicznych

Widma źródeł nietermicznych różnią się od widm źródeł termicznych głównie tym, że brak w nich pewnych kolorów (ryc. 25.5). Taka **nieciągłość widma to cecha źródeł nietermicznych**. Obecnie dzięki zaawansowanej technologii materiałowej potrafimy wytwarzać takie źródła nietermiczne, w których widmie znajdują się prawie wszystkie barwy światła.



**Ryc. 25.5.** Widmo świetlówki uzyskane za pomocą spektroskopu zrobionego z płyty CD. Brakuje niektórych barw, więc widmo nazwiemy nieciągłym

Widmo światła emitowanego przez pierwiastki w stanie gazowym składa się z pojedynczych kresek, wyraźnie od siebie oddzielonych. Można to zaobserwować na przykładzie świecenia atomów helu (ryc. 25.6).




**Ryc. 25.6.** Widmo liniowe helu

Każdy świecący pierwiastek ma swój charakterystyczny układ linii widmowych (ryc. 25.9). Można to porównać do ludzkich linii papilarnych. Za ich pomocą w sposób jednoznaczny da się określić, jaki pierwiastek jest źródłem światła. To właśnie dzięki analizie linii widmowych światła nadbiegającego z kosmosu wiemy, że we Wszechświecie znajdują się takie same pierwiastki chemiczne jak na Ziemi. Ciekawostką jest to, że dzięki analizie widmowej hel został odkryty najpierw na Słońcu, zanim znaleziono go na Ziemi. Podczas analizy widma światła słonecznego zaobserwowano linie widmowe, które nie pasowały do żadnego pierwiastka znanego na Ziemi.

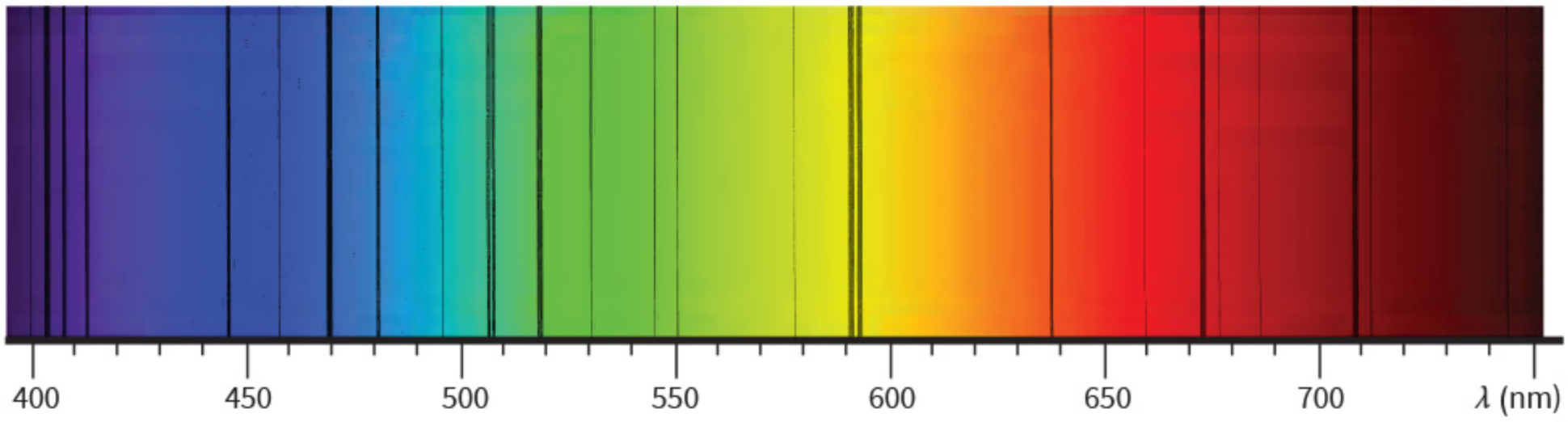
W warunkach domowych trudno znaleźć źródła światła mające widma liniowe. Takie widmo ma np. laser, ale jest ono bardzo ubogie – występuje w nim tylko jedna długość fali. Uwaga! Nie wolno patrzeć na światło laserowe odbite od płyty kompaktowej – należy skierować światło na białą kartkę.

**DOŚWIADCZENIE 1.**

Za pomocą płyty kompaktowej lub wykonanego własnoręcznie spektroskopu zaobserwuj widmo promieniowania świeczki. W trakcie obserwacji posyp płomień świeczki solą kuchenną. Czy widzisz pojaśnienie niektórych kolorów, związane z pojawieniem się na tle widma świeczki widma liniowego któregoś z pierwiastków tworzących sól?

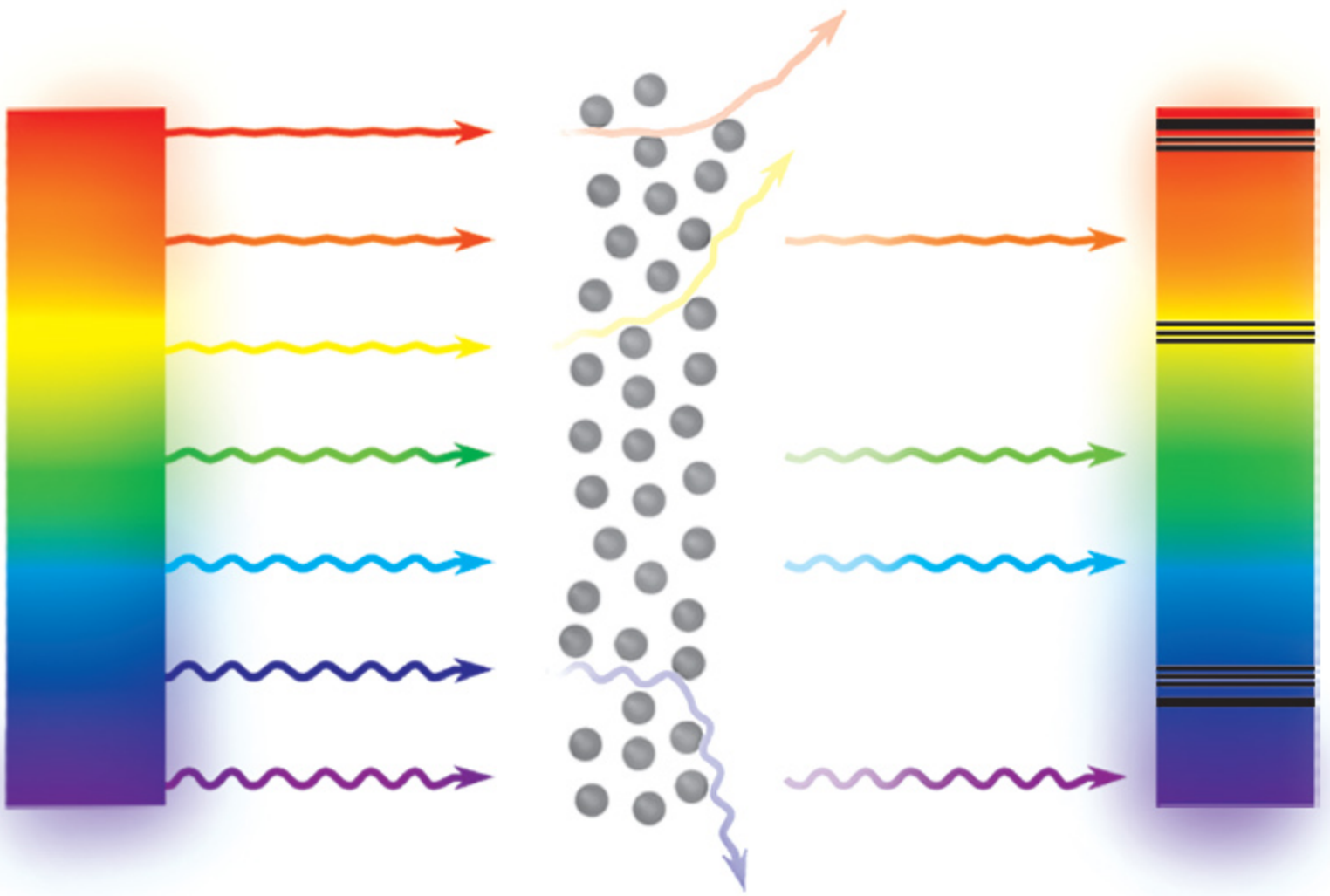
## Widma emisyjne i absorpcyjne

Omawialiśmy dotąd widma promieniowania emitowanego przez ciała, czyli **widma emisyjne**. W przypadku gazów analiza takiego widma pozwala ustalić skład chemiczny substancji. Okazuje się, że można również zobaczyć widmo materii, która nie emituje własnego światła. Wystarczy, że jest ona oświetlona promieniowaniem źródła termicznego. W widmie światła, które przeszło przez tę nieświecącą materię, pojawiają się wówczas ciemne kreski odpowiadające liniom widmowym pierwiastków wchodzących w skład tej materii. Takie widmo nazywamy **absorpcyjnym**. Przykładem może być przedstawione na rycinie 25.7 widmo atmosfery Słońca. Ciemne kreski na tle widma ciągłego to linie charakterystyczne pierwiastków występujących w atmosferze słonecznej. Wiele gwiazd ma podobne widma absorpcyjne.




**Ryc. 25.7.** Widmo absorpcyjne atmosfery Słońca. Ciemne kreski odpowiadają liniom widmowym pierwiastków tworzących zewnętrzną warstwę Słońca

Widmo absorpcyjne powstaje dlatego, że światło wyemitowane przez źródło termiczne jest częściowo pochłaniane przez atomy substancji, przez którą przechodzi. Pochłaniane jest tylko promieniowanie o tych długościach fal, które są w widmie emisyjnym danej substancji. Po chwili atomy je wyemitują, ale już niekoniecznie w stronę obserwatora (ryc. 25.8). To powoduje, że natężenie niektórych fal w obserwowanym widmie jest mniejsze. Widmo absorpcyjne powstaje wskutek pochłaniania promieniowania, więc w wypadku danego pierwiastka jest jakby negatywem widma emisyjnego.



**Ryc. 25.8.** Schemat powstawania widma absorpcyjnego. Niektóre fale zostają pochłonięte, a po chwili są emitowane w różne strony. Do obserwatora dociera światło w zasadzie pozbawione fal wcześniej rozproszonych

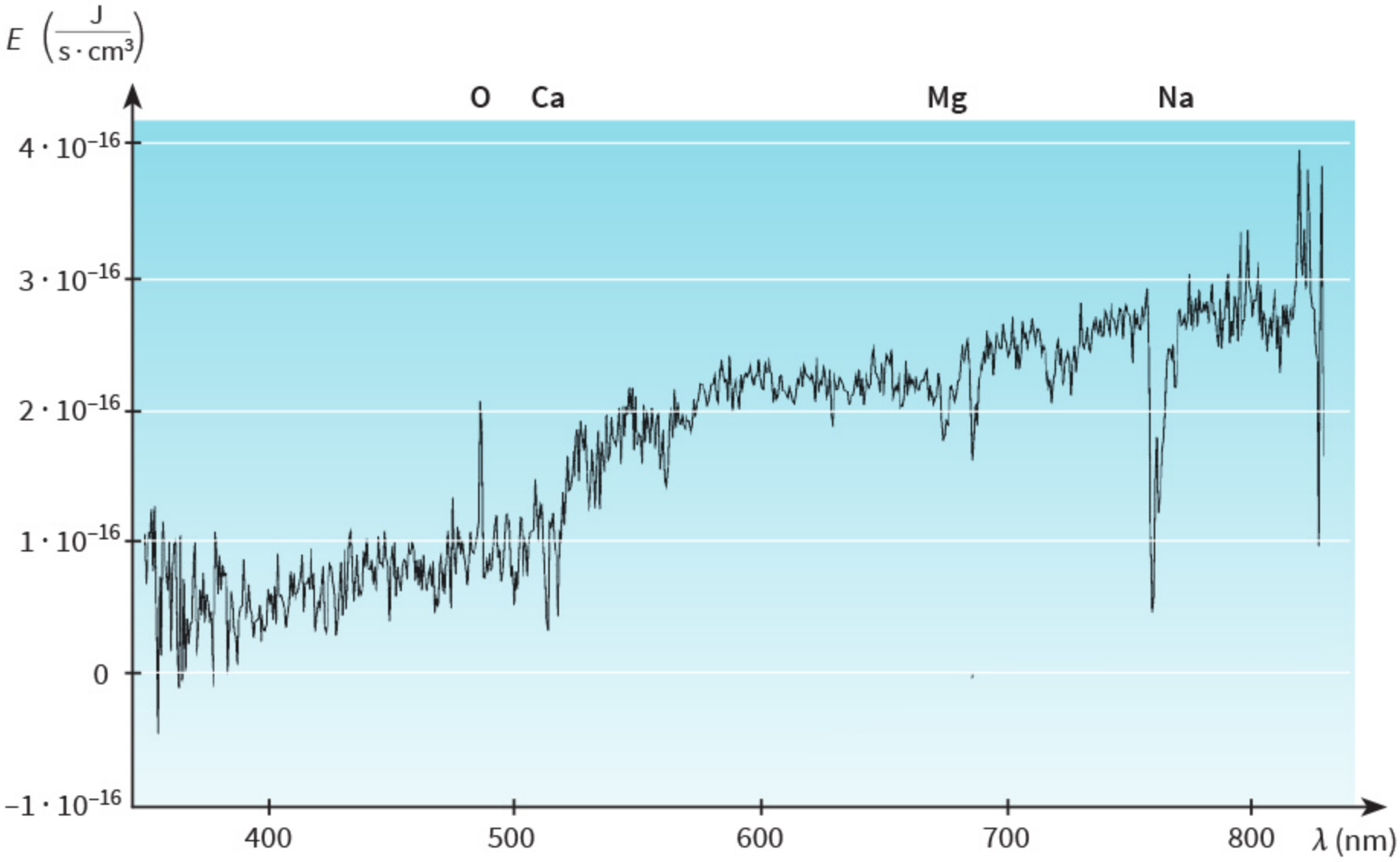
Współczesne przyrządy pomiarowe pozwalają uzyskiwać widma nie tylko światła, lecz także wszystkich pozostałych zakresów promieniowania elektromagnetycznego. Dzięki analizie widmowej astronomowie uzyskują informacje nawet o bardzo odległych obiektach, gdyż można ustalić ich skład chemiczny oraz temperaturę. Z kolei zjawisko Dopplera umożliwia dokładne wyznaczenie prędkości odległych obiektów. Wystarczy stwierdzić, czy linie widmowe np. wodoru w gwieździe lub galaktyce są przesunięte w stosunku do widma wodoru uzyskanego na Ziemi, a potem z różnicy częstotliwości fal można obliczyć prędkość zbliżania się lub oddalania badanego obiektu. W ten sposób odkryto rozszerzanie się Wszechświata i tak też odkrywa się planety pozasłoneczne. Prawie całą naszą wiedzę o Wszechświecie uzyskujemy dzięki analizie widmowej.

**Ryc. 25.9.** Widma emisyjne atomowe wybranych pierwiastków i widmo światła białego

## WARTO WIEDZIEĆ

**Widmo galaktyki**

Źródła promieniowania, które znajdziemy w kosmosie, mają widma bardzo złożone. Astronomowie przedstawiają widma w postaci wykresów zależności natężenia światła od długości fali. Na ilustracji jest przedstawiony taki wykres dla galaktyki J120-0545. Znajdziemy w nim zarówno fragmenty widma liniowego, jak i absorpcyjnego, czyli linie emisyjne i absorpcyjne. Literami oznaczone są symbole chemiczne pierwiastków, dla których zostały zidentyfikowane linie widmowe*.




* J. Machalski, D. Kozieł-Wierzbowska, M. Jamroży, D.J. Saikia, *J1420-0545: The radio galaxy larger than 3C 236*, „Astronomical Journal" 2008, t. 679, s. 149.

## PODSUMOWANIE

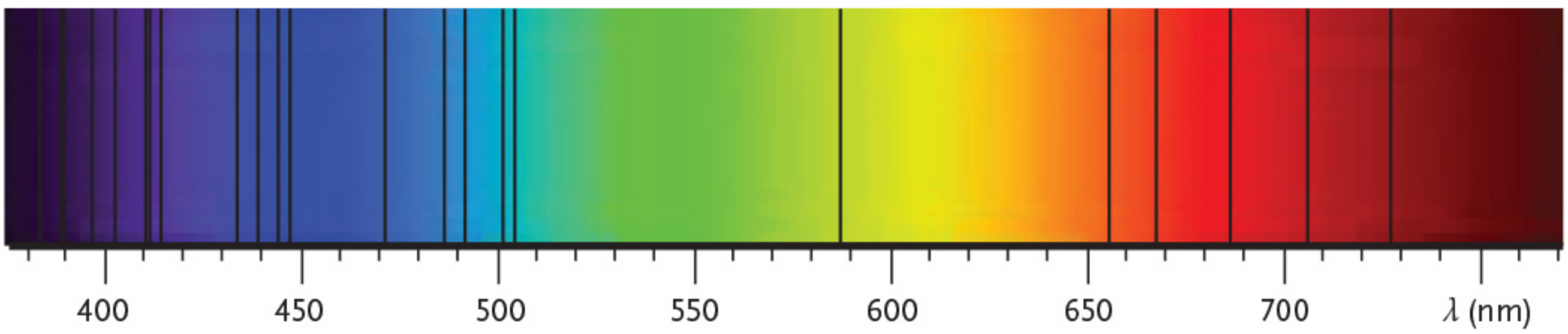
- **Widmo** to obraz promieniowania rozłożonego na poszczególne długości fali.
- Źródła termiczne emitują promieniowanie o **widmie ciągłym**.
- Stosunek natężenia światła niebieskiego do czerwonego w widmie ciągłym rośnie wraz z temperaturą źródła.
- Źródła nietermiczne („zimne") emitują promieniowanie o **widmie nieciągłym**.
- Atomy danego pierwiastka mają swoje charakterystyczne **widmo**.
- **Widmo emisyjne** to widmo promieniowania emitowanego przez ciało.
- **Widmo absorpcyjne** ciała powstaje wskutek pochłaniania przez to ciało części padającego na nie promieniowania o widmie ciągłym.

## PYTANIA I ZADANIA

**1.** Na zdjęciu (wykonanym przez ucznia liceum przy użyciu kamerki internetowej) przedstawiony jest układ podwójny gwiazd w gwiazdozbiorze Łabędzia – Albireo. Która z gwiazd ma wyższą temperaturę? Uzasadnij odpowiedź.

**2.** Skąd wiadomo, że w dalekim Wszechświecie są takie same pierwiastki jak na Ziemi?

**3.** Na rysunku przedstawione jest widmo absorpcyjne młodej gwiazdy. Jakie pierwiastki wchodzą w skład atmosfery tej gwiazdy? Wskazówka: na stronie 193 przedstawione są widma emisyjne niektórych pierwiastków; znajdź wśród nich linie występujące w badanym widmie.




**4.** Chcesz kupić koszulkę w sklepie oświetlonym świetlówkami o widmie takim jak na rycinie 25.5.

**a)** Czy możesz mieć pewność, że kolor koszulki będzie taki sam w świetle dziennym? Uzasadnij odpowiedź.

**b)** Czy większą pewność dotyczącą niezmienności koloru po wyjściu ze sklepu możesz mieć wówczas, gdy koszulka będzie w odcieniach czerwieni, czy gdy będzie w odcieniach zielononiebieskich? Uzasadnij odpowiedź.

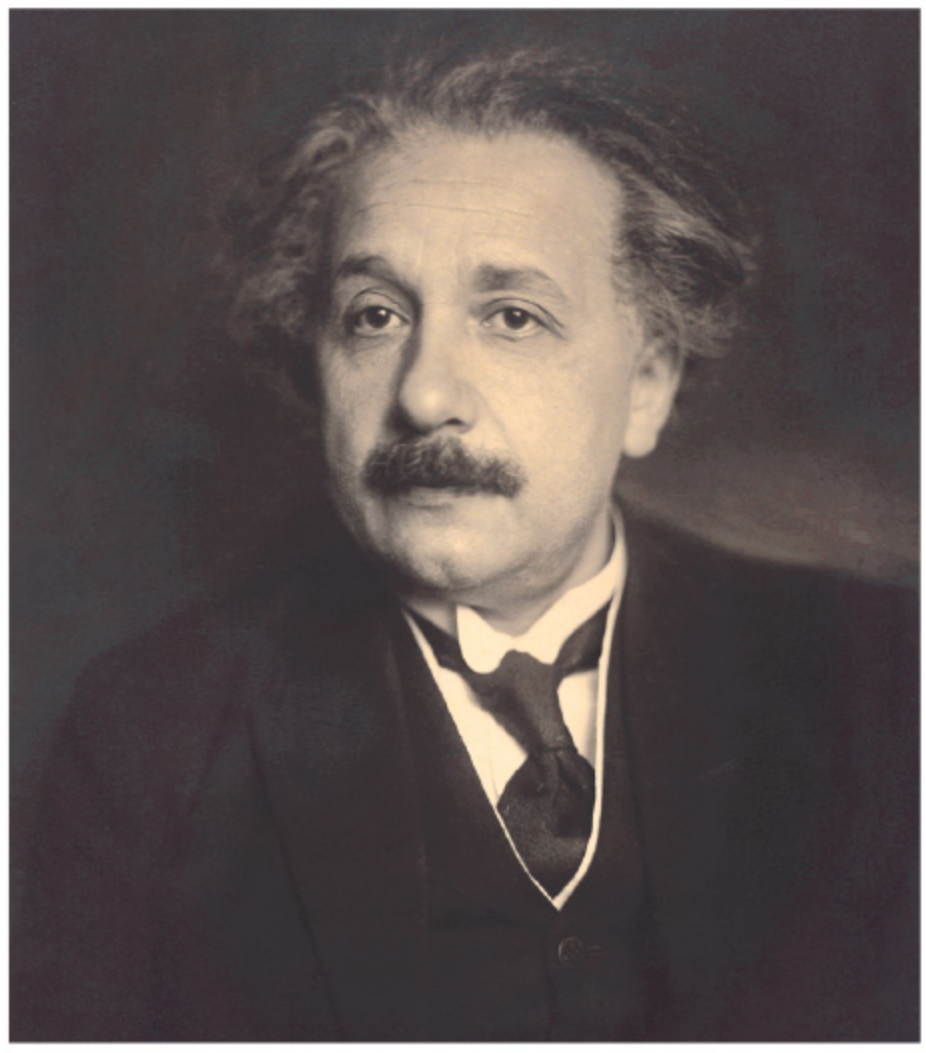
**5.** Na jakiej długości fali najintensywniej promieniuje płomień ogniska? Przyjmij temperaturę płomienia równą 1000 °C. Czy więcej energii wypromieniowuje on w postaci światła czy podczerwieni? Wskazówka: przeczytaj *Warto wiedzieć – Temperatura barwowa*.

# 26. Korpuskularna natura promieniowania

- Albert Einstein – rewolucja w nauce
- Foton i jego energia
- Elektronowolt

➔ **Przypomnij sobie**, czym jest promieniowanie elektromagnetyczne.

Na początku XX wieku fizycy odkryli, że fale elektromagnetyczne mają niezwykłe właściwości. Łącznie z próbą wyjaśnienia powstawania widm doprowadziło to do największego przewrotu w fizyce od chwili jej powstania. Pierwszy krok na tej drodze wykonał najbardziej znany fizyk na świecie – Albert Einstein – w przełomowym dla rozwoju fizyki roku 1905.



**Ryc. 26.1.** Albert Einstein

## Albert Einstein

W 1905 roku dwudziestosześcioletni, wówczas nikomu nieznany urzędnik patentowy w Bernie (Szwajcaria) opublikował trzy artykuły, które wstrząsnęły nauką. Pierwszy z nich zupełnie zmienił ludzkie rozumienie tego, czym jest światło. Drugi, dotyczący tzw. **szczególnej teorii względności**, zmienił postrzeganie przestrzeni i czasu. Ze szczególnej teorii względności wynika, że w różnych układach odniesienia czas między tymi samymi zdarzeniami może być inny. Dotyczy to także odległości między tymi samymi punktami. Trzy wymiary przestrzenne oraz czas tworzą czterowymiarową **czasoprzestrzeń**. W trzecim artykule Einstein wyprowadził najlepiej dziś znany wzór na świecie: $E = mc^2$.

W 1915 roku (podczas I wojny światowej) w Berlinie uczony sformułował **ogólną teorię względności**, uważaną za jedno z największych osiągnięć umysłu ludzkiego w ogóle. Ogólna teoria względności traktuje grawitację jako zakrzywienie czasoprzestrzeni. To dzięki niej możemy badać np. czarne dziury oraz dynamikę Wszechświata.

Albert Einstein był geniuszem, ale miał też niezwykłą osobowość. Może dlatego stał się ikoną kultury współczesnej. Skromny i dowcipny człowiek, którego ogromna sława w ogóle nie zmieniła, zadeklarowany pacyfista, który skłonił prezydenta USA do budowy bomby atomowej, wyznawca „religii kosmicznej" – to tylko niektóre rysy jego barwnego światopoglądu.

## Foton i jego właściwości

Teraz zajmiemy się treścią pierwszej pracy Einsteina, z 1905 roku – to jej tezy wywołały wówczas największy opór społeczności fizyków i za nią właśnie dostał dużo później Nagrodę Nobla. Oto cytat z tej pracy.

> Wydaje mi się, że (...) zjawiska związane z emisją i przemianą światła są łatwiej zrozumiałe, jeśli się założy, że energia światła jest w przestrzeni rozłożona nierównomiernie. Zgodnie z rozważanym tu założeniem przy rozchodzeniu się promienia świetlnego, wysłanego ze źródła punktowego, jego energia nie jest rozłożona w sposób ciągły w stale się zwiększającej objętości przestrzeni, lecz składa się ze skończonej ilości kwantów energii, które są zlokalizowane w punktach przestrzeni, poruszają się bez podziału i mogą być pochłaniane lub wytwarzane tylko jako kompletne całości*.

Jaki jest sens ostatnich sformułowań tego cytatu? Taki, że fala elektromagnetyczna (a więc i światło) to strumień cząstek zwanych dziś **fotonami** (kwant energii to pojęcie ogólniejsze, oznaczające małą, niepodzielną porcję energii).

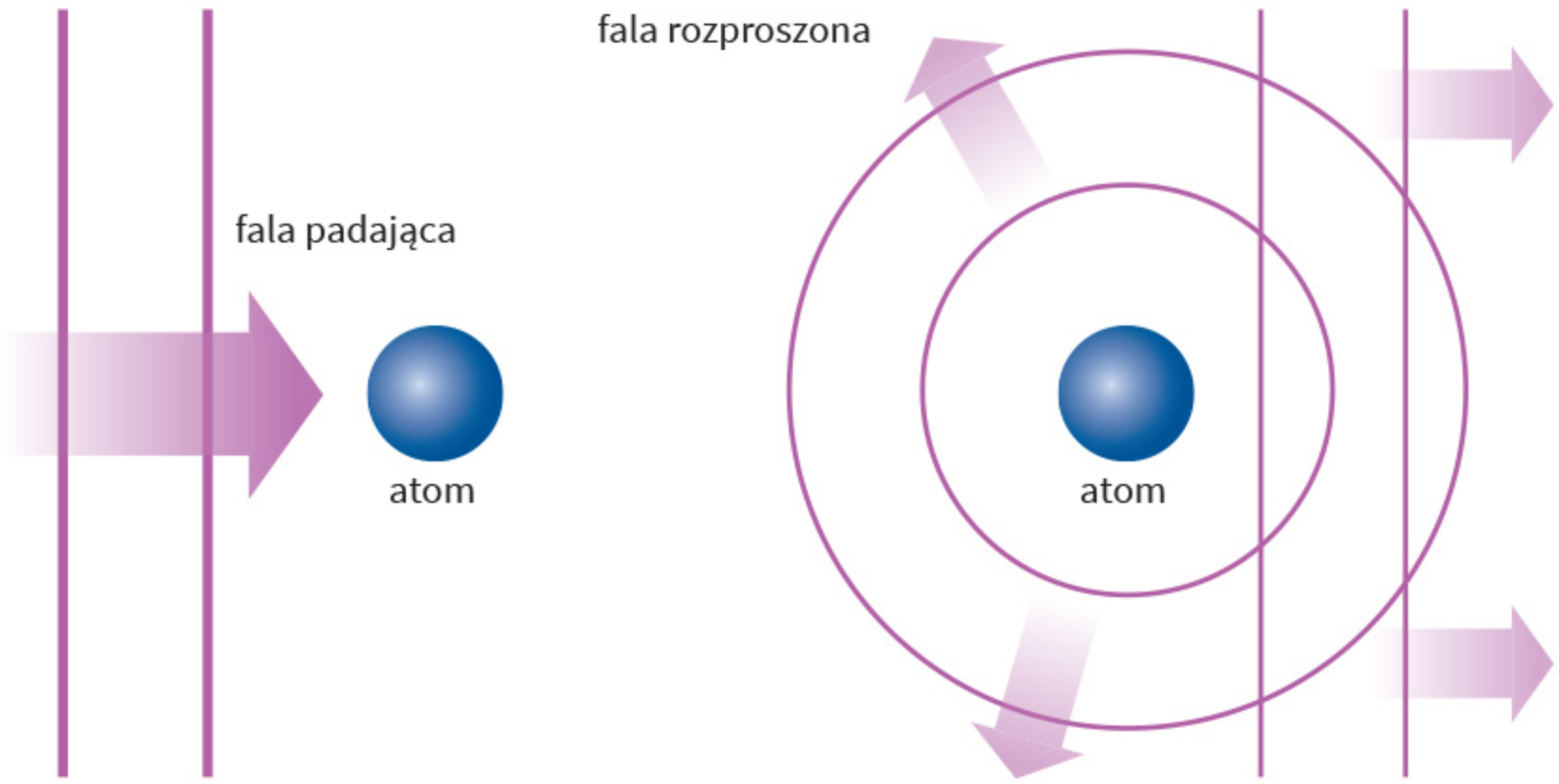
Promieniowanie elekromagnetyczne to strumień fotonów.

Fotony są tak małe, że możemy je uważać za cząstki punktowe. Ale uwaga: są to cząstki zupełnie inne od typowych składników ciał materialnych, np. elektronów. Foton nie istnieje w spoczynku i może poruszać się wyłącznie z prędkością światła w próżni, czyli ok. 300 000 km/s. Nie można go nie tylko zatrzymać, ale również spowolnić czy przyspieszyć. Można natomiast zmienić kierunek jego prędkości lub odebrać mu energię – częściowo bądź w całości (w takiej sytuacji foton znika). Foton nie ma ładunku elektrycznego.

## Rozpraszanie fotonów

Gdy rozejrzymy się wokół siebie, zobaczymy światło rozproszone przez stół, ścianę, półkę czy dywan. Wszystkie obiekty składają się z atomów. Fala elektromagnetyczna padająca na atom pobudza do drgań zawarte w nim ładunki elektryczne. To powoduje, że atom wypromieniowuje małą kulistą falę rozproszoną (ryc. 26.2).

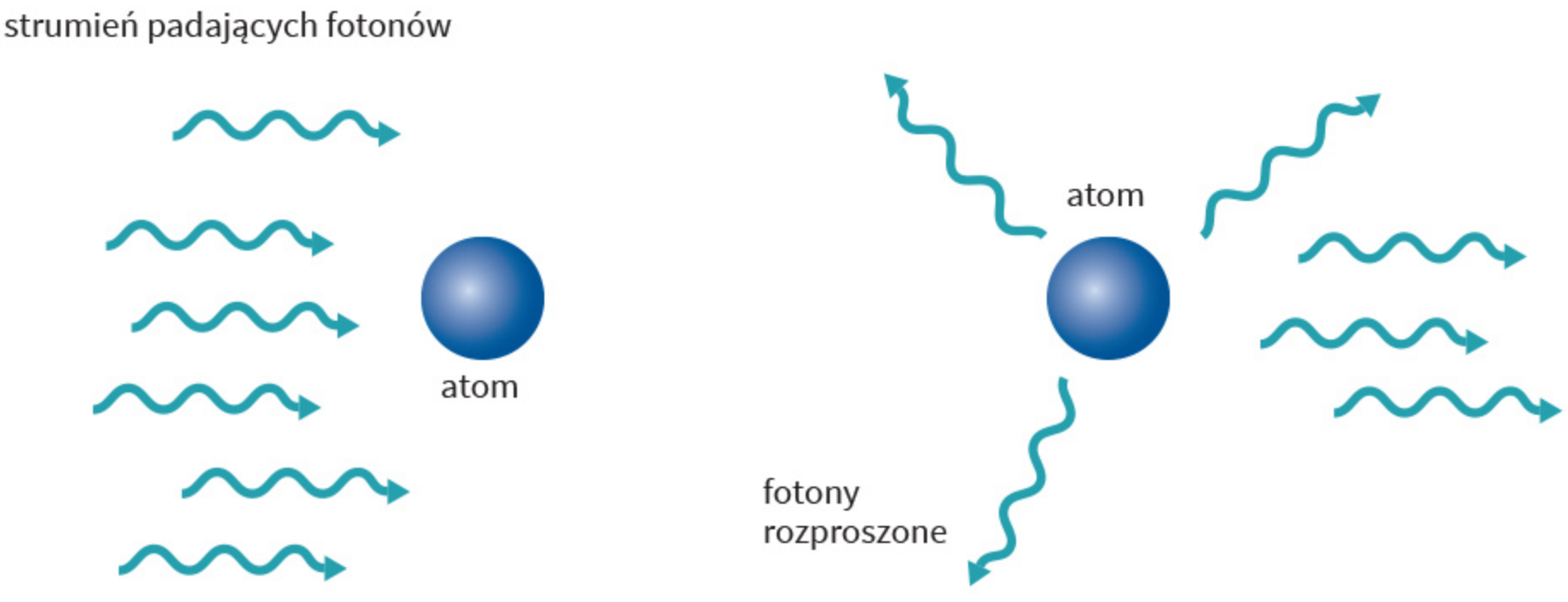
* A.K. Wróblewski, *Historia fizyki*, Warszawa 2007, s. 431.




**Ryc. 26.2.** Fala płaska rozpraszana na atomie

Gdybyśmy mogli zobaczyć rozpraszanie w dużym powiększeniu, wyglądałoby ono inaczej. Fala padająca to strumień fotonów. Niektóre z nich są pochłaniane przez atom, który prawie natychmiast wypromieniowuje takie same fotony, ale już w różnych kierunkach (ryc. 26.3).

Z porównania rycin 26.2 i 26.3 wynika, że kierunek rozchodzenia się fali to kierunek ruchu fotonów. Promieniowanie elektromagnetyczne to fala, a zarazem strumień fotonów. Nie ma sprzeczności między ujęciem falowym i cząstkowym (korpuskularnym) tego promieniowania.




**Ryc. 26.3.** Strumień fotonów lecących w prawo. Niektóre z nich są rozpraszane

Fotony zawsze mają prędkość światła w próżni, jednak gdy poruszają się np. w szkle, wciąż napotykają atomy, które je pochłaniają i zaraz emitują identyczne fotony (ryc. 26.3). Właśnie te ciągłe akty pochłaniania i emitowania powodują niewielkie opóźnienie, a tym samym mniejszą prędkość światła w szkle, wodzie i innych przezroczystych ośrodkach (przeczytaj *Warto Wiedzieć* str. 177).

## Energia fotonu

Einstein w roku 1905 podał podstawowy wzór na energię pojedynczego fotonu:

$$E = h \cdot f \tag{1}$$

gdzie:
$E$ – energia fotonu,
$h$ – stała Plancka,
$f$ – częstotliwość fali.

**Stała Plancka** wynosi $h \approx 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$. Warto zwrócić uwagę na to, jak niezwykle mała jest ta wartość.

Energia fotonu jest wprost proporcjonalna do częstotliwości fali elektromagnetycznej.

Skorzystajmy ze związku między częstotliwością a długością fali elektromagnetycznej:

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

i podstawmy ten wzór do wzoru (1). Otrzymamy:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \tag{2}$$

Ze wzoru (2) wynika, że energia fotonu jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali. Im krótsze fale, tym większą energię niosą pojedyncze fotony.

**PRZYKŁAD 1.**

Słońce najbardziej intensywnie promieniuje na długości fali 500 nm (światło o barwie zielono-niebieskiej).

Jaka jest energia fotonów tego światła?

$$500\ \mathrm{nm} = 500 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{m} = 5 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}$$

Gdy podstawimy dane do wzoru (2), otrzymamy:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J} \cdot \mathrm{s} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{5 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{m}} \approx 3{,}98 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J} \approx 4 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

Energia pojedynczego fotonu światła o długości 500 nm wynosi ok. $4 \cdot 10^{-19}$ J.

Energia pojedynczego fotonu jest bardzo mała. Aby wygodniej było omawiać i porównywać tak małe energie, często posługujemy się dużo mniejszą jednostką energii o nazwie **elektronowolt (eV)**. Nazwa nieprzypadkowo jest złożeniem słów „elektron" i „wolt". Jest to energia, jaką uzyska elektron rozpędzony w polu elektrycznym o napięciu 1 V. Można ją obliczyć ze wzoru (2) w rozdziale 5:

$$W = qU = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C} \cdot 1\ \mathrm{V} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

Wiemy już, jaką część dżula stanowi elektronowolt:

$$1\ \text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

Jeśli to równanie podzielić stronami przez $1{,}6 \cdot 10^{-19}$, otrzymamy przelicznik odwrotny:

$$1\ \text{J} = 6{,}25 \cdot 10^{18}\ \text{eV}$$

Oznacza to, że foton z przykładu 1. ma energię równą:

$$4 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 4 \cdot 10^{-19} \cdot 6{,}25 \cdot 10^{18}\ \text{eV} = 2{,}5\ \text{eV}$$

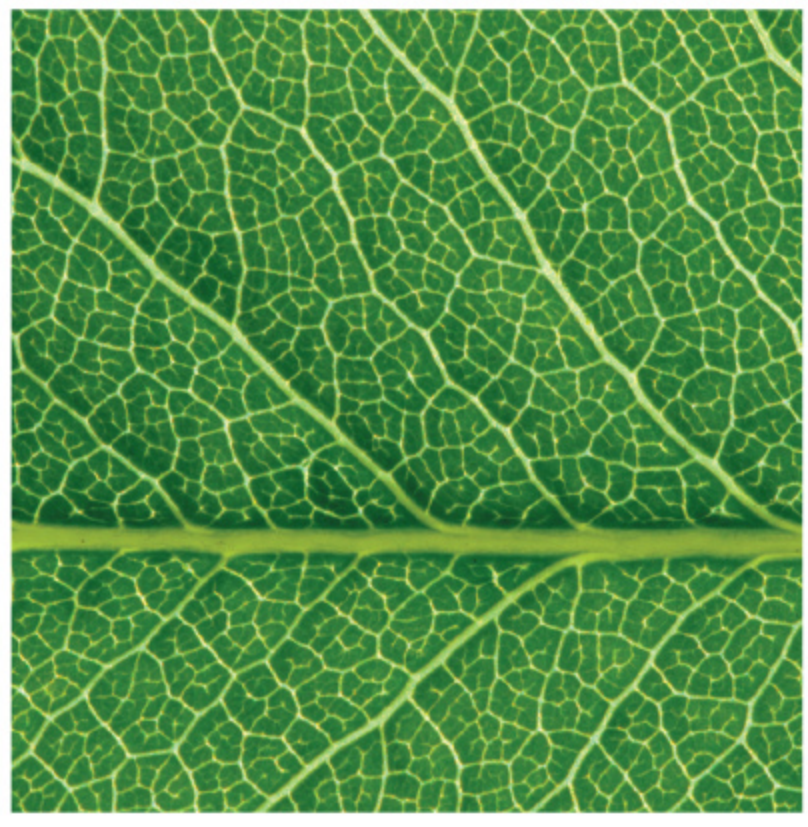
Chociaż światło ma ziarnistą naturę, nie dostrzegamy tego w codziennym życiu, gdyż pojedyncze fotony mają bardzo małą energię. Sypki piasek, który w dużych ilościach przerzucamy łopatą, wygląda jak ośrodek ciągły, choć składa się z małych ziaren. Podobnie rejestrujemy światło.

**Ryc. 26.4.** Światło słoneczne składa się z fotonów o wszystkich możliwych energiach (z zakresu światła)

## WARTO WIEDZIEĆ

**Fotony w fotosyntezie**

Fotosynteza to nazwa przemiany biochemicznej, w której wyniku rośliny zamieniają materię nieorganiczną w organiczną. W tej przemianie pochłaniany jest dwutlenek węgla, a uwalniany jest tlen. Na pierwszym etapie procesu do przebudowy pewnych wiązań chemicznych potrzebna jest energia. Energii tej dostarczają fotony światła. Większość roślin wykorzystuje do fotosyntezy fotony światła niebieskiego i czerwonego, zatem te właśnie fotony są intensywnie pochłaniane. Fotony światła zielonego są natomiast rozpraszane – i stąd zielony kolor liści.



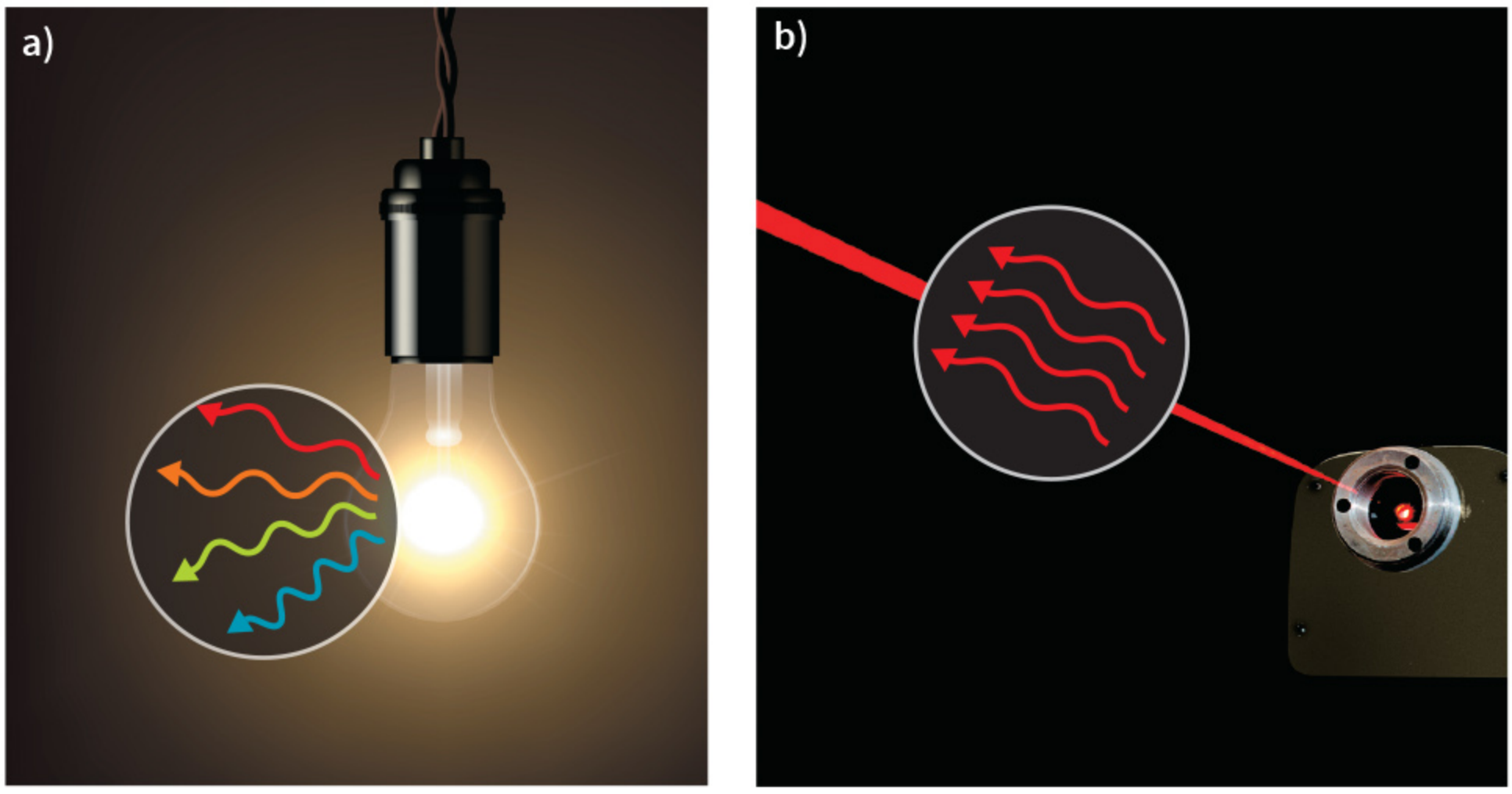
**PRZYKŁAD 2.**

Podczas pieczenia kiełbasek nad ogniskiem są one ogrzewane przez promieniowanie podczerwone o częstotliwości $f_p \approx 10^{14}$ Hz. Promieniowanie powodujące ogrzewanie kiełbaski umieszczonej w kuchence mikrofalowej ma częstotliwość $f_m \approx 2{,}5 \cdot 10^9$ Hz. Którego promieniowania fotony mają większą energię i ile razy?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, najlepiej obliczyć stosunek obu energii:

$$\frac{E_p}{E_m} = \frac{h \cdot f_p}{h \cdot f_m} = \frac{f_p}{f_m} = \frac{10^{14}}{2{,}5 \cdot 10^9} = 40\,000$$

Fotony podczerwieni pochodzące z płomienia mają 40 000 razy większą energię od fotonów z kuchenki mikrofalowej.




**Ryc. 26.5. a)** Światło wyemitowane przez żarówkę składa się z fotonów o różnych energiach i kierunkach ruchu. **b)** Wiązka światła laserowego to wąski strumień identycznych fotonów poruszających się w jedną stronę

Strumień fotonów zachowuje się jak fala, dlatego że pojedynczy foton również ma pewne właściwości falowe. Właśnie to sprawia, że można go sobie wyobrażać jako małą falkę. Światło żarówki składa się z mieszaniny różnych fotonów (falek) (ryc. 26.5a), natomiast laser opuszczają identyczne fotony (ryc. 26.5b). Z tego powodu typowe zjawiska falowe (np. interferencję) znacznie łatwiej zaobserwować przy użyciu światła lasera niż światła żarówki. Dwoiste cząstkowo-falowe właściwości światła noszą nazwę **dualizmu korpuskularno-falowego**. Foton jest cząstką elementarną, ale jednocześnie zachowuje się jak fala. Okazuje się, że foton nie jest wyjątkiem, gdyż elektrony i inne cząstki zachowują się podobnie. Trudno to było wyjaśnić w ramach fizyki newtonowskiej. Dualizm korpuskularno-falowy został poprawnie opisany dopiero w mechanice kwantowej, teorii powstałej w latach dwudziestych XX wieku.

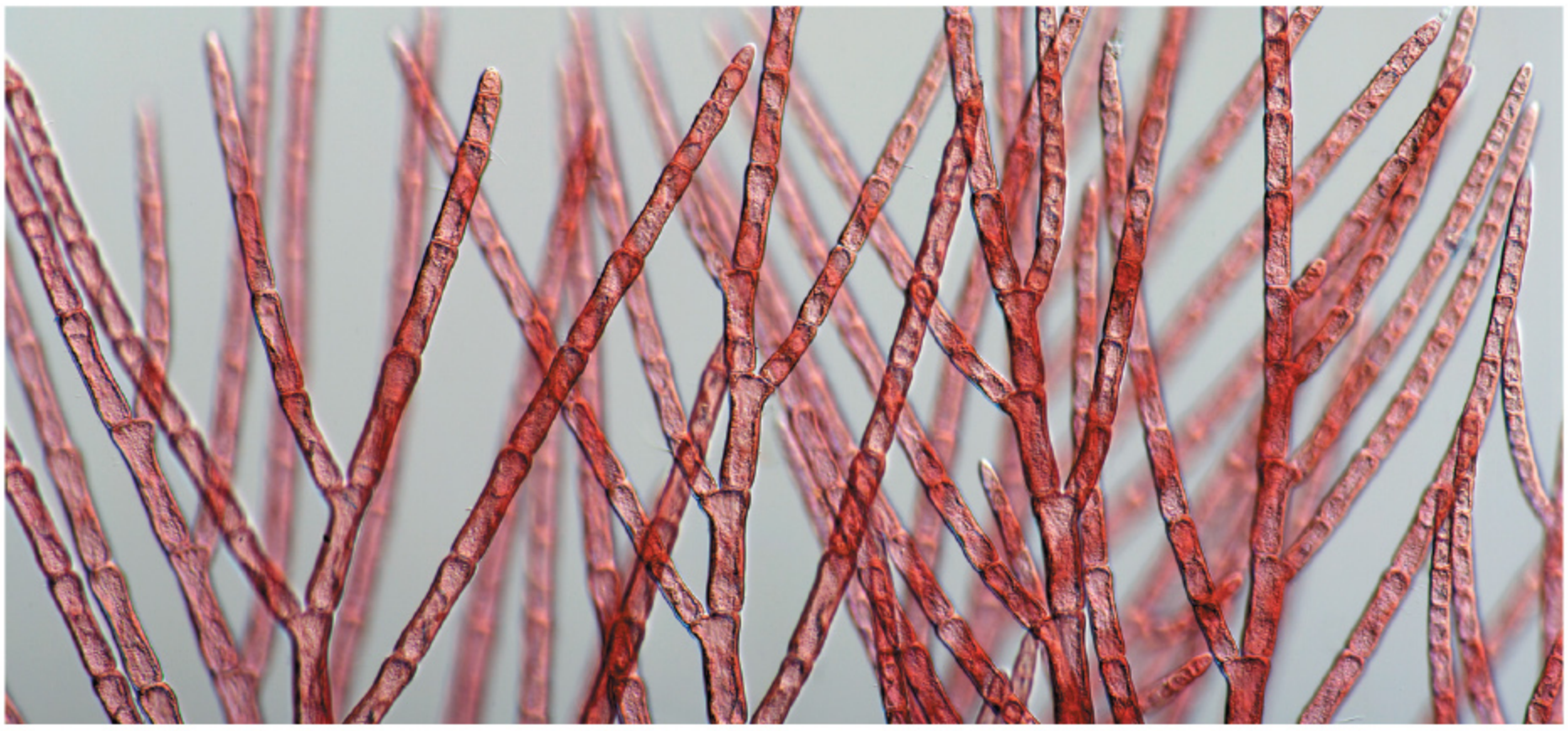
## PODSUMOWANIE

- **Albert Einstein** zmienił nasze pojmowanie przestrzeni i czasu, a także energii i światła.
- Promieniowanie elektromagnetyczne to strumień **fotonów**.
- **Foton** to niepodzielna cząstka poruszająca się z prędkością światła w próżni.
- **Energia fotonu** jest wprost proporcjonalna do częstotliwości fali elektromagnetycznej:

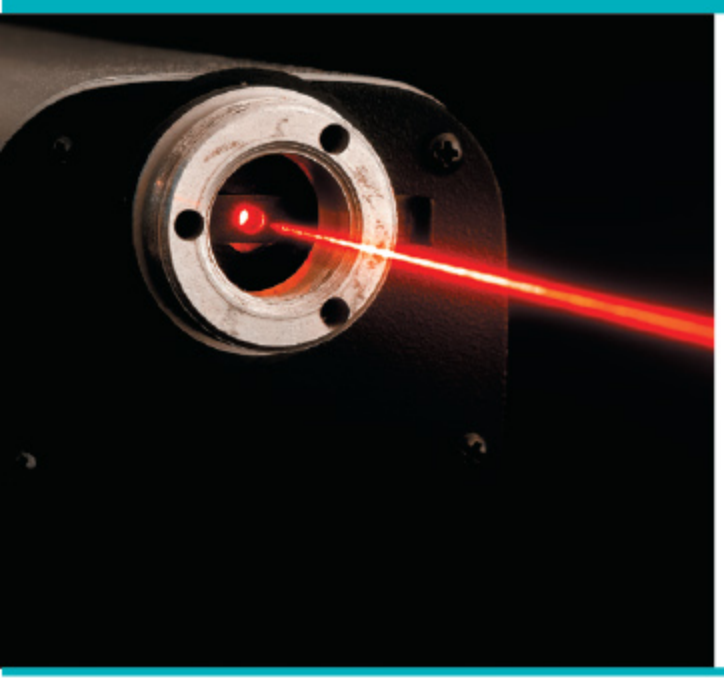
$$E = h \cdot f$$

## PYTANIA I ZADANIA

1. Oblicz energię fotonu światła fioletowego (przyjmij długość fali równą 400 nm) oraz energię fotonu światła czerwonego (przyjmij długość fali 700 nm). Wyniki podaj w elektronowoltach.
2. Krasnorost jest rośliną o nietypowej czerwonej barwie (zdjęcie). Jakiego koloru światło jest najmniej potrzebne krasnorostom do fotosyntezy? Uzasadnij odpowiedź. Wskazówka: przeczytaj *Warto wiedzieć – Fotony w fotosyntezie*.



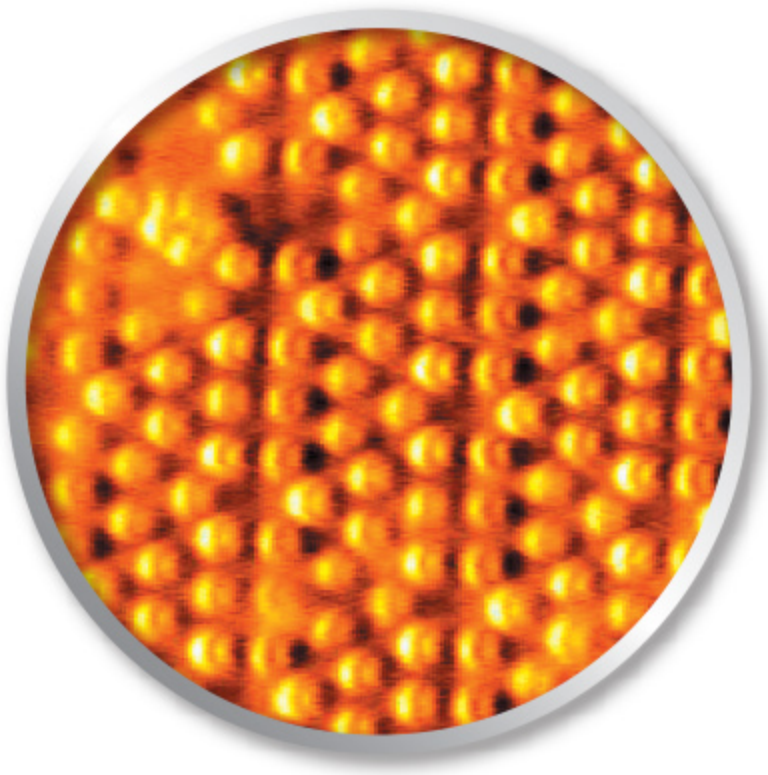
3. Czy twoim zdaniem sensowne byłyby sformułowania: foton czerwony, foton żółty itp.? Wymień argumenty brane przez ciebie pod uwagę podczas formułowania wniosku.
4. Porównaj energię fotonów fal radiowych i rentgenowskich; w tym celu skorzystaj z danych zamieszczonych np. w rozdziale 24. Czy możesz na podstawie tego porównania sformułować hipotezę dotyczącą tego, który z tych dwóch rodzajów fal elektromagnetycznych bardziej oddziałuje na komórki żywe? Wskazówka: przyjmij, że fotony podczas oddziaływania z cząsteczkami wchodzącymi w skład komórek żywych są przez nie pochłaniane.
5. Oszacuj, ile fotonów wysyła w ciągu sekundy zielona dioda o mocy 2 W, emitująca światło o długości fali 500 nm. Wskazówka: oblicz najpierw energię jednego fotonu.



# 27. Budowa i promieniowanie atomów

- Rozmiar i budowa atomu
- Stan podstawowy i stany wzbudzone atomu
- Emisja promieniowania

➔ **Przypomnij sobie** wzór na energię fotonu.



**Ryc. 27.1.** Atomy krzemu zobrazowane za pomocą mikroskopu sił atomowych

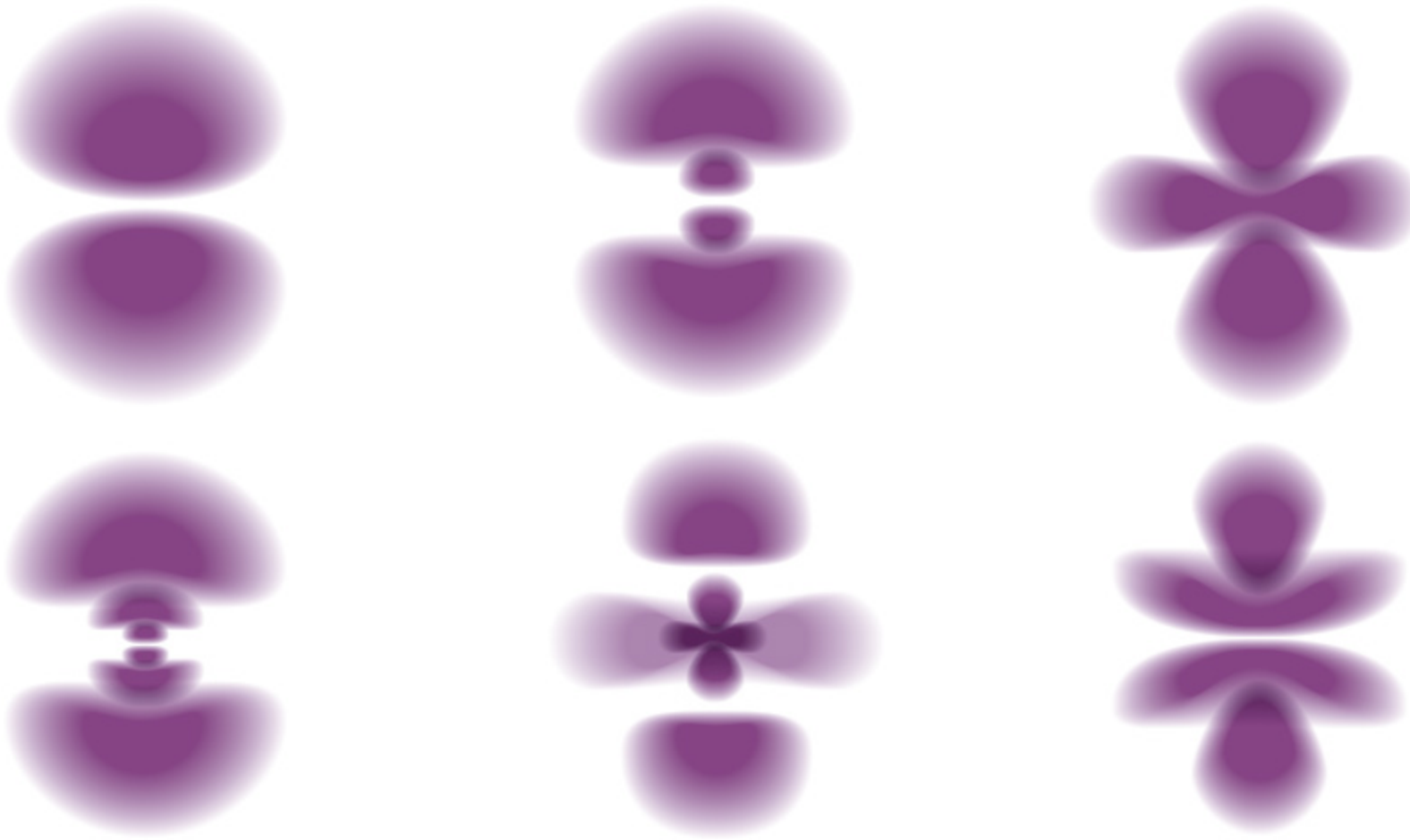
Materia wokół nas składa się z atomów. Atomy są bardzo małe – ich rozmiar to ok. $10^{-10}$ metra. Potrzeba aż 100 mln atomów, by ich rządek rozciągał się na długość 1 cm. Jeśli spróbujemy wyobrazić sobie atom wielkości książki, to książka miałaby w tej skali… 400 tysięcy kilometrów. To więcej niż odległość stąd do Księżyca!

Atomy są tak małe, że nie można ich zobaczyć za pomocą światła, nawet pod mikroskopem. Całą wiedzę o nich czerpiemy z obserwacji pośrednich. Współczesna nauka potrafi w pewien sposób zobrazować atomy. Rycina 27.1 przedstawia zdjęcie atomów krzemu wykonane za pomocą mikroskopu sił atomowych. To urządzenie umożliwia uzyskanie obrazu dzięki pomiarowi oddziaływań między atomami badanej powierzchni i atomem znajdującym się na ostrzu sondy urządzenia pomiarowego.

## Elektrony w atomie

Jeszcze w XIX wieku w nauce toczył się spór o to, czy atomy w ogóle istnieją. Dzisiaj wiemy, że nie tylko istnieją, ale mają złożoną strukturę, tzn. są zbudowane z jeszcze mniejszych obiektów. W centrum każdego atomu znajduje się **jądro atomowe** o ładunku dodatnim, co najmniej 10 tysięcy razy mniejsze od atomu. Mimo tak małych rozmiarów masa jądra stanowi niemal całą masę atomu.

W atomie znajdują się również ujemnie naładowane elektrony. Są one przyciągane siłami elektrycznymi przez jądro. Elektrony traktujemy jak cząstki punktowe, gdyż ich rozmiary są tak małe, że nie mogą ich dostrzec żadne przyrządy pomiarowe. Nie wiemy nawet, gdzie dokładnie w atomie w danej chwili przebywa elektron. Znamy tylko prawdopodobieństwo znalezienia go w różnych miejscach atomu. Obszar, w którym prawdopodobieństwo znalezienia elektronu jest szczególnie duże, nazywamy **chmurą elektronową**. Chmury elektronowe można przedstawić graficznie (ryc. 27.2).



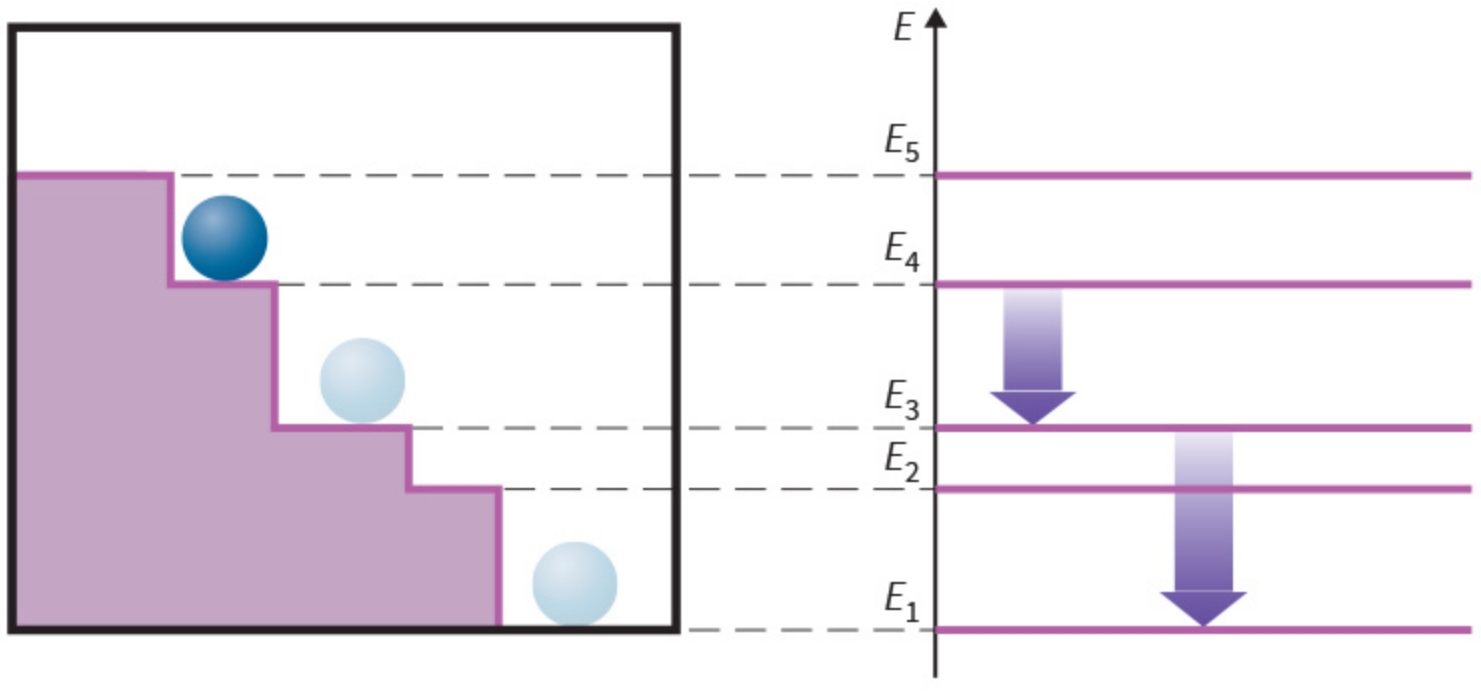
**Ryc. 27.2.** Sześć przykładowych chmur elektronowych. W obszarach zaznaczonych na fioletowo prawdopodobieństwo znalezienia elektronu jest największe

Energia elektronu w atomie składa się z dwóch istotnych składników: energii kinetycznej (elektron jest w ruchu) oraz potencjalnej energii elektrycznej (ujemny elektron jest przyciągany przez dodatnie jądro). Energię elektronu w atomie możemy dokładnie zmierzyć. Okazuje się, że może ona przyjmować tylko niektóre, ściśle określone wartości. Każda taka energia określa stan elektronu, m.in. kształt chmury elektronowej. Możliwe stany elektronów (chmury elektronowe) grupują się w tzw. **powłoki**. Ostatnia powłoka, odpowiadająca najwyższej energii elektronów, nosi nazwę **walencyjnej**.

Atom zbudowany jest z bardzo małego, lecz masywnego jądra, znajdującego się w środku, oraz z otaczających je chmur elektronowych, grupujących się w powłoki.

## Poziomy energetyczne, mechanizm emisji promieniowania

Energię elektronów w atomach opisujemy przez tzw. **poziomy energetyczne**. Żeby oswoić się z tym pojęciem, przeanalizujmy model: piłeczka na schodkach w pudełku (ryc. 27.3).

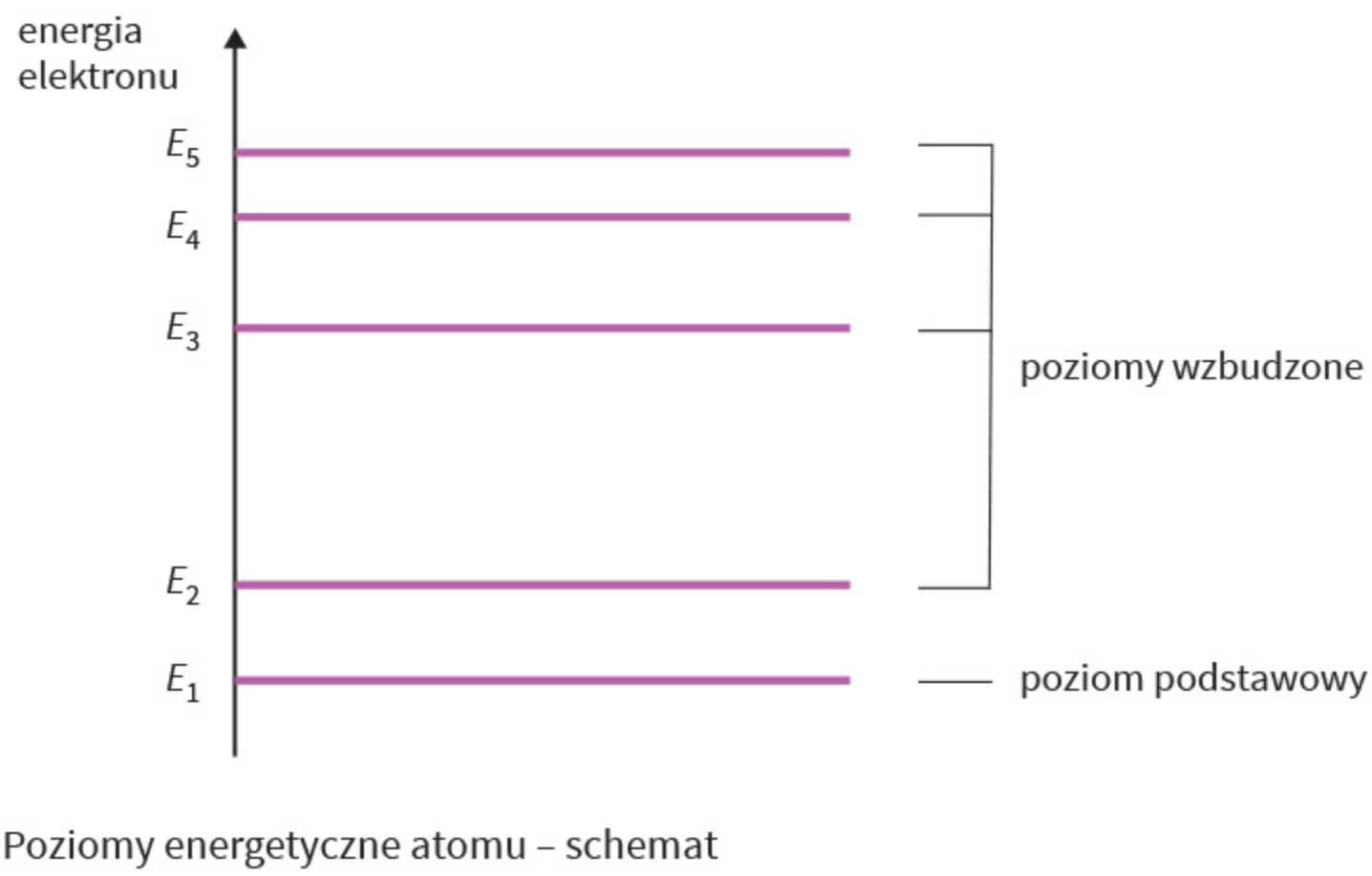



**Ryc. 27.3.** Poziomy energetyczne piłeczki na schodkach

Piłeczka może leżeć na dnie pudełka lub na jednym ze schodków, ale nie może zatrzymać się pomiędzy schodkami. Wobec tego energia grawitacji piłeczki (wprost proporcjonalna do wysokości) w stanach stabilnych nie może być dowolna, lecz może przybierać tylko określone wartości. Te wartości energii możemy zaznaczyć na diagramie (ryc. 27.3). Oś pionowa to oś energii. Poziome kreski oznaczają poziomy energetyczne, czyli energie dostępne dla piłeczki. W naszym modelu piłeczka ma pięć dozwolonych poziomów energetycznych. Ten najniższy nazywamy **poziomem podstawowym**. Pozostałe poziomy to tzw. **poziomy wzbudzone**. Żeby piłeczka mogła wskoczyć na któryś z nich, trzeba jej dostarczyć energii. Natomiast dzięki sile grawitacji piłeczka chętnie spadnie na poziom niższy. Na rycinie 27.3 zaznaczono jej przejście z poziomu czwartego na trzeci. Potem może przejść np. z poziomu trzeciego na pierwszy.

Zachowanie piłeczki możemy zobaczyć i opisać dokładnie bez używania pojęcia poziomów energetycznych, jednak z atomem sprawa przedstawia się inaczej. Nie możemy zobaczyć elektronu w atomie (zamknięte pudełko w naszym modelu), możemy za to poznać jego energię. Elektron może mieć wyłącznie energię określoną przez poziomy energetyczne atomu, w którym się znajduje. Mówimy, że elektron może przebywać tylko na konkretnym poziomie energetycznym (ryc. 27.4).

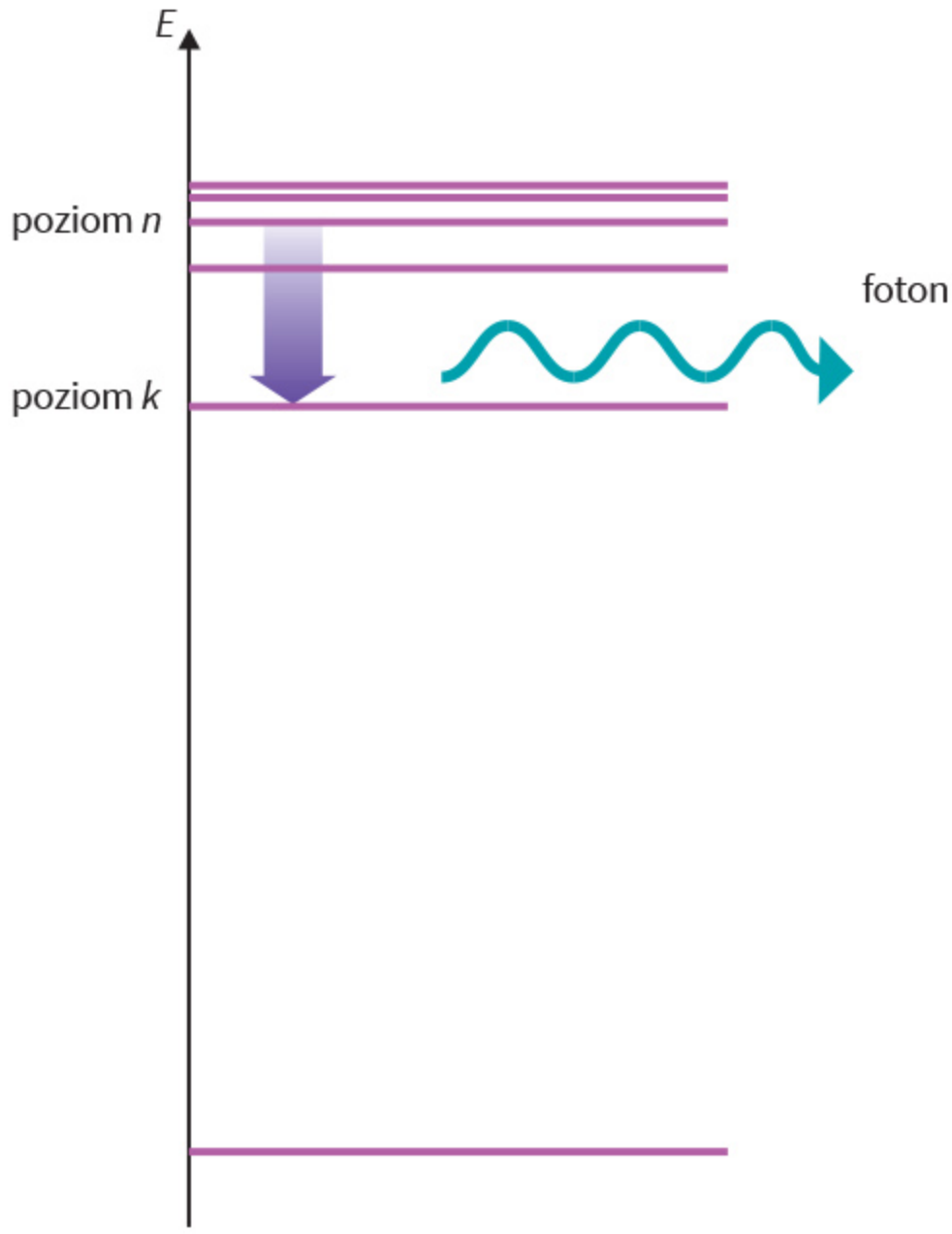
**Poziomy energetyczne** to wartości energii, którą może mieć elektron znajdujący się w atomie.




**Ryc. 27.4.** Poziomy energetyczne atomu – schemat

Elektron jest przyciągany elektrycznie przez jądro atomowe. Im bliżej jest jądra, tym mniejszą ma energię (podobnie jak piłeczka w pudełku – im bliżej jest Ziemi, tym mniejszą ma energię grawitacji). Jeśli atom nie oddziałuje z otoczeniem, jego elektrony mają najmniejszą możliwą energię. Mówimy, że atom jest wówczas w **stanie podstawowym**. Elektron w atomie może zdobyć pewną dodatkową energię, np. poprzez zderzenie

z innym atomem, i przejść do **stanu wzbudzonego** o energii wyższej; chmura elektronowa oddala się wówczas od dodatniego jądra. Ten stan jest niestabilny, gdyż wtedy w atomie pozostają niezajęte poziomy energetyczne o mniejszej energii. Dlatego elektron po chwili „spada" na któryś z niższych poziomów (na rycinie 27.5 z poziomu *n* na *k*), na którym jego energia jest mniejsza. Jednak zasada zachowania energii mówi wyraźnie, że **w układach izolowanych całkowita energia nigdy się nie zmienia**. W tym przypadku różnica energii między poziomami jest wypromieniowywana w postaci fotonu, np. światła lub promieniowania nadfioletowego.




**Ryc. 27.5.** Elektron przechodzi z wyższego poziomu na niższy i emituje foton

Gdy elektron przechodzi z wyższego poziomu energetycznego na niższy, emituje foton. Energia fotonu jest równa różnicy energii między tymi poziomami.

Możemy to zapisać wzorem:

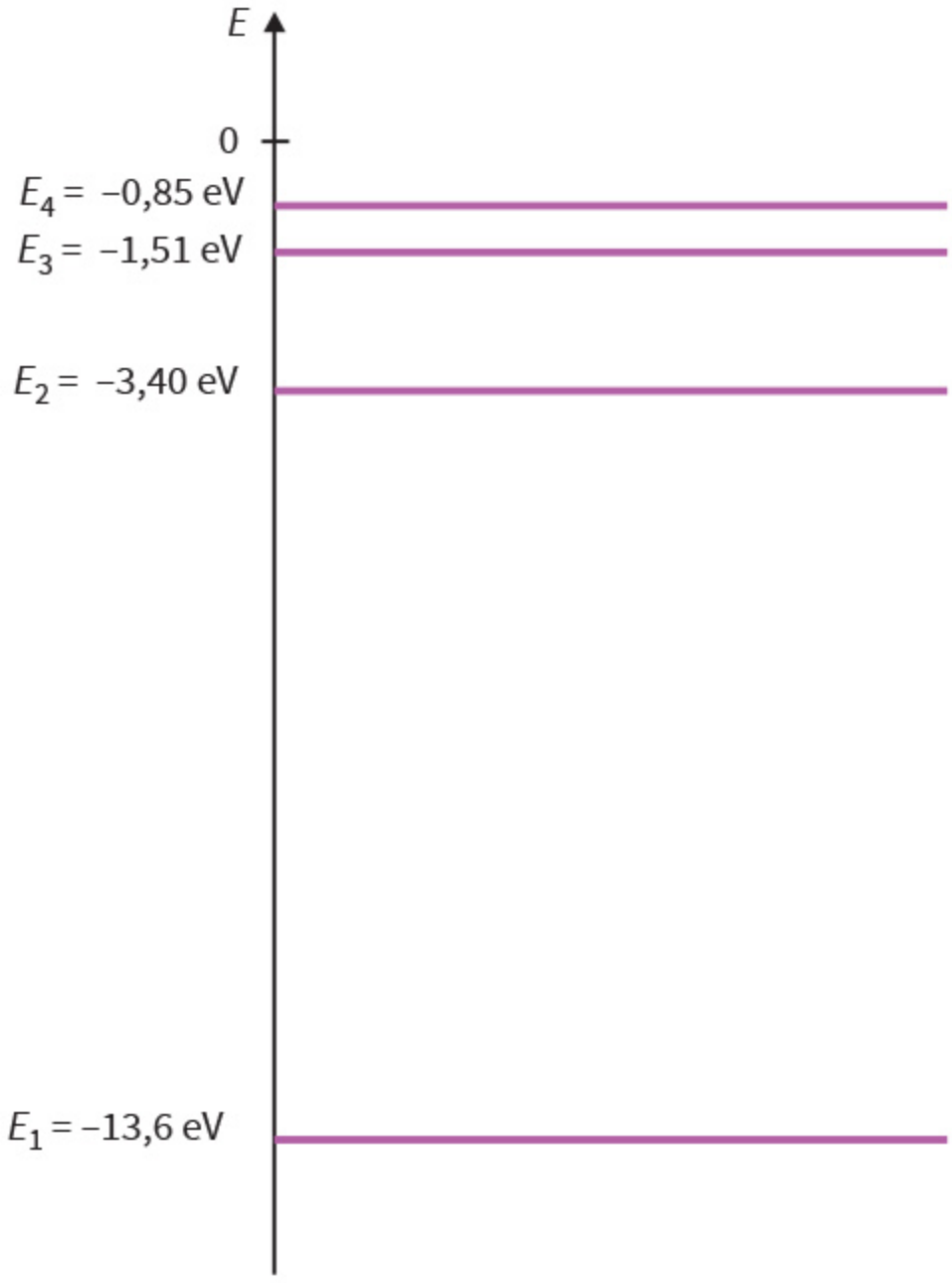
$$hf = E_n - E_k \qquad (1)$$

gdzie:
$hf$ – energia fotonu,
$E_n$, $E_k$ – energie elektronu odpowiednio na poziomie *n* i na poziomie *k*.

Każdy atom ma charakterystyczne dla siebie poziomy energetyczne i może wypromieniować tylko fotony o energii danej wzorem (1). Wobec tego atomy różnych pierwiastków emitują różne fotony, czyli promieniowanie o różnych długościach fal. Dlatego każdy pierwiastek ma charakterystyczne dla siebie widmo liniowe (ryc. 25.9)

Taki mechanizm emisji promieniowania zachodzi we wszystkich źródłach nietermicznych, np. w laserach, świetlówkach, robaczkach świętojańskich. Zwykle elektron przebywa w stanie o wyższej energii bardzo krótko, ale w niektórych substancjach atomy w stanie wzbudzonym mogą trwać długo, nawet kilka godzin. Takie substancje stosuje się w farbach fluorescencyjnych, którymi maluje się np. tabliczki ewakuacyjne.

Rycina 27.6 przedstawia najniższe poziomy energetyczne atomu wodoru. Zero na osi energii umieszcza się umownie tak, żeby wszystkie poziomy były poniżej zera.




**Ryc. 27.6.** Poziomy energetyczne atomu wodoru

**PRZYKŁAD 1.**

Jaka będzie długość fali promieniowania wyemitowanego przez atom wodoru, gdy elektron przejdzie z poziomu trzeciego na drugi?

Odczytujemy z ryciny 27.6 energię na trzecim i drugim poziomie:

$$E_3 = -1{,}51 \text{ eV}$$

$$E_2 = -3{,}4 \text{ eV}$$

Obliczamy różnicę energii tych poziomów i wyrażamy ją w dżulach:

$$E_3 - E_2 = 1{,}89 \text{ eV} = 1{,}89 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx 3{,}0 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Teraz możemy z przekształconego wzoru (1) obliczyć częstotliwość:

$$f = \frac{E_3 - E_2}{h} = \frac{3 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6{,}63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} \approx 0{,}45 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{s}} = 4{,}5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

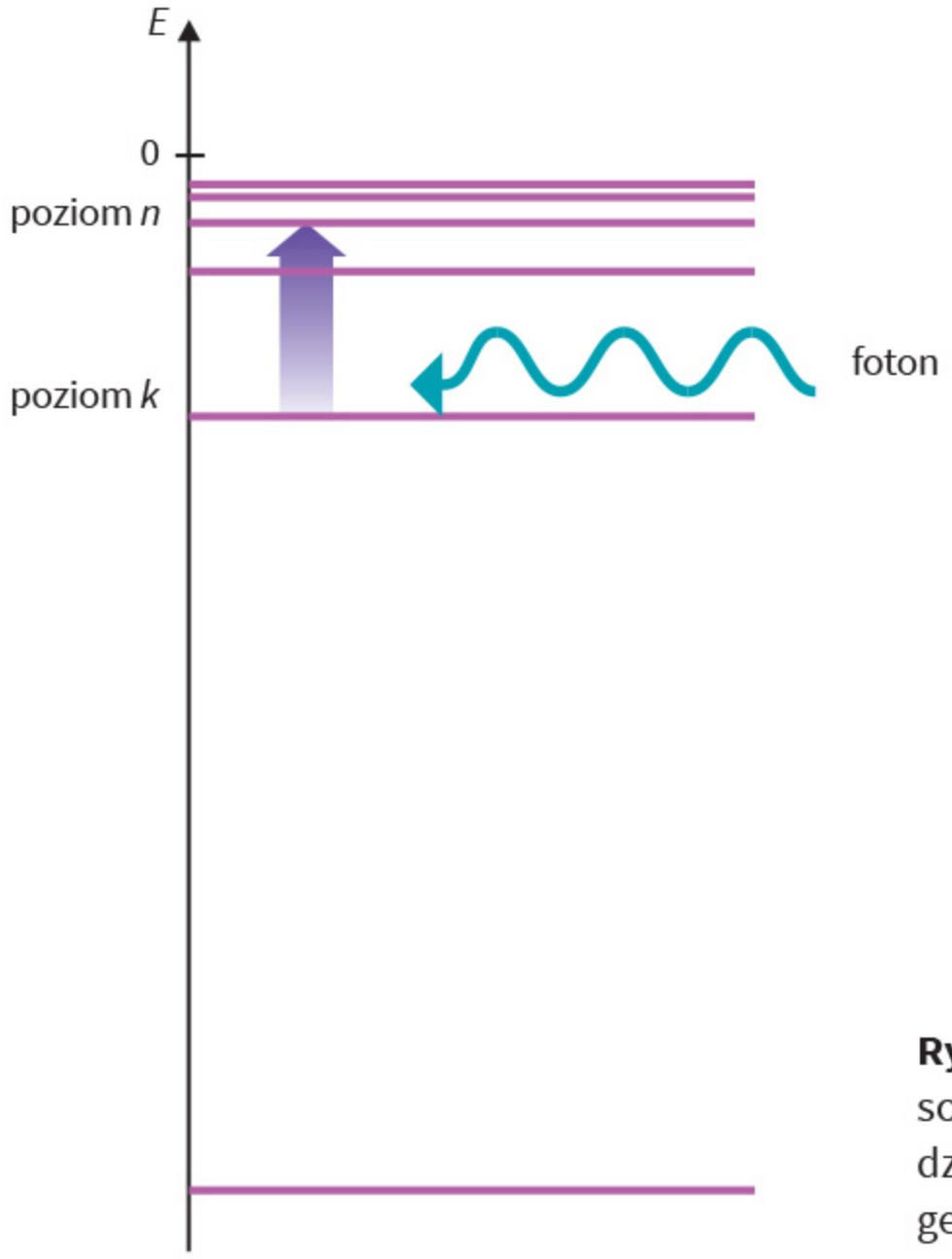
Następnie obliczymy długość fali:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^{8} \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4{,}5 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}} \approx 0{,}67 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 670 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 670 \text{ nm}$$

Ta długość fali mieści się w przedziale światła. Widmo wodoru ma czerwoną linię o długości fali 656 nm (ryc. 25.9). Dane zostały podane z określoną dokładnością, dlatego nasz wynik jest przybliżony. Stwierdzamy zatem, że elektron w atomie wodoru na skutek przejścia z poziomu trzeciego na drugi emituje foton światła czerwonego.

## Pochłanianie promieniowania

Wzór (1) opisuje nie tylko energie wszystkich fotonów, które atom może wyemitować, lecz także energie wszystkich fotonów, które atom może pochłonąć. Pochłonięcie fotonu jest procesem odwrotnym do jego emisji (ryc. 27.7). Atom może pochłonąć (zaabsorbować) takie fotony, których energia przeprowadzi elektron na jeden z dozwolonych poziomów energetycznych.




**Ryc. 27.7.** Elektron po zaabsorbowaniu fotonu przechodzi z niższego poziomu energetycznego na wyższy

Właśnie dlatego ciemne linie w widmie absorpcyjnym są dokładnie w miejscu barwnych linii widma emisyjnego danego pierwiastka. Z tego też powodu gazy są praktycznie przezroczyste. Atomy mogą pochłonąć tylko nieliczne fotony o energii spełniającej wzór (1), więc zdecydowana większość fotonów światła słonecznego nie może zostać pochłonięta, bo ich energia nie odpowiada żadnemu przejściu między poziomami atomów (lub cząsteczek) tworzących gaz.

## Jonizacja atomów

Elektrony są związane w atomie dzięki oddziaływaniu z dodatnio naładowanym jądrem atomowym. Jeśli jednak elektron uzyska odpowiednią energię, może uciec z atomu. Atom ulega wówczas jonizacji – staje się jonem dodatnim.

**Jonizacja** polega na usunięciu z atomu co najmniej jednego elektronu.

Jonizacja atomu nastąpi wtedy, gdy elektron otrzyma energię, dzięki której może „przeskoczyć" wszystkie poziomy energetyczne. Na podstawie diagramu z poziomami atomu wodoru (ryc. 27.6) możemy stwierdzić, że elektron, aby znaleźć się poza atomem, musi mieć energię nieujemną. Energia stanu podstawowego elektronu w atomie wodoru to –13,6 eV. Żeby usunąć z atomu elektron będący w tym stanie, należy dostarczyć mu energię równą co najmniej 13,6 eV, gdyż:

$$-13{,}6\ \text{eV} + 13{,}6\ \text{eV} = 0$$

Gdy elektron jest na drugim poziomie, wystarczy energia 3,4 eV:

$$-3{,}4\ \text{eV} + 3{,}4\ \text{eV} = 0$$

Energia potrzebna do wybicia elektronu z atomu nazywana jest **energią jonizacji** $E_j$. Elektron może uzyskać tę energię dzięki oddziaływaniu z innymi atomami lub poprzez pochłonięcie fotonu. W tym drugim przypadku jonizację mogą spowodować tylko fotony o energii równej co najmniej $E_j$:

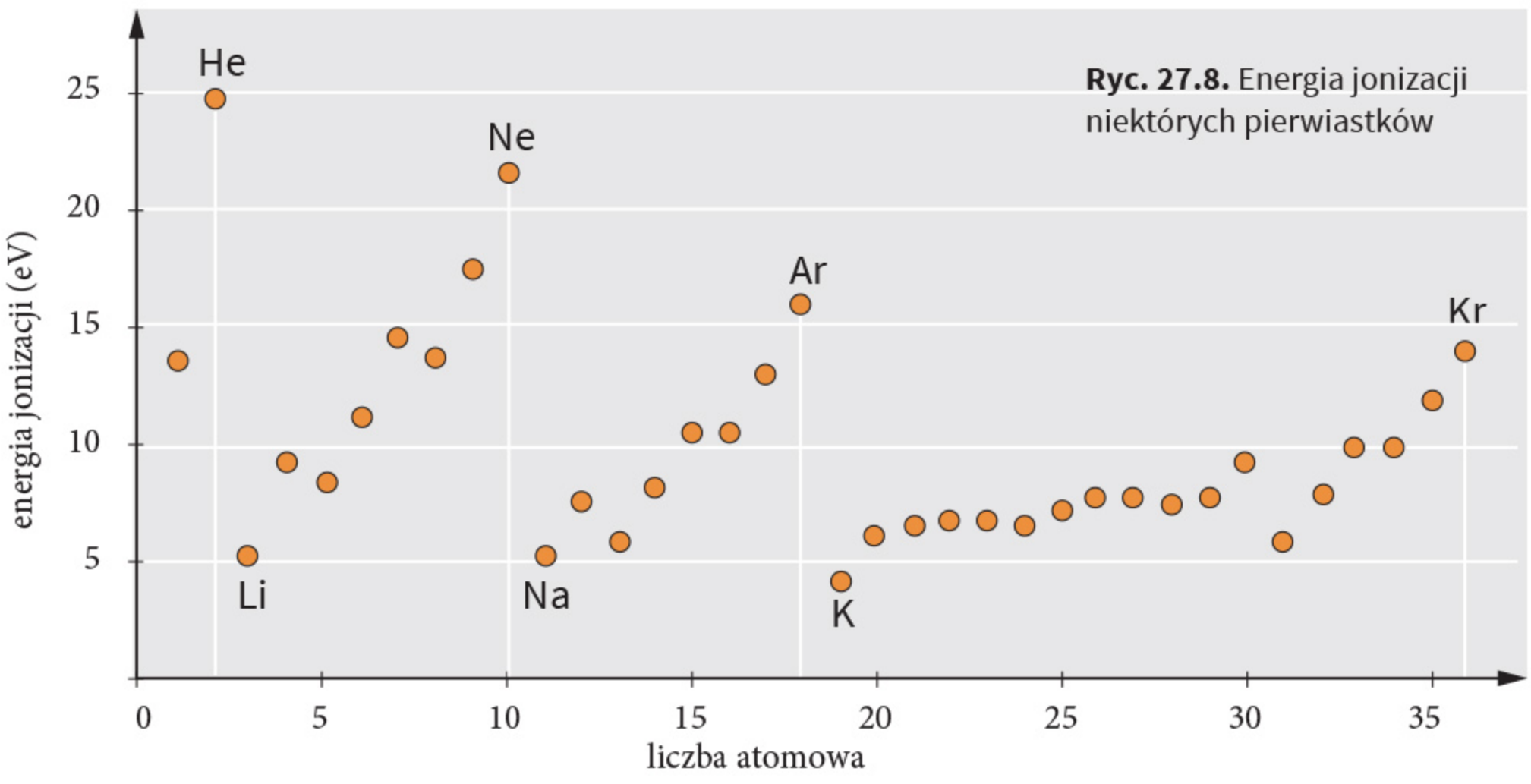
$$hf \geqslant E_j$$

Po przekształceniu otrzymamy wzór na częstotliwość takiego promieniowania:

$$f \geqslant \frac{E_j}{h}$$

Wobec tego istnieje minimalna częstotliwość – tzw. **częstotliwość graniczna** – promieniowania wywołującego jonizację atomów danego pierwiastka:

$$f_{gr} = \frac{E_j}{h} \qquad (2)$$




**Ryc. 27.8.** Energia jonizacji niektórych pierwiastków

Na rycinie 27.8 przedstawiono energię potrzebną do wybicia pierwszego elektronu z walencyjnej powłoki elektronowej dla pierwszych 36 pierwiastków układu okresowego. Można zauważyć, że największą energię jonizacji mają gazy szlachetne, a najmniejszą – atomy metali z pierwszej grupy układu okresowego pierwiastków. Fotony światła mają energię za małą do zjonizowania jakiegokolwiek atomu pierwiastków z ryciny 27.8. Energię odpowiednią do ich zjonizowania mają dopiero fotony nadfioletu, promieniowania rentgenowskiego i gamma – stąd te rodzaje promieniowania nazywane są promieniowaniem jonizującym.

**PRZYKŁAD 2.**

Oszacujmy częstotliwość graniczną promieniowania, które może spowodować jonizację azotu.

Z wykresu na rycinie 27.8 odczytujemy, że dla azotu (liczba atomowa 7) $E_j \approx 14{,}5\ \text{eV}$. Energię jonizacji wyrazimy w dżulach:

$$E_j \approx 14{,}5\ \text{eV} = 14{,}5 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J} \approx 2{,}3 \cdot 10^{-18}\ \text{J}$$

Częstotliwość graniczną obliczymy ze wzoru (2):

$$f_{gr} = \frac{E_j}{h} = \frac{2{,}3 \cdot 10^{-18}\ \text{J}}{6{,}6 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}} \approx 3{,}5 \cdot 10^{15}\ \text{Hz}$$

Atom azotu może być zjonizowany tylko przez promieniowanie o częstotliwości równej co najmniej $3{,}5 \cdot 10^{15}\ \text{Hz}$ — jest to częstotliwość z zakresu nadfioletu.

Atom pozbawiony elektronu staje się jonem dodatnim. Elektrony wybite z atomów mogą być przyłączane przez obojętne atomy – powstają wtedy jony ujemne. Podczas ich powstawania przyciągnięty elektron oddaje pewną energię.

Atom może zatem pochłonąć foton tylko w dwóch przypadkach:

1. gdy spowoduje to przeniesienie elektronu na jeden z wyższych poziomów energetycznych;
2. gdy spowoduje to wyrzucenie elektronu z atomu, czyli jonizację atomu.

Niezależnie od tych procesów fotony ulegają rozproszeniu na atomach, na które padają. Gdy patrzymy na ekran smartfona lub lampę LED, widzimy fotony powstające dzięki przejściom elektronów na niższe poziomy energetyczne. Gdy patrzymy na ciała „odbijające" światło, widzimy fotony rozproszone przez atomy tych ciał.

## PODSUMOWANIE

- Atom składa się z bardzo małego jądra, w którym skupiona jest prawie cała masa atomu, i elektronów tworzących **chmury elektronowe**.
- **Poziomy energetyczne atomu** to dozwolone wartości energii elektronu.

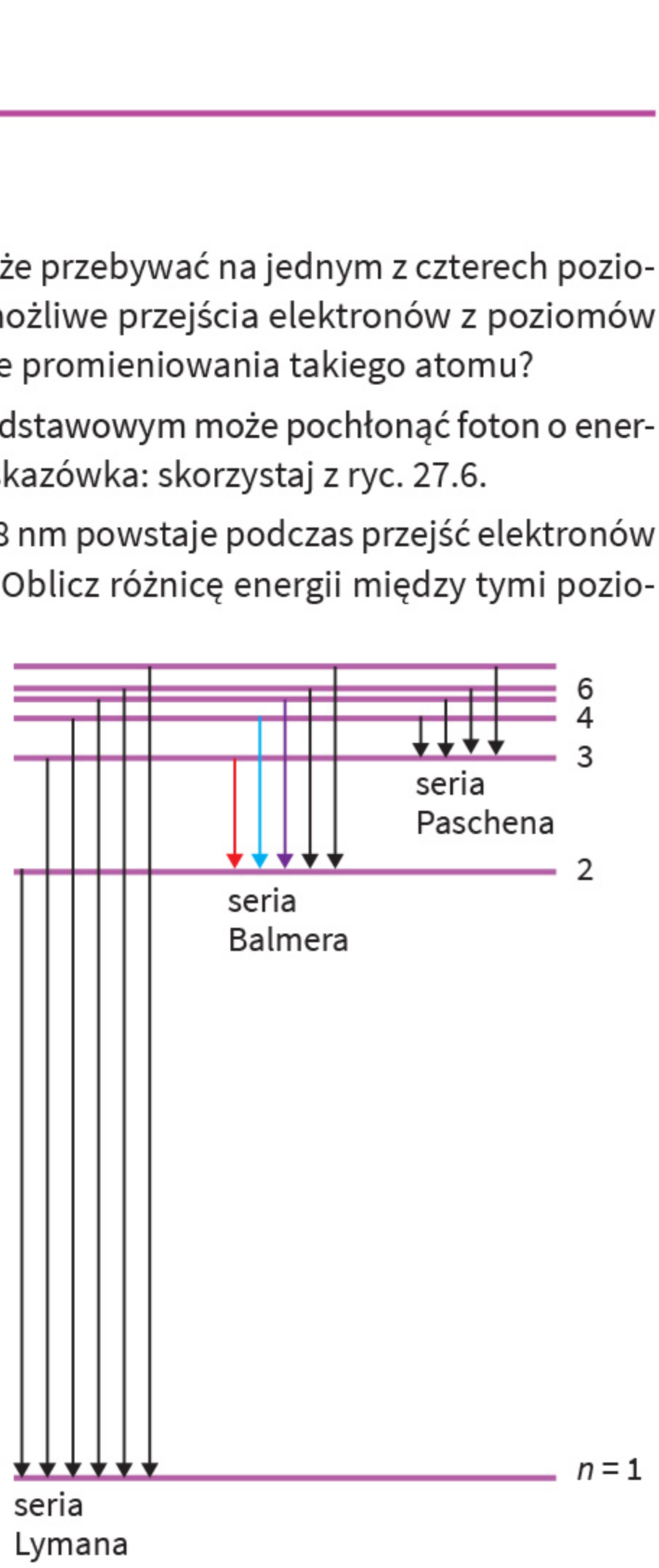
- Stan elektronu o najniższej dozwolonej energii to **stan podstawowy**, a **stany wzbudzone** to stany o energii wyższej.
- Atom **emituje promieniowanie**, gdy elektron przechodzi z wyższego poziomu energetycznego na niższy, a energia wyemitowanego fotonu jest równa różnicy energii między tymi poziomami:

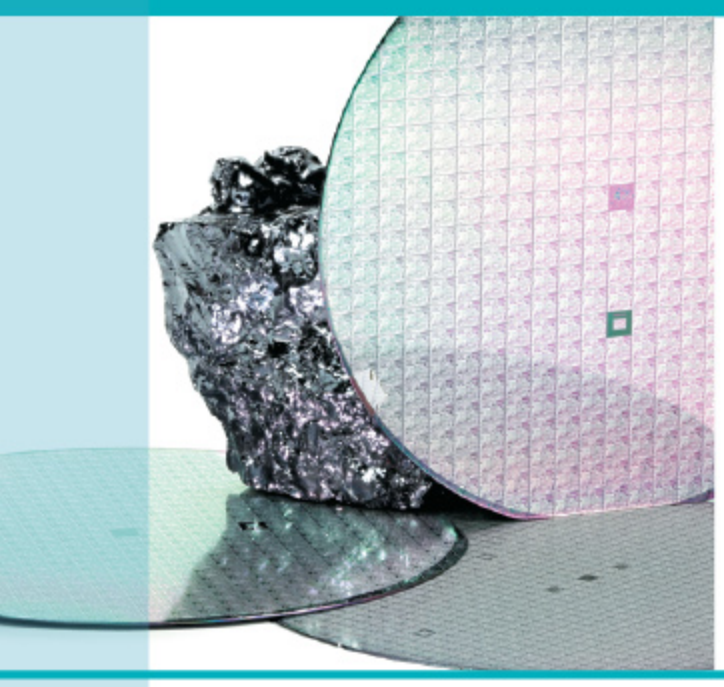
$$hf = E_{\mathrm{n}} - E_{\mathrm{k}}$$

- Pochłanianie fotonów jest procesem odwrotnym do ich emisji.
- Atom może zostać zjonizowany przez promieniowanie o częstotliwości co najmniej równej **częstotliwości granicznej**.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Załóżmy, że w pewnym atomie elektron może przebywać na jednym z czterech poziomów energetycznych. Narysuj wszystkie możliwe przejścia elektronów z poziomów wyższych na niższe. Ile linii byłoby w widmie promieniowania takiego atomu?
2. Czy atom wodoru znajdujący się w stanie podstawowym może pochłonąć foton o energii 7 eV lub 14 eV? Uzasadnij odpowiedź. Wskazówka: skorzystaj z ryc. 27.6.
3. Zielone światło zorzy polarnej o długości 558 nm powstaje podczas przejść elektronów między dwoma poziomami atomów tlenu. Oblicz różnicę energii między tymi poziomami. Wyraź ją w elektronowoltach.
4. Oblicz długość fali światła emitowanego przez atom wodoru podczas przejścia elektronu z poziomu czwartego na poziom drugi (ryc. 27.6). Zidentyfikuj odpowiadającą temu przejściu linię widmową (ryc. 25.9).
5. Na rysunku obok przedstawiono niektóre możliwe przejścia elektronu w atomie wodoru, pogrupowane w tzw. serie. Przejścia zaznaczone kolorowymi strzałkami odpowiadają liniom widma o tych właśnie barwach.
   a) W jakim zakresie fal elektromagnetycznych leżą linie widmowe serii Paschena? Uzasadnij odpowiedź.
   b) W jakim zakresie fal elektromagnetycznych leżą linie widmowe serii Lymana? Uzasadnij odpowiedź.





# 28. Przewodniki, izolatory i półprzewodniki

- Zakaz Pauliego i układ okresowy pierwiastków
- Pasma energetyczne w przewodnikach i izolatorach
- Półprzewodniki

➔ **Przypomnij sobie** budowę atomu.

Współczesna elektronika oparta jest na elementach półprzewodnikowych, takich jak np. diody i tranzystory. Trudno byłoby jednak zrozumieć ich działanie bez znajomości podstawowych pojęć teorii pasmowej, która wyjaśnia przewodzenie prądu w ciałach stałych.

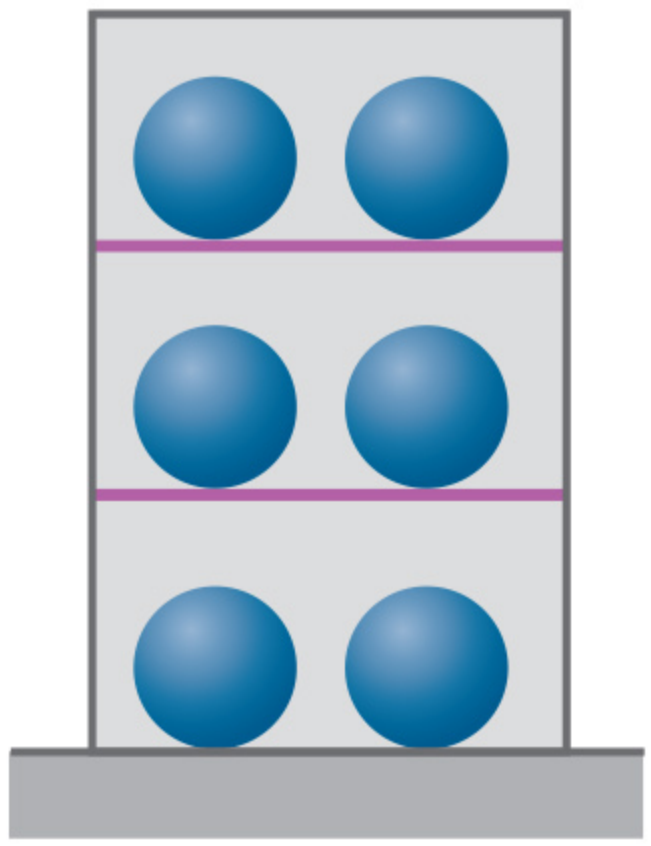
## Budowa atomu a układ okresowy pierwiastków

Elektron w atomie może być w jednym z wielu dostępnych stanów, czyli może zajmować jeden z bardzo wielu poziomów energetycznych. Każdy elektron w stanie równowagi przebywa na najniższym dostępnym poziomie, ale czy to oznacza, że wszystkie elektrony w atomie są zawsze na pierwszym, najniższym poziomie? Okazuje się, że istnieje pewne ograniczenie, które nosi nazwę **zakazu Pauliego**.

**Zakaz Pauliego**
Jeden poziom energetyczny mogą zajmować najwyżej dwa elektrony.

To prawo jest częścią mechaniki kwantowej i wymyka się naszej intuicji. Żeby to sobie łatwiej wyobrazić, możemy nadal „modelować" stany elektronów w atomie poprzez piłeczki w pudełku ze schodkami. Zakaz Pauliego oznaczałby w tym modelu, że na jednym schodku mogą zmieścić się najwyżej dwie piłeczki (ryc. 28.1).

Elektrony wypełniają kolejne poziomy – zaczynają od poziomu o najniższej energii. Poziomy położone blisko siebie tworzą powłoki elektronowe. Pierwszą powłokę tworzy tylko najniższy poziom energetyczny, a w kolejnych powłokach jest już więcej poziomów. Ostatnia wypełniona (choćby częściowo) powłoka to powłoka walencyjna. Znajdujące się tam elektrony są najsłabiej przyciągane przez macierzyste



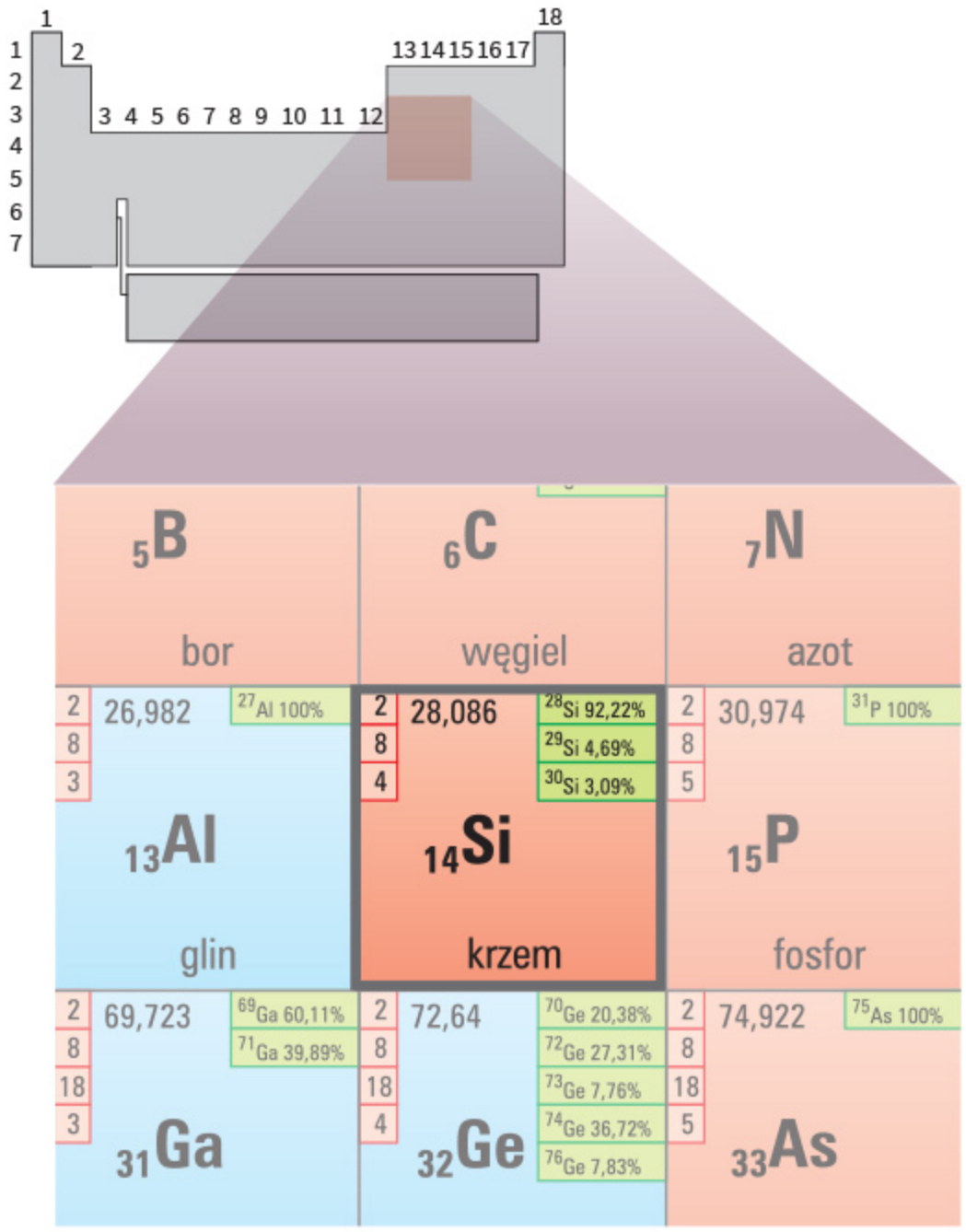
**Ryc. 28.1.** Tylko dwie piłeczki mieszczą się na jednym schodku

jądro atomowe, zatem najmocniej „czują” przyciąganie jąder pobliskich atomów i mogą tworzyć wiązania chemiczne.

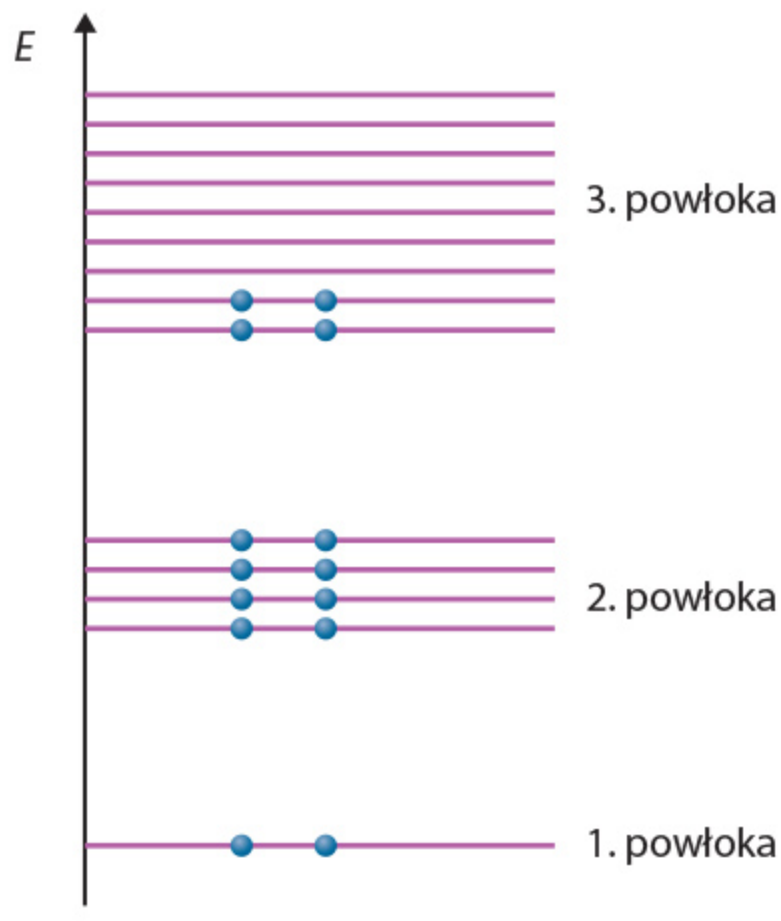
Podstawowe informacje o budowie atomu konkretnego pierwiastka można odczytać z układu okresowego pierwiastków, umieszczonego na końcu podręcznika. Liczba atomowa jest równa liczbie elektronów w atomie, numer okresu odpowiada liczbie powłok elektronowych.

**PRZYKŁAD 1.**

Atom krzemu ma 14 elektronów (tyle wynosi jego liczba atomowa). Krzem znajduje się w trzecim okresie (odczytujemy to z lewej strony układu okresowego), a to znaczy, że ma trzy powłoki elektronowe. W naszej wersji układu okresowego po lewej stronie symbolu każdego pierwiastka możemy odczytać liczbę elektronów na kolejnych powłokach. Na przykład w atomie krzemu na trzeciej powłoce są cztery elektrony; 28,086 to masa atomowa, czyli masa atomu wyrażona w jednostkach masy atomowej (u). Po prawej stronie symbolu pierwiastka podane są różne izotopy krzemu (określone różnymi liczbami masowymi) wraz z ich procentową zawartością w przyrodzie.




Na podstawie danych z przykładu 1. można narysować rozmieszczenie elektronów na poziomach energetycznych w atomie krzemu (ryc. 28.2).




**Ryc. 28.2.** Schemat rozmieszczenia elektronów w atomie krzemu

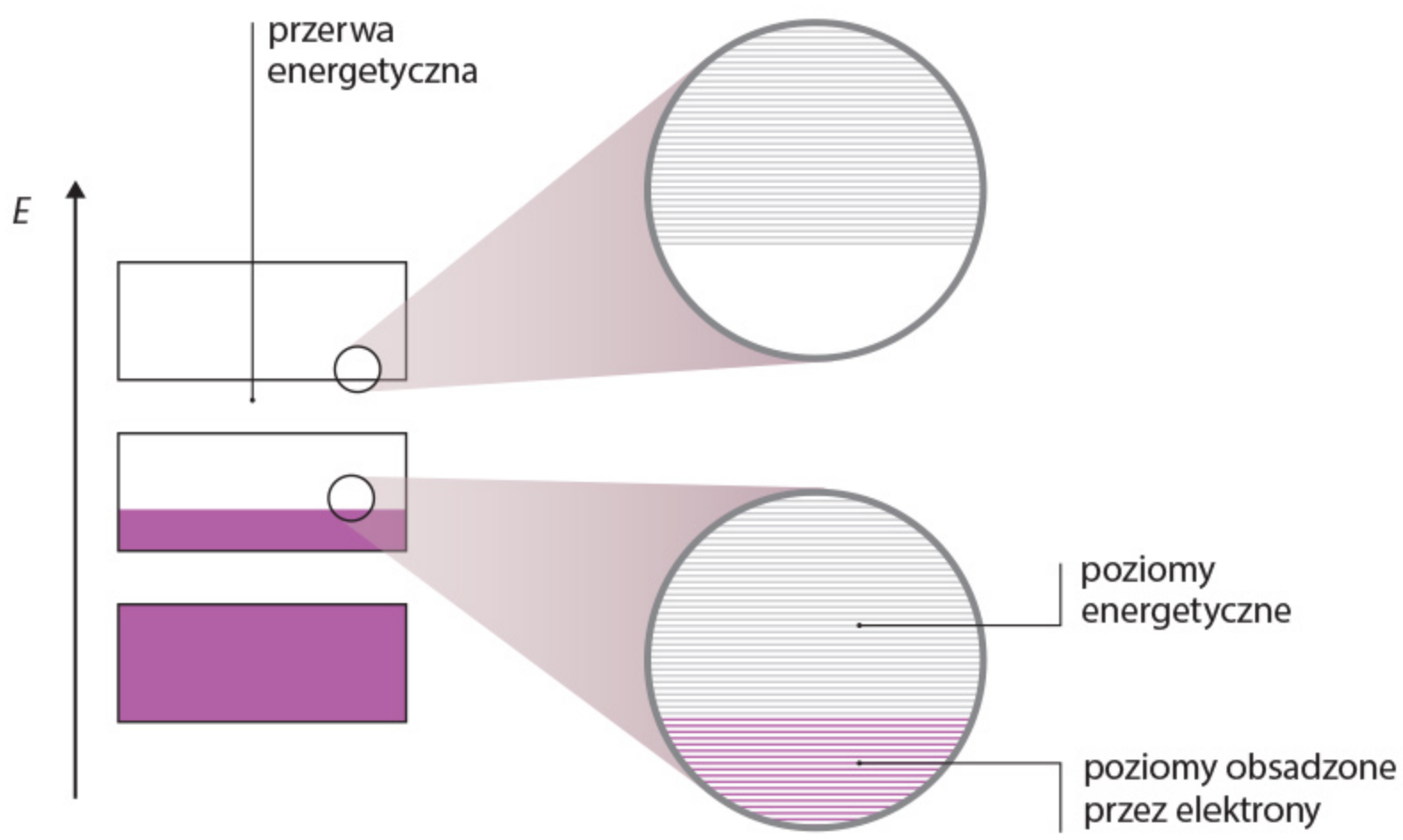
## Pasma energetyczne

W sieci krystalicznej ciała stałego atomy są bardzo blisko siebie, ich powłoki elektronowe „stykają się" ze sobą, a elektrony mogą przechodzić z atomu do atomu na niezajęte poziomy energetyczne. Każdy elektron staje się cząstką składową całego kryształu. Poziomy energetyczne elektronów w krysztale grupują się w tzw. **pasma energetyczne**, podobnie jak w atomie grupują się w powłoki. W każdym paśmie jest tak duża liczba gęsto upakowanych poziomów, że możemy mówić o ciągłych pasmach energetycznych (ryc. 28.3). Energia elektronu to energia jednego z dostępnych dla niego poziomów, zatem na diagramie energii elektrony mogą być tylko w dostępnych dla nich pasmach. Między pasmami są przerwy energetyczne – żaden elektron nie ma energii leżącej w takiej przerwie.

Z zakazu Pauliego wynika, że w każdym paśmie może się zmieścić ograniczona liczba elektronów. Zachowanie elektronów w pasmach można sobie łatwiej wyobrazić, gdy znowu skorzysta się z modelu piłeczek w pudełku ze schodkami. W tej skali piłeczki są tak małe, że przypominają ziarnka piasku. Elektrony w pasmach zachowują się trochę jak bardzo sypki piasek i wypełniają pasmo, podobnie jak piasek wypełnia pudełko.

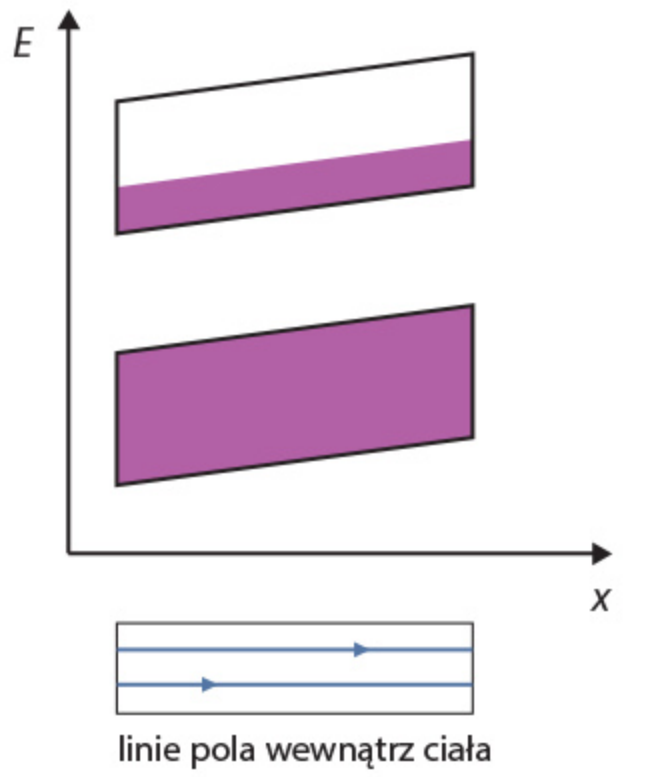
## Przewodniki i izolatory

Ze względu na możliwość przewodzenia prądu elektrycznego szczególnie ważne są **elektrony swobodne**, czyli elektrony mogące się przemieszczać między atomami. Takie elektrony mogą tworzyć prąd tylko wtedy, gdy ich energia należy do pasma częściowo pustego. Tak właśnie jest w metalach – najwyższe pasmo obsadzone elektronami nie jest wypełnione całkowicie (ryc. 28.3). To znaczy, że jest tam wiele dostępnych poziomów energetycznych.




**Ryc. 28.3.** Pasma energetyczne w metalach. Każde pasmo składa się z wielu poziomów energetycznych

Gdy do ciała przyłożymy pole elektryczne, zmienia ono energię elektronów. Energia każdego elektronu rośnie wzdłuż linii pola, zatem wzdłuż tych linii poziomy i pasma będą odchylone w górę (ryc. 28.4).

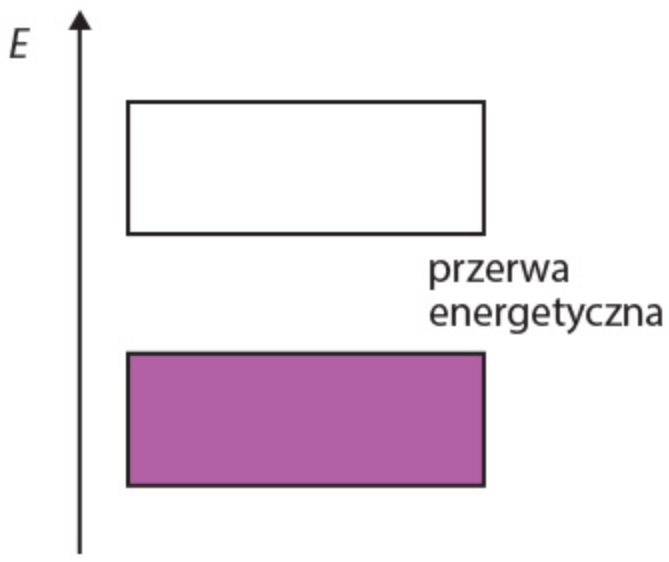



**Ryc. 28.4.** Dwa najwyższe pasma energetyczne metalu, obsadzone elektronami, w polu elektrycznym

Jeżeli istnieje pasmo częściowo wypełnione, tak jak na rycinie 28.3, to w polu elektrycznym elektrony w tym paśmie będą zajmować niższe dostępne poziomy, czyli przemieszczać się w lewo – w ten sposób powstanie prąd płynący w prawo. Ruch elektronów jest w tym przypadku podobny do ruchu ziarnek piasku w przechylonym pudle.

Ciało z częściowo pustym pasmem z elektronami jest **przewodnikiem**.

W izolatorze najwyższe pasmo z elektronami jest całkowicie nimi zapełnione, a następne zupełnie puste pasmo jest dużo wyżej (ryc. 28.5). W takiej sytuacji żaden elektron nie może zmienić energii na inną w tym samym paśmie, gdyż wszystkie stany są zajęte. W modelu pudełka z piaskiem odpowiada to sytuacji, gdy jest ono całkowicie wypełnione piaskiem. Przechylenie pudełka nie spowoduje przesypywania się piasku. Podobnie elektrony znajdujące się w wypełnionym paśmie nie mogą tworzyć prądu. Mogłyby go tworzyć, gdyby przeskoczyły do wyższego pustego pasma, ale jest ono za wysoko. Przerwa energetyczna między tymi pasmami ma w izolatorach szerokość kilku elektronowoltów. W zderzeniach zachodzących wewnątrz kryształu elektrony nie uzyskują takiej energii i dlatego w izolatorach nie ma elektronów swobodnych.



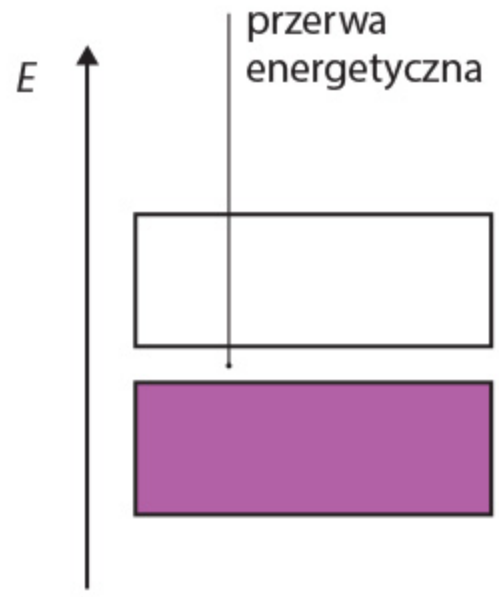

**Ryc. 28.5.** Najwyższe pasmo całkowicie wypełnione elektronami i wyższe puste pasmo w izolatorze

Ciało z dużą przerwą energetyczną między pasmem całkowicie wypełnionym elektronami a pasmem pustym jest **izolatorem**.

## Półprzewodniki

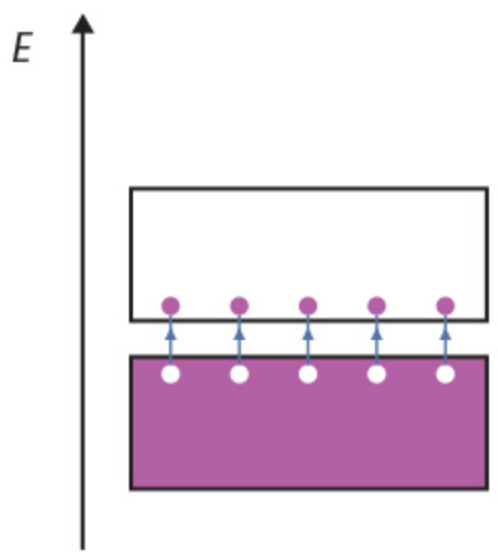
W rozwoju elektroniki kluczową rolę odgrywają półprzewodniki. Jak sama nazwa wskazuje, ich zdolność przewodzenia prądu jest większa niż w wypadku izolatorów i mniejsza niż w wypadku przewodników.

W półprzewodnikach w bardzo niskich temperaturach najwyższe zajęte przez elektrony pasmo jest całkowicie zapełnione, tak jak w izolatorach. Przerwa energetyczna oddzielająca to pasmo od pasma wyższego jest jednak dużo mniejsza niż w izolatorach (ryc. 28.6). W tych temperaturach półprzewodnik nie przewodzi prądu, bo w żadnym paśmie nie ma elektronów swobodnych.




**Ryc. 28.6.** Pasma energetyczne półprzewodnika

W wyższych temperaturach niektóre elektrony mogą uzyskać w zderzeniach zachodzących wewnątrz kryształu energię pozwalającą na przedostanie się do następnego pasma, gdyż przerwa między pasmami jest nieduża – wynosi ok. 1 eV*. Im wyższa temperatura, tym więcej elektronów uzyskuje energię pozwalającą na przejście do wyższego pasma (ryc. 28.7).




**Ryc. 28.7.** Niektóre elektrony w półprzewodniku przechodzą do wyższego pasma

Ciało z niewielką przerwą energetyczną między pasmem całkowicie wypełnionym elektronami a pasmem pustym jest **półprzewodnikiem**.

Elektrony, które znalazły się w wyższym paśmie, mogą tworzyć prąd, bo jest tam wiele wolnych poziomów. Jednak tych elektronów swobodnych jest dużo mniej niż w przewodnikach, dlatego też przewodzenie prądu w półprzewodnikach jest zdecydowanie mniej efektywne. Niektóre elektrony z niższego pasma również mogą tworzyć prąd, gdyż w wyniku przeskoków elektronów do wyższego pasma na niższym zwalniają się niektóre poziomy energetyczne. Mikroskopowo wygląda to tak, że elektrony, które przeszły do wyższego pasma, zostawiły po sobie „dziury" w wiązaniach między atomami. W te dziury mogą wskakiwać inne elektrony z tego samego pasma, w ten sposób przemieszczające się w krysztale. Im wyższa temperatura, tym więcej jest elektronów w wyższym paśmie i dziur w niższym. To jest właśnie przyczyną zmniejszania się oporu elektrycznego półprzewodników wraz ze wzrostem temperatury.

---

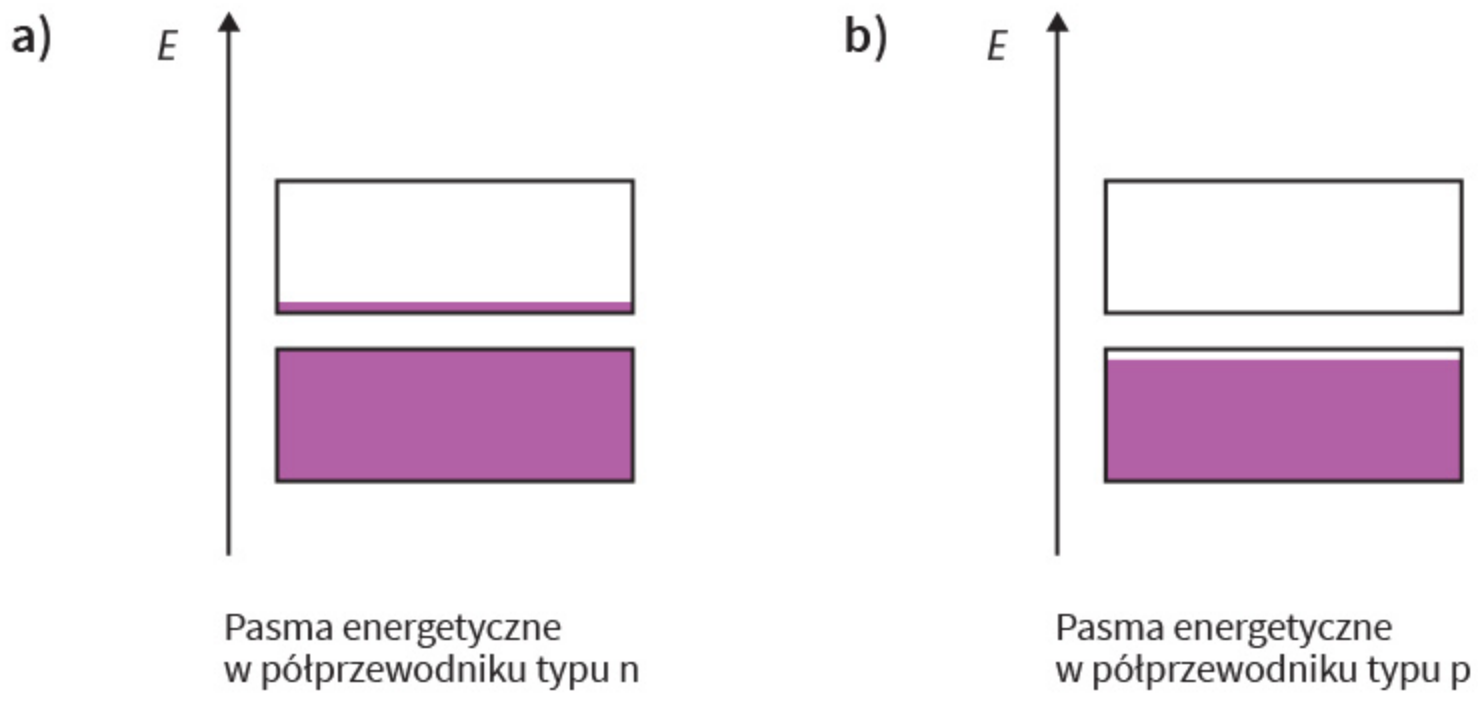
* Ze względu na właściwości elektryczne do półprzewodników zaliczamy także niektóre materiały z szeroką przerwą energetyczną, np. azotek galu, mający przerwę energetyczną 3,4 eV.

## WARTO WIEDZIEĆ

**Półprzewodniki typu p i typu n**

Stosunkowo łatwo można wytwarzać półprzewodniki o różnej zdolności przewodzenia przez wprowadzenie do nich domieszek, czyli atomów innego pierwiastka. Najczęściej domieszkowanym półprzewodnikiem jest krzem, mający cztery elektrony walencyjne. W strukturze krystalicznej krzemu każdy atom sąsiaduje z czterema innymi atomami, czyli wszystkie cztery elektrony walencyjne są użyte do wiązania atomu z jego sąsiadami. Co się stanie, gdy do krzemu dodamy np. pewną ilość fosforu, którego atomy mają po pięć elektronów walencyjnych? Piąty elektron atomu fosforu nie będzie brał udziału w wiązaniach, bo atom ma tylko czterech sąsiadów. Dodatkowe elektrony pochodzące od domieszek z łatwością przechodzą do wyższego pasma (ryc. a). Półprzewodnik na bazie krzemu, który ma więcej elektronów w wyższym paśmie niż czysty krzem, nazywamy półprzewodnikiem typu n.
W praktyce domieszkowanie robi się w ten sposób, że atomy domieszki dodaje się do stopionego półprzewodnika. Po zastygnięciu płynnej mieszaniny utworzy się kryształ, w którym w pewnych miejscach sieci zamiast atomu krzemu będzie atom fosforu. Elektronów w wyższym paśmie przybędzie tyle, ile atomów fosforu dodaliśmy do krzemu. Możemy zatem łatwo wytwarzać półprzewodniki o wymaganych parametrach.

Do krzemu możemy również dodać jako domieszkę np. glin, którego atom ma trzy elektrony walencyjne. Po utworzeniu sieci krystalicznej wokół każdego atomu glinu będzie puste, niewypełnione przez elektron miejsce, czyli dziura. W ten sposób powstanie półprzewodnik typu p, którego najwyższe pasmo z elektronami staje się częściowo puste (ryc. b), co umożliwia przepływ elektronów w postaci prądu. W częściowo wypełnionym paśmie będzie tyle niezajętych przez elektrony miejsc, ile atomów glinu znalazło się w krysztale krzemu.




Pasma energetyczne w półprzewodniku typu n

Pasma energetyczne w półprzewodniku typu p

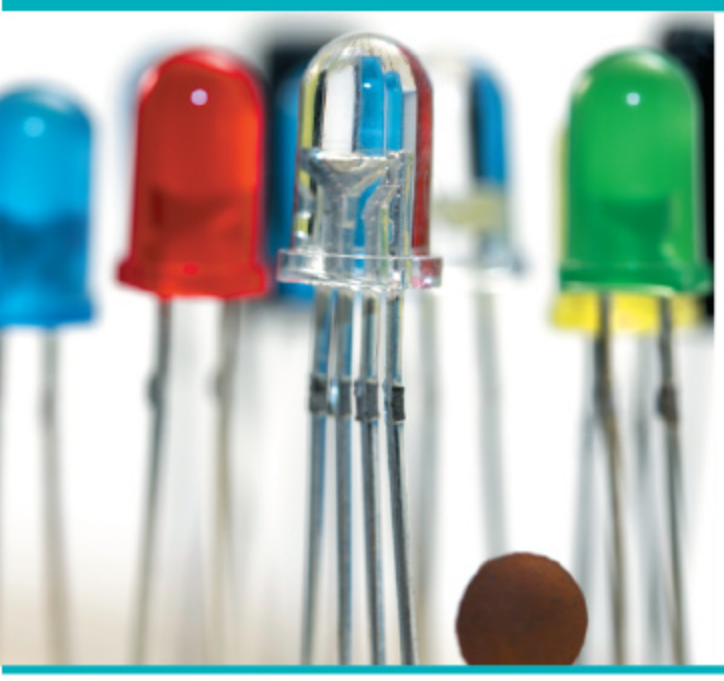
## PODSUMOWANIE

- Jeden poziom energetyczny mogą zajmować najwyżej dwa elektrony.
- W ciałach krystalicznych poziomy energetyczne grupują się w **pasma energetyczne**.
- W **izolatorach** najwyższe pasmo z elektronami jest całkowicie nimi wypełnione.

- W **półprzewodnikach** niektóre elektrony mogą przechodzić z całkowicie wypełnionego pasma do pustego wyższego pasma.
- W **przewodnikach** najwyższe pasmo z elektronami jest częściowo puste.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Ile poziomów energetycznych jest obsadzonych przez co najmniej jeden elektron w atomie tlenu i w atomie bromu?
2. W pewnym izolatorze, półprzewodniku i przewodniku najwyższa energia elektronów ma tę samą wartość. Narysuj obok siebie pasma energetyczne tych trzech substancji. W każdym przypadku zaznacz przerwę energetyczną.
3. German i krzem są półprzewodnikami tworzącymi podobne kryształy, przy czym przerwa energetyczna w germanie wynosi 0,67 eV, a w krzemie 1,11 eV. Który z nich lepiej przewodzi prąd w temperaturze pokojowej? Sformułuj hipotezę i ją uzasadnij.
4. W krysztale diamentu przerwa między pasmem całkowicie wypełnionym elektronami a pasmem pustym wynosi 5,5 eV. Czy diament jest przewodnikiem, półprzewodnikiem czy izolatorem? Uzasadnij odpowiedź.
5. Narysuj pasma półprzewodnika z ryciny 28.7 po umieszczeniu go w polu elektrycznym. Zaznacz, w którą stronę będą przemieszczały się elektrony w obu pasmach.

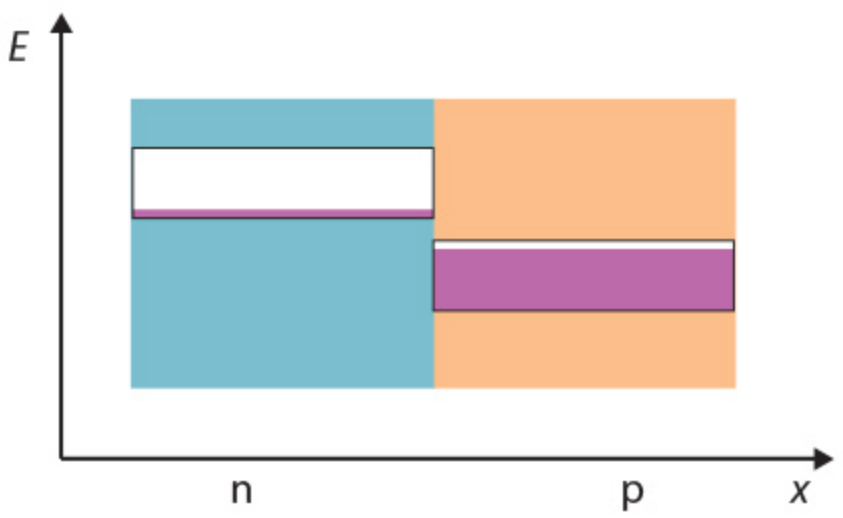


# 29. Dioda

- Dioda półprzewodnikowa
- Dioda świecąca
- Dioda jako prostownik

➔ **Przypomnij sobie** mechanizm przewodzenia prądu przez półprzewodniki.

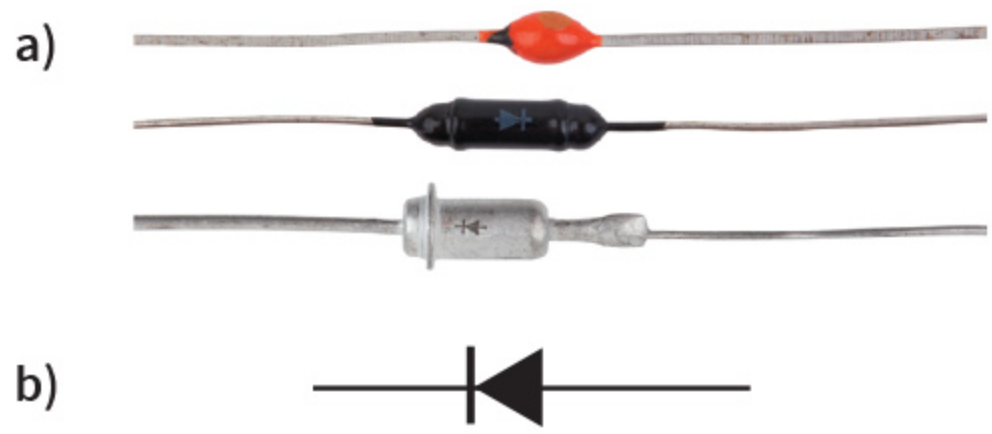
Półprzewodniki są podstawą całej współczesnej technologii opartej na elektronice. Dzięki ich właściwościom możliwa stała się miniaturyzacja wielu urządzeń – bez nich nie istniałyby smartfony, laptopy i wiele innych obiektów, bez których nie wyobrażamy sobie życia.




**Ryc. 29.1.** Schemat poziomów energetycznych wypełnionych elektronami (kolor fioletowy) w diodzie półprzewodnikowej

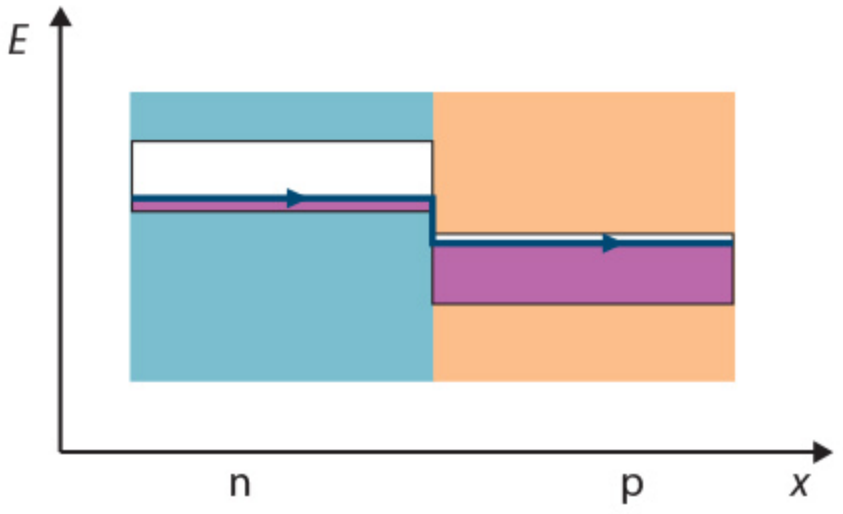
## Dioda półprzewodnikowa

Szczególnie duże zastosowanie w elektronice znalazło trwałe połączenie takich dwóch półprzewodników, w których elektrony swobodne mają różne energie. W jednym z nich, w tzw. półprzewodniku typu n, poziomy energetyczne elektronów leżą wyżej, a w drugim – typu p – niżej (ryc. 29.1). Takie złącze tworzy **diodę półprzewodnikową** (ryc. 29.2).




**Ryc. 29.2. a)** Diody półprzewodnikowe stosowane w obwodach elektrycznych; **b)** symbol diody

Gdy do diody przyłożymy napięcie, tak że pole elektryczne spowoduje przemieszczanie elektronów ze strefy n do p, powstanie prąd. W miejscu styku obu półprzewodników elektrony będą „spadały” na niższe poziomy w strefie p (ryc. 29.3).



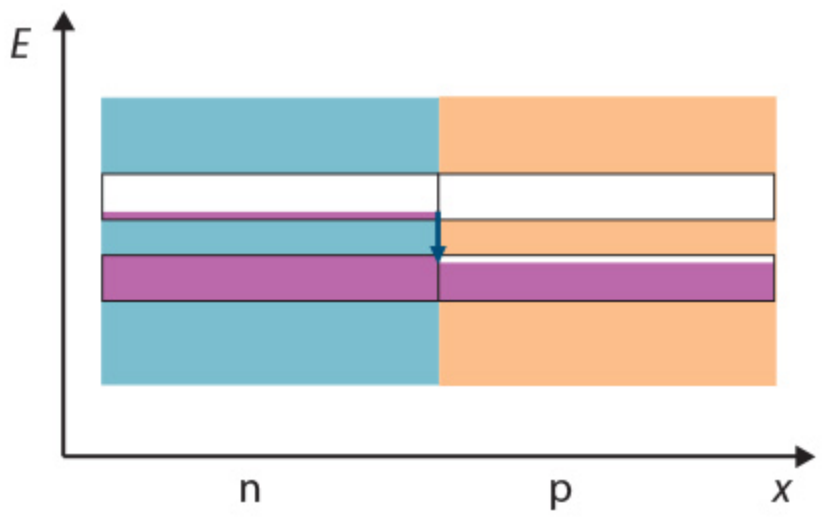

**Ryc. 29.3.** Kierunek ruchu elektronów tworzących prąd w diodzie

Prąd w diodzie może płynąć tylko w jedną stronę. Gdy przyłożymy do diody pole elektryczne „pchające” elektrony w przeciwną stronę, ze strefy p do n, nie przeskoczą one na wyższe poziomy, gdyż nie mają wystarczającej energii. Prąd nie będzie płynął przez diodę.

## WARTO WIEDZIEĆ

**Złącze p-n**

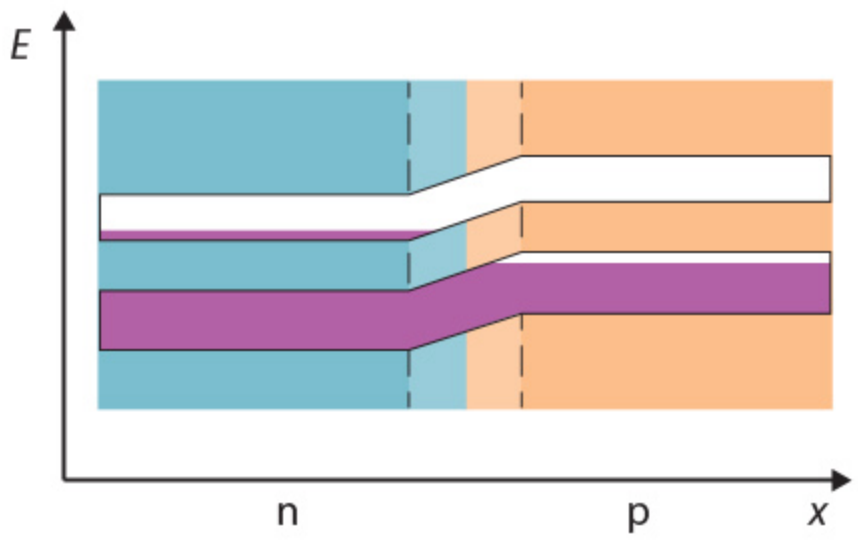
Trwałe połączenie półprzewodników n i p nazywamy złączem p-n. W miejscu ich styku elektrony zaczynają spadać na niższy poziom w półprzewodniku typu p (ryc. 1). To powoduje, że leżąca przy styku warstwa półprzewodnika typu p uzyskuje nadmiarowy ładunek ujemny, a warstwa typu n – ładunek dodatni (ryc. 2).




**Ryc. 1.** Pasma w momencie złączenia półprzewodników typu p i n

**Ryc. 2.** Rozdział ładunków w strefie przejściowej złącza p-n

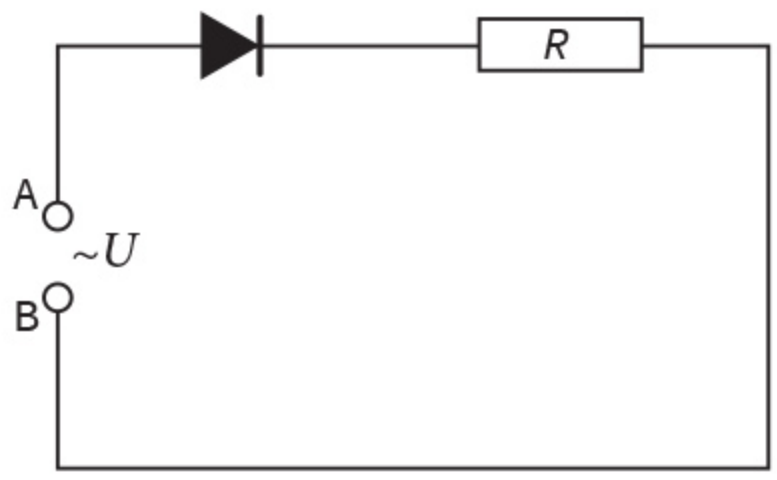
Ładunki te wytwarzają pole elektryczne utrudniające przejście kolejnych elektronów do półprzewodnika typu p, więc każdy kolejny elektron, by przejść z warstwy n do warstwy p, musi mieć dodatkową energię, potrzebną do przezwyciężenia elektrycznego odpychania. Oznacza to podniesienie pasm w półprzewodniku typu p właśnie o tę dodatkową energię (ryc. 3).




**Ryc. 3.** Pasma w złączu p-n

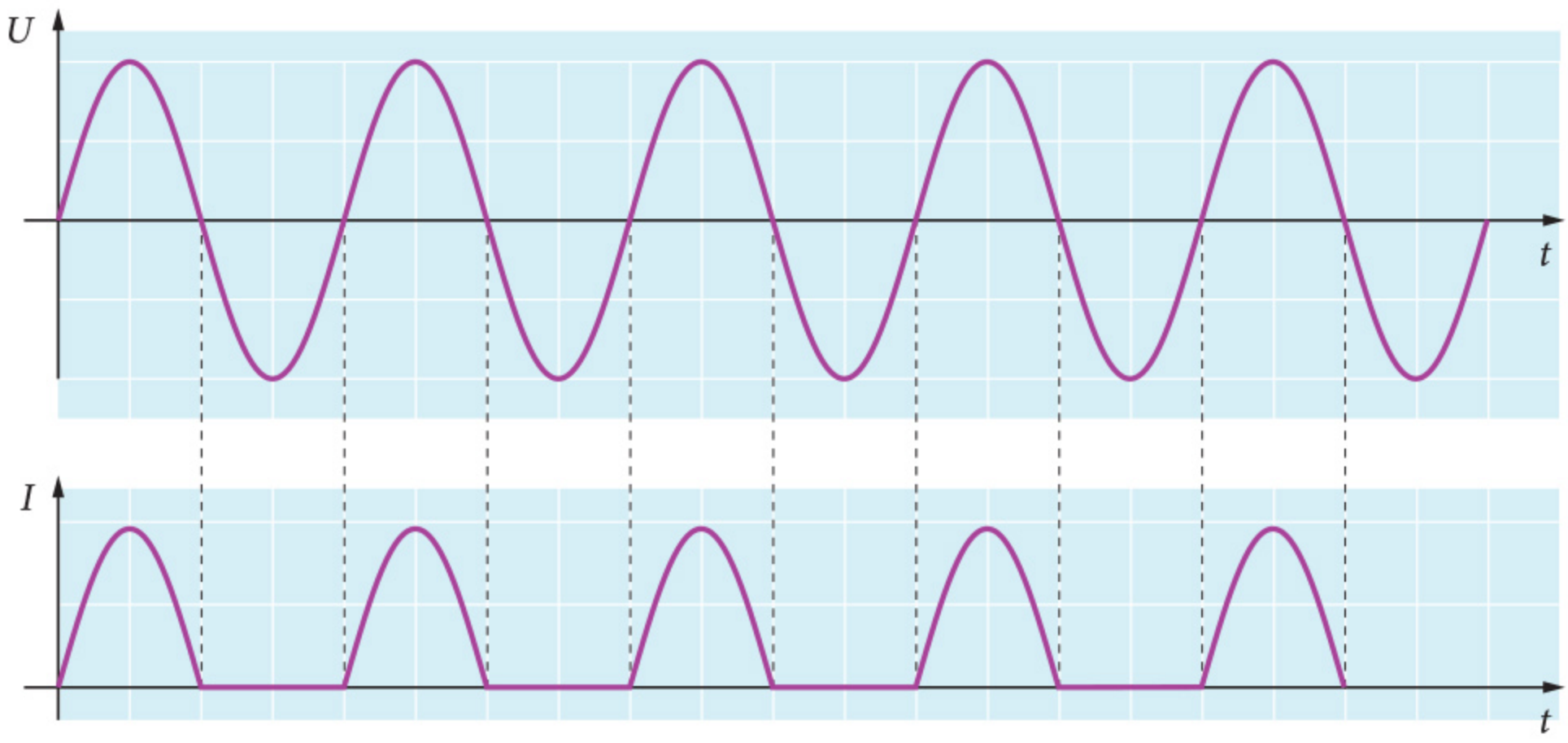
Jedyna możliwość przepływu elektronów przez złącze jest związana ze zmianą pasma. Jednak aby spaść na niższe pasmo, elektrony muszą trochę się przemieścić (w prawo na ryc. 3). Dlatego złącze p-n przewodzi prąd dopiero po przekroczeniu pewnego napięcia progowego (zwykle poniżej 1 V), które wystarczająco przesunie elektrony.

Dioda przewodzi prąd tylko w jedną stronę.




**Ryc. 29.4.** W obwodzie z diodą prąd płynie tylko w jedną stronę, w tym przypadku zgodnie ze wskazówkami zegara

W obwodach z diodą prąd może płynąć tylko w jedną stronę. Dotyczy to również obwodów zasilanych źródłem napięcia przemiennego. Na zaciskach takiego źródła wciąż zmienia się biegunowość, więc prąd w obwodzie przedstawionym na rycinie 29.4 będzie płynął tylko wtedy, gdy „plus" będzie na zacisku A źródła. Gdy zmieni się biegunowość źródła, dioda uniemożliwi przepływ prądu. W takim obwodzie napięcie na źródle i natężenie prądu zmienia się wraz z upływem czasu tak, jak przedstawiono na rycinie 29.5.




**Ryc. 29.5.** Napięcie na źródle zasilania i natężenie prądu w obwodzie z diodą w zależności od czasu

Diody są podstawowym elementem **prostowników** (ryc. 29.6). Prostowniki to urządzenia zasilane napięciem przemiennym, które wytwarzają w obwodzie prąd płynący tylko w jedną stronę (scenariusz doświadczenia 5, s. 344). Prostowniki znajdują się m.in. w urządzeniach elektronicznych zasilanych z sieci energetycznej.

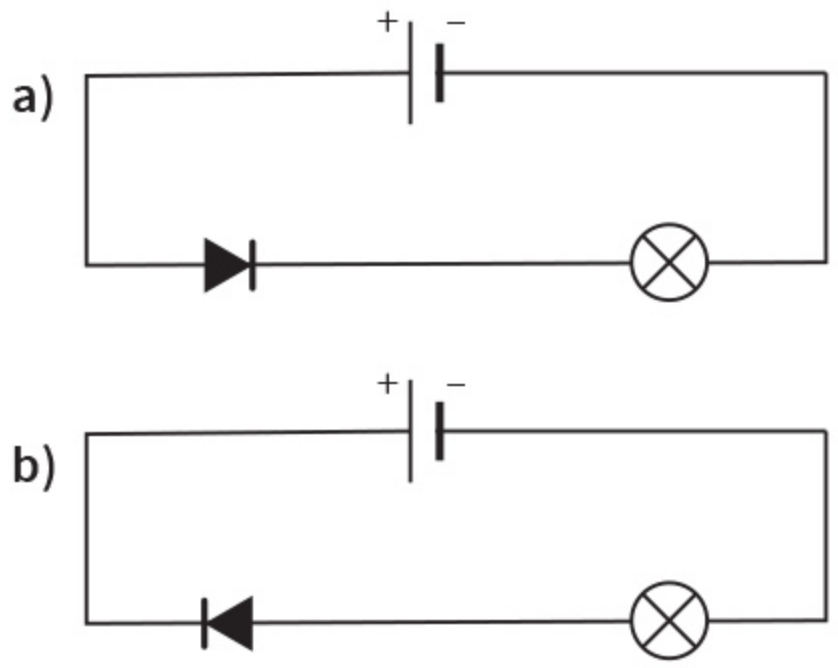
s. 344

**Ryc. 29.6.** Dioda stosowana w prostownikach

**DOŚWIADCZENIE 1.**

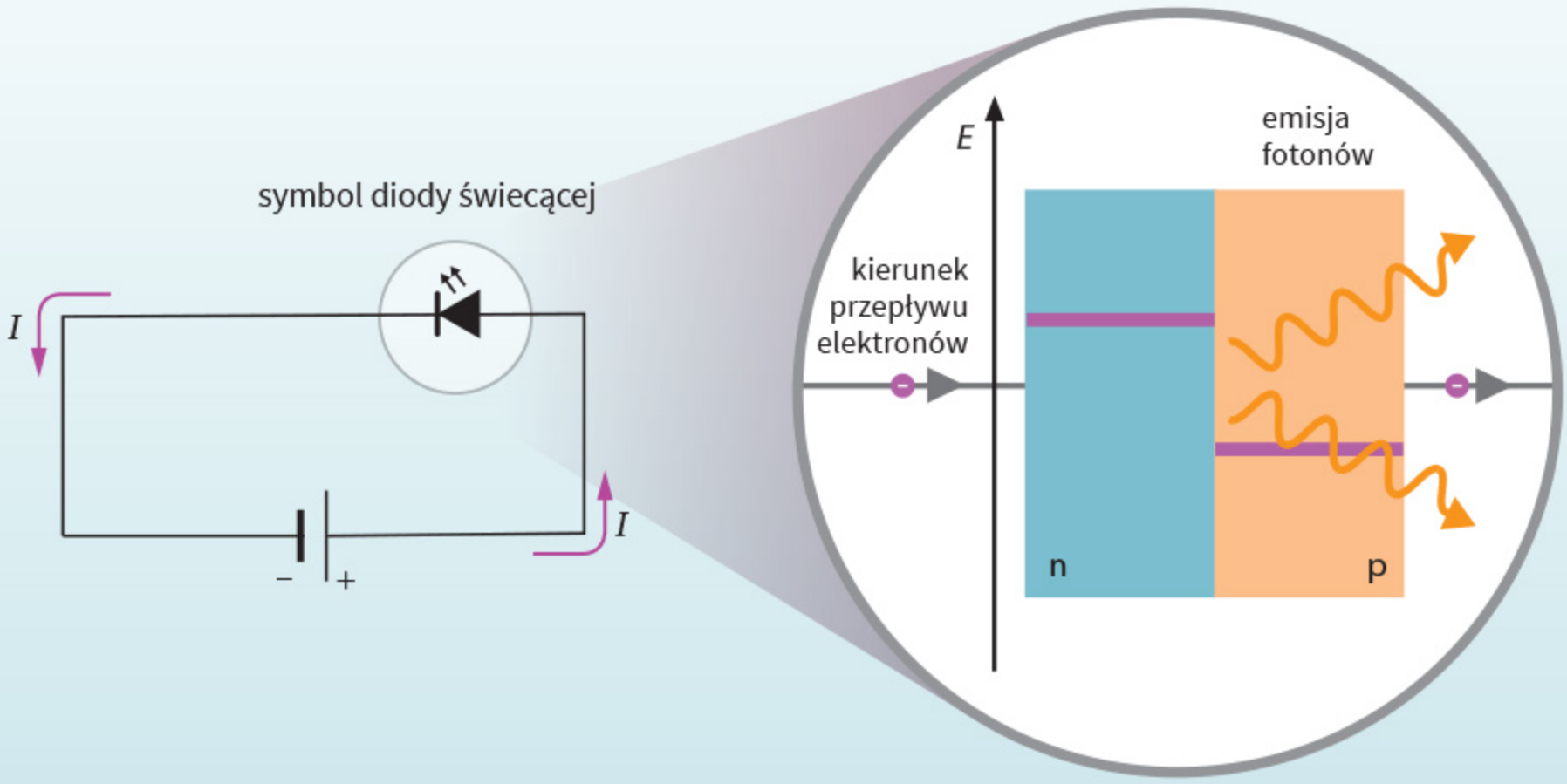
Do doświadczenia potrzebne będą: bateria płaska, dioda prostownicza o małej mocy (do kupienia w sklepie z częściami elektronicznymi) oraz tradycyjna żarówka do latarki.

1. Podłącz diodę i żarówkę do baterii, tak jak przedstawiono to na schemacie a. Czy żarówka świeci?
2. Podłącz diodę odwrotnie, tak jak przedstawiono to na schemacie b. Czy teraz żarówka świeci?




## Dioda świecąca (LED)

Gdy przez diodę półprzewodnikową płyną elektrony, zmniejszają swoją energię podczas spadania z wyższego poziomu na niższy (ryc. 29.3). Z zasady zachowania energii wynika, że traconą podczas tego przejścia energię powinny przekazać innym cząstkom. Mogą ją przekazać atomom i w ten sposób zwiększyć ich drgania, ale mogą również wyemitować fotony. To taki sam mechanizm emisji fotonu jak w atomie, gdy elektron emituje foton podczas przejścia na niższy poziom energetyczny. Takie zjawisko zachodzi w niektórych półprzewodnikach i możemy wykorzystać je do skonstruowania diody świecącej, czyli LED (**L**ight **E**mitting **D**iode, ryc. 29.7).

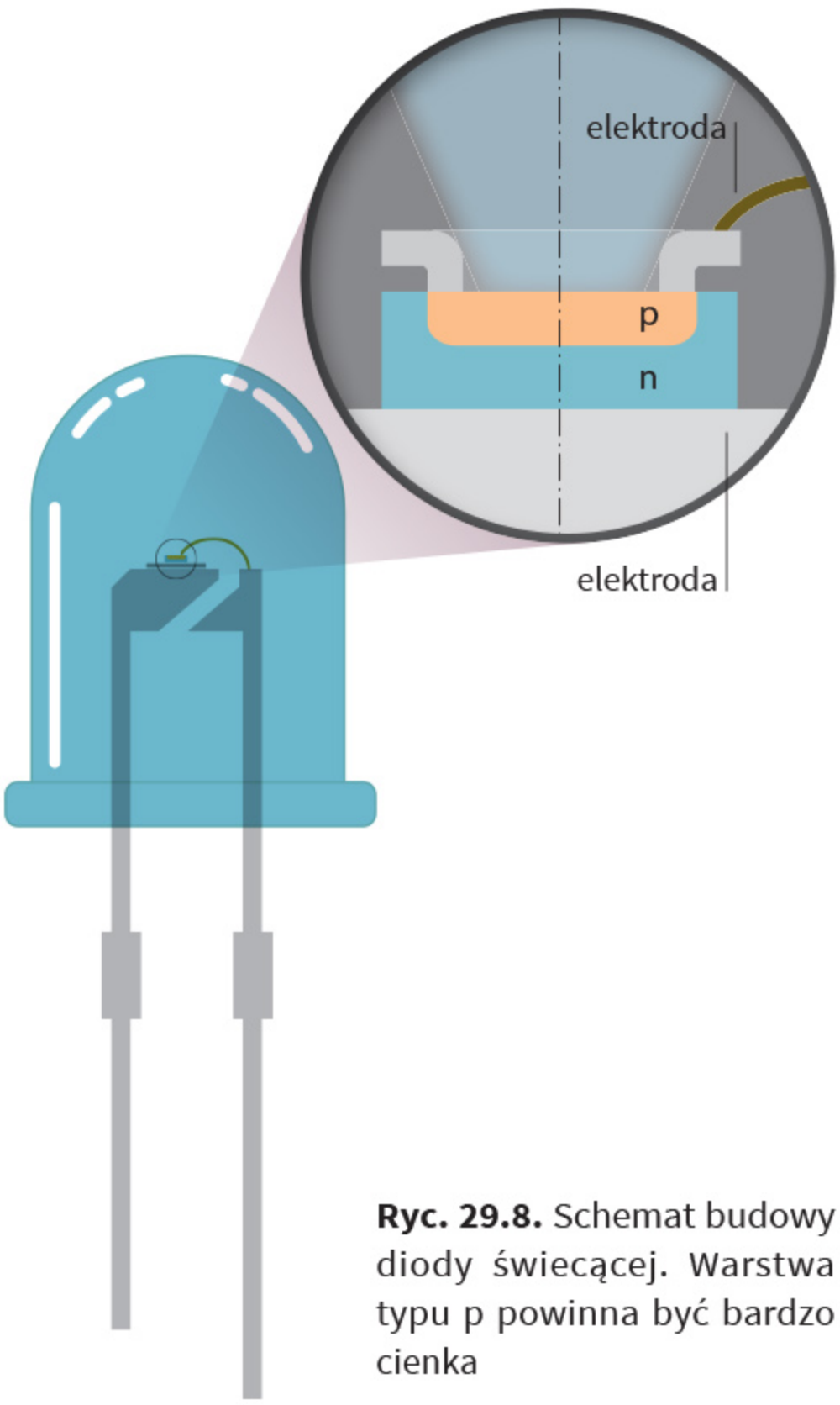



**Ryc. 29.7.** Dioda świecąca w obwodzie i schemat jej działania

**DOŚWIADCZENIE 2.**

Do doświadczenia potrzebne będą bateria płaska i dioda świecąca (do kupienia w sklepie z częściami elektronicznymi).

Podłącz diodę krótszą nóżką do bieguna ujemnego baterii, a dłuższą do bieguna dodatniego. Czy dioda świeci? Następnie podłącz ją odwrotnie. Czy teraz świeci?

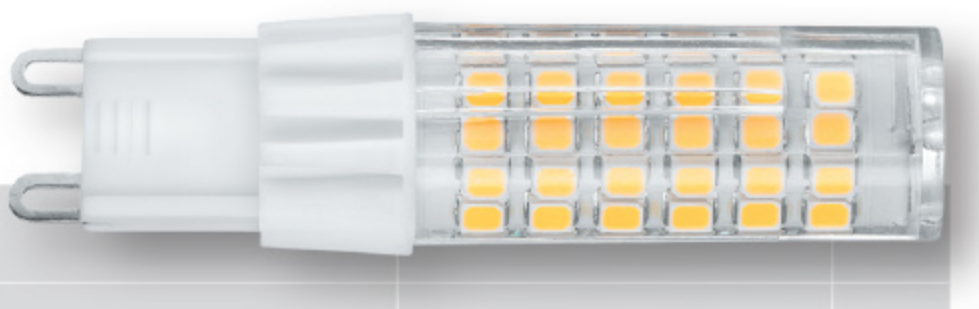


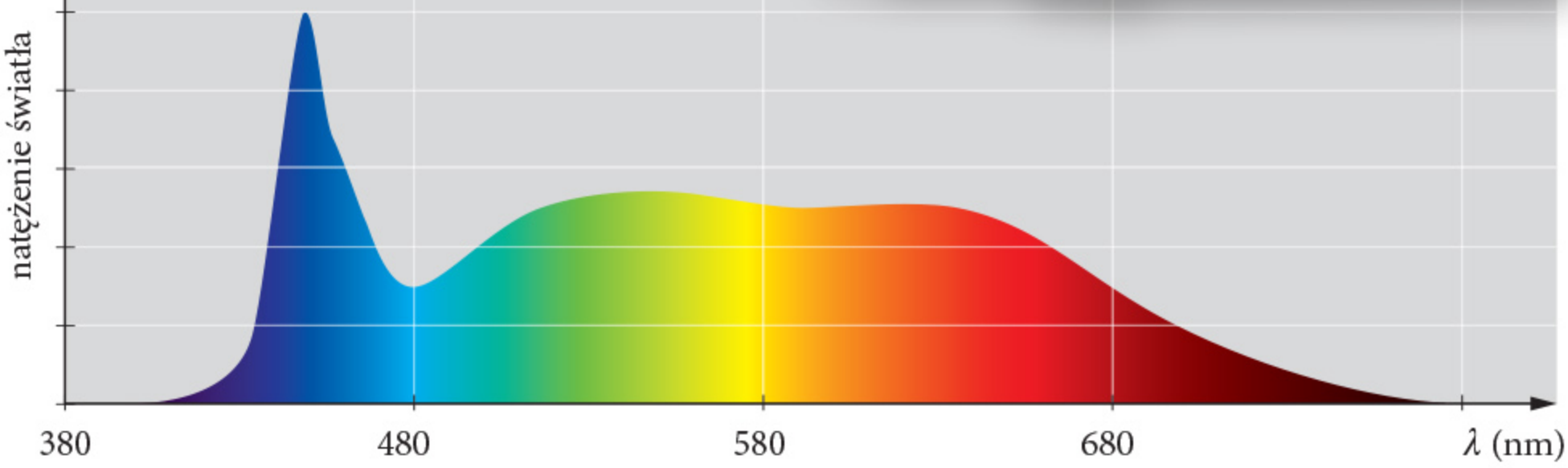

**Ryc. 29.8.** Schemat budowy diody świecącej. Warstwa typu p powinna być bardzo cienka

W diodzie świecącej warstwa typu p powinna być bardzo cienka i zarazem stanowić zewnętrzną część diody, gdyż w innym przypadku emitowane fotony byłyby szybko pochłaniane w krysztale półprzewodnika i nie wydostawałyby się na zewnątrz (ryc. 29.8).

Dioda taka jak przedstawiona na rycinie 29.8 emituje światło tylko jednej barwy, gdyż różnica energii między poziomami energetycznymi półprzewodników tworzących diodę jest ściśle określona, a to od niej zależy energia emitowanych fotonów. Okazuje się jednak, że lampy LED, których używamy do oświetlania mieszkań, mają widmo prawie ciągłe, choć wykorzystuje się w nich diody emitujące światło fioletowoniebieskie. Jak to możliwe? Obudowa tych lamp nie jest przezroczysta, lecz pokryta luminoforem, czyli związkiem chemicznym, który pochłania wysokoenergetyczne fotony światła emitowanego przez diodę, a następnie emituje inne fotony, mające już mniejszą energię (ryc. 29.9).

**Ryc. 29.9.** Lampa LED i jej widmo





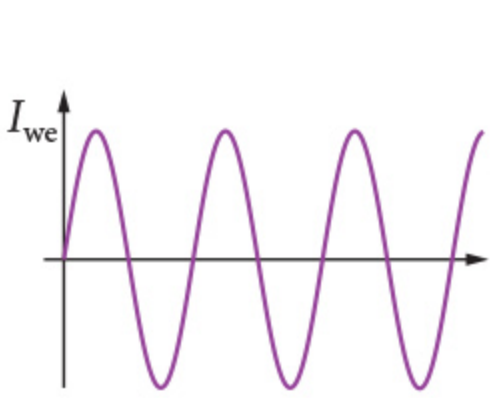
Diody świecące stają się coraz bardziej powszechnym źródłem światła stosowanym w domach, samochodach i lampach ulicznych. Z kolei gdy wciskamy przycisk pilota do telewizora, włączamy prąd w diodzie, która emituje podczerwień. Impulsy podczerwieni są rejestrowane przez czujnik w obwodzie telewizora, uruchamiający określone funkcje.

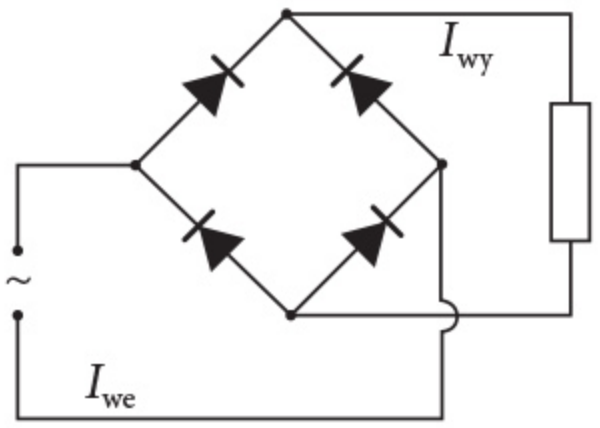
## PODSUMOWANIE

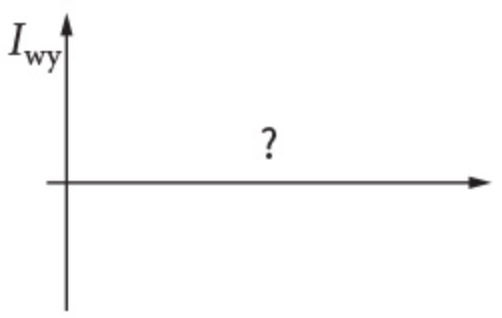
- **Dioda** to złącze dwóch półprzewodników, w których elektrony swobodne mają różne energie.
- Dioda przewodzi prąd tylko w jedną stronę.
- Niektóre diody mogą emitować światło podczas przepływu prądu.

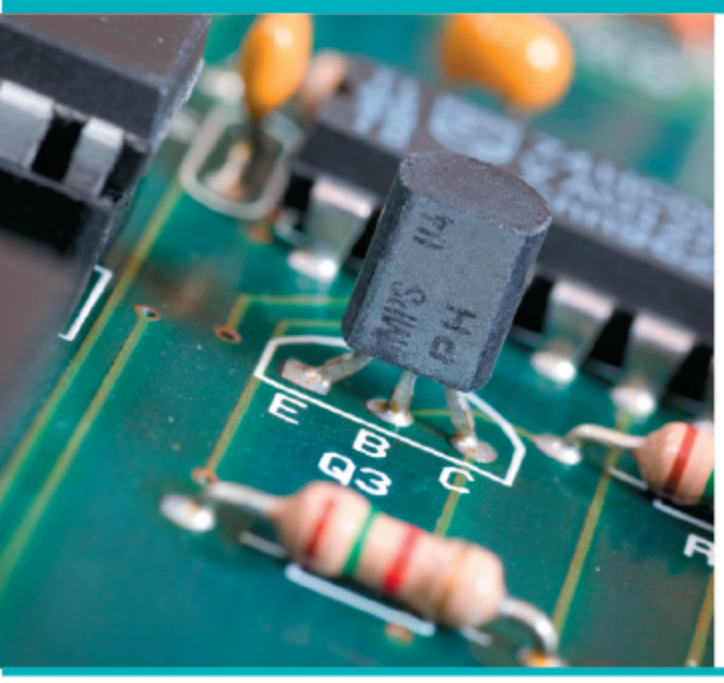
## PYTANIA I ZADANIA

1. W jaką energię zmienia się energia elektronów przechodzących w diodzie półprzewodnikowej na niższy poziom, jeśli nie emitują one fotonów?
2. Dioda świecąca podłączona do napięcia 2,5 V emituje światło o długości fali 660 nm. Czy długość fali emitowanego światła się zmieni, gdy podłączymy tę diodę do 4,5 V? Uzasadnij odpowiedź.
3. Dlaczego do budowy lamp LED emitujących światło białe używa się diod świecących na niebiesko, a nie używa się diod świecących na czerwono lub zielono?
4. Pewna dioda emituje światło o długości fali 440 nm. Każdy foton emitowany przez tę diodę jest pochłaniany przez luminofor, który następnie całą pochłoniętą energię emituje w postaci dwóch fotonów. Zaproponuj podział tej energii na dwa fotony tak, by przynajmniej jeden był w zakresie światła. Jaka jest energia każdego z tych fotonów? Czy obydwa fotony mogą być w zakresie światła?
5. Rysunek przedstawia prostownik skonstruowany z czterech diod. Narysuj wykres zależności natężenia prądu wypływającego z tego prostownika od czasu. Wskazówka: prześledź kierunek prądu płynącego przez odbiornik przy obu kierunkach prądu wejściowego.



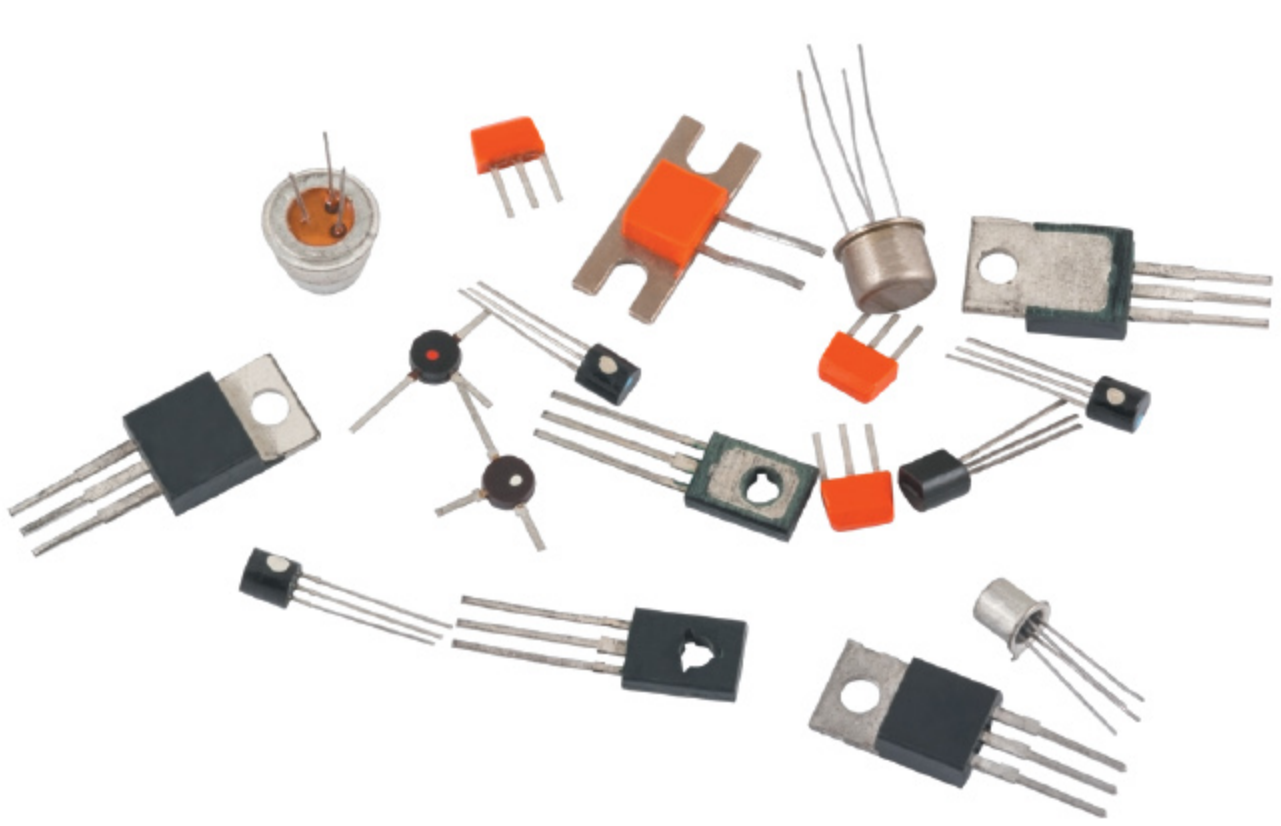


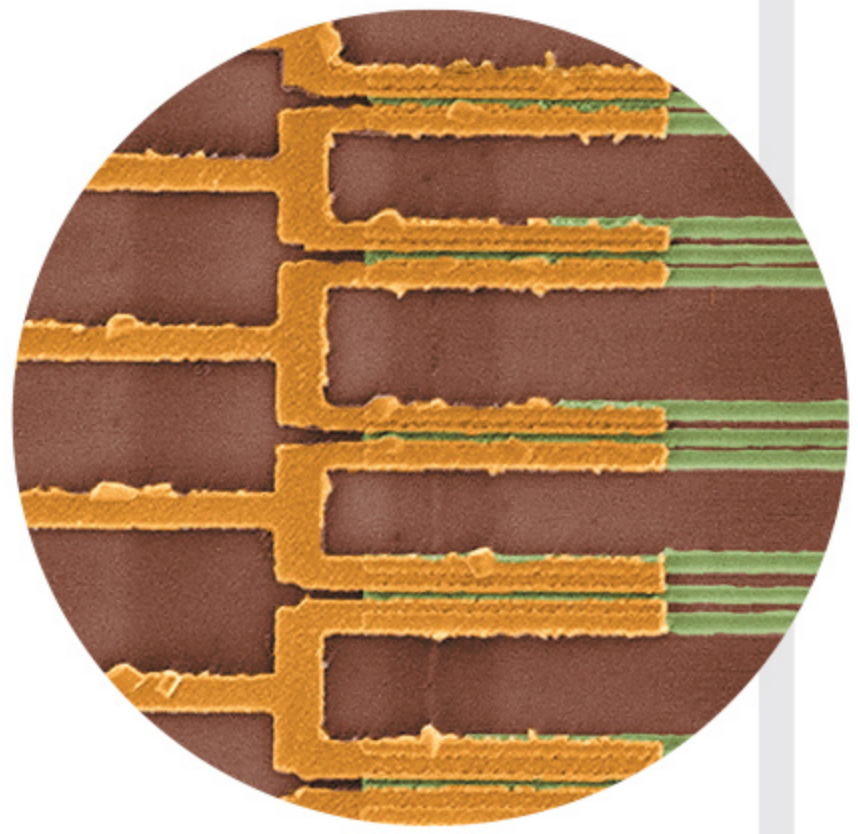

# 30. Tranzystor

- Budowa tranzystora polowego
- Działanie tranzystora
- Zastosowanie tranzystorów

➔ **Przypomnij sobie** wiadomości o półprzewodnikach, budowę i zasadę działania diody półprzewodnikowej oraz warunki przepływu prądu elektrycznego.

Wynalezienie tranzystora stało się impulsem do miniaturyzacji urządzeń elektronicznych. W latach sześćdziesiątych XX wieku pojawiły się radioodbiorniki, które można było nosić ze sobą, a dziś trudno wyobrazić sobie życie bez smartfona z bezprzewodowym dostępem do internetu.





**Ryc. 30.1.** Różne tranzystory; niektóre są tak małe, że można je zobaczyć tylko pod mikroskopem

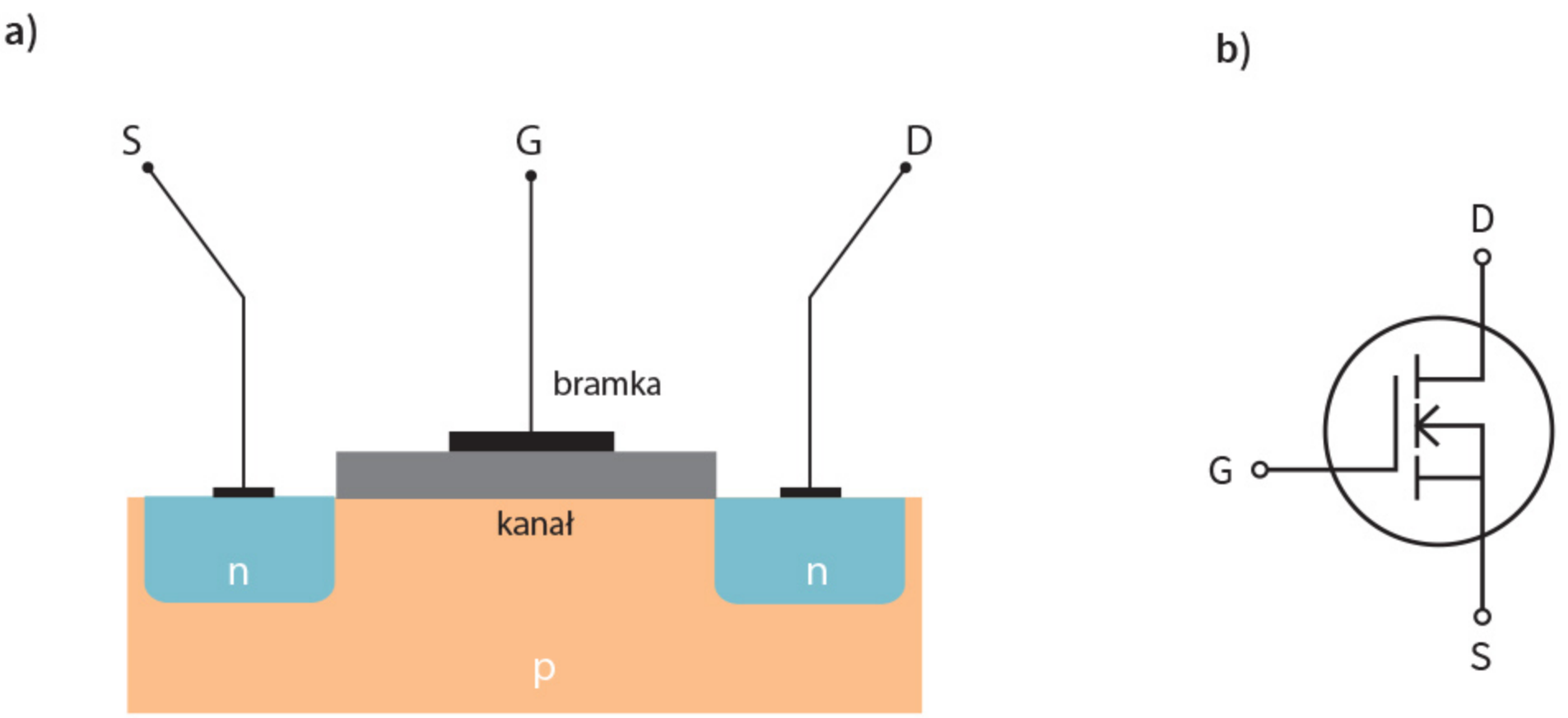
## Podstawowa funkcja tranzystora

**Tranzystor** to półprzewodnikowy element elektroniczny, który umożliwia sterowanie prądem elektrycznym płynącym w obwodzie bez potrzeby bezpośredniego rozłączania i łączenia przewodów. Za jego pomocą można otwierać lub zamykać obwód elektryczny, regulować natężenie prądu w obwodzie lub sterować układami logicznymi będącymi podstawą działania komputerów. Tranzystory umożliwiają osiąganie niewyobrażalnej szybkości zmian sygnałów elektrycznych (miliardy w ciągu sekundy) w obwodach sterowanych za ich pomocą. Przez kilkadziesiąt lat, które upłynęły od ich skonstruowania,

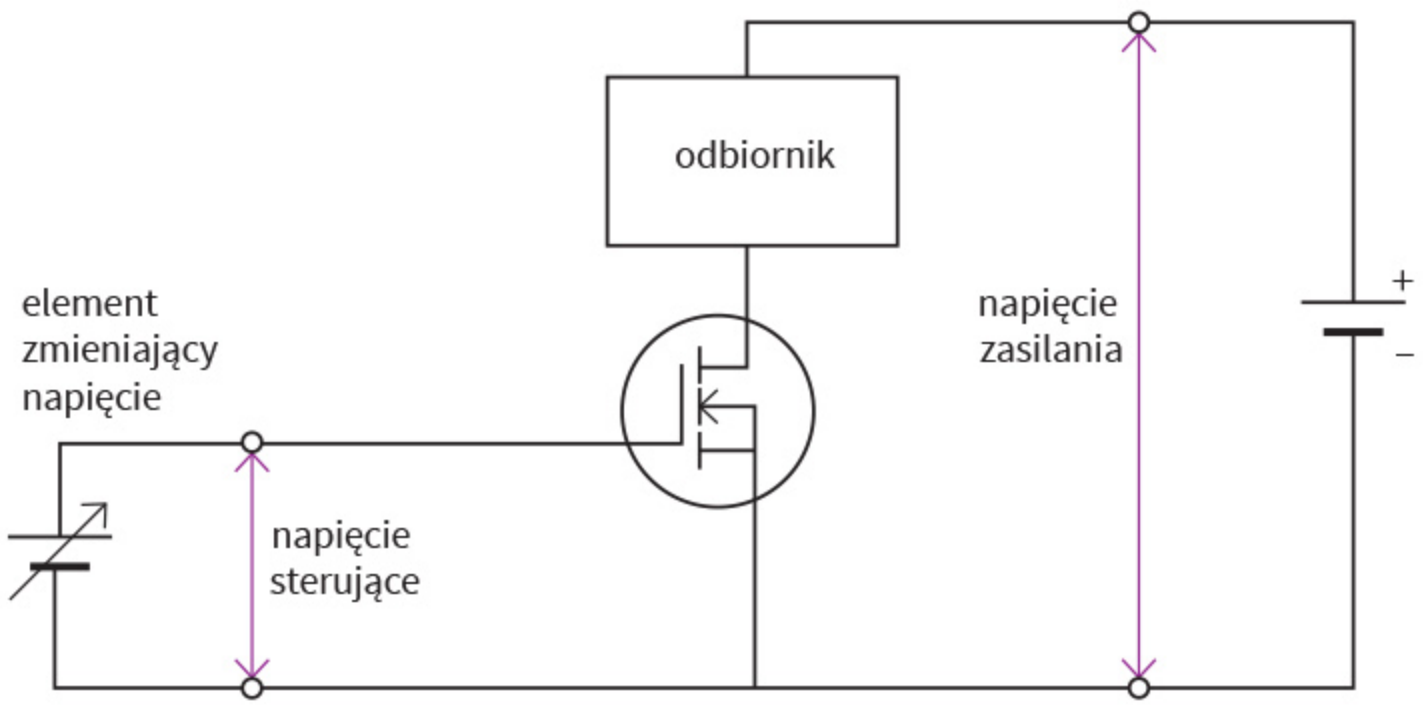
powstało wiele odmian tych urządzeń oraz urządzeń pełniących podobne funkcje (np. tyrystory, triaki).

## Budowa tranzystora

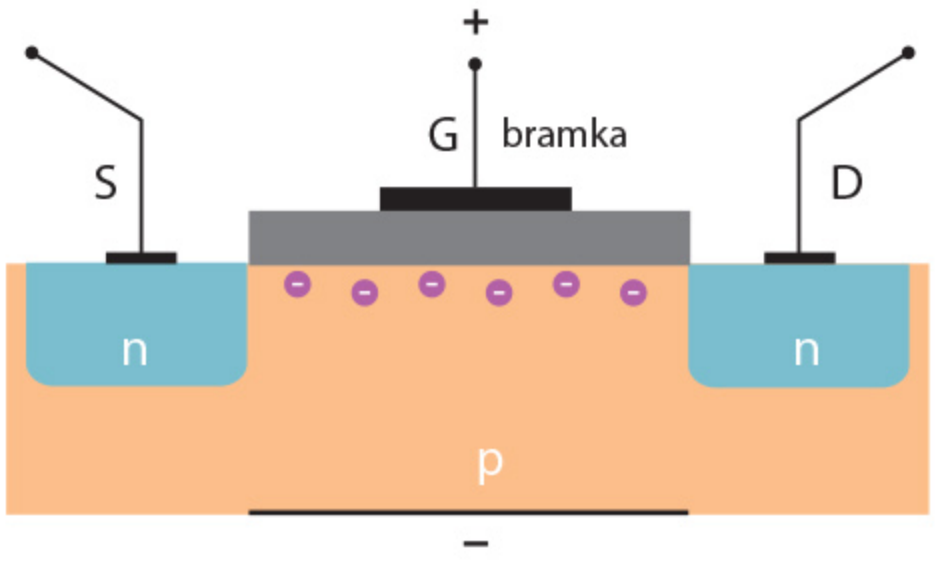
Działanie tranzystora omówimy dokładniej na przykładzie tzw. **tranzystora polowego** (MOSFET). Na podłoże z półprzewodnika typu p w dwóch miejscach nałożony jest półprzewodnik typu n. Część tranzystora znajdująca się między tymi obszarami nazywa się kanałem (ryc. 30.2). Kanał pokryty jest cienką warstwą izolatora, do którego przylega elektroda zwana bramką (oznaczona na ryc. 30.2 literą G). Dwie pozostałe elektrody (oznaczone S i D) służą do wpięcia tranzystora w obwód elektryczny, w którym chcemy kontrolować przepływ prądu. Do bramki przykładany jest sygnał sterujący (ryc. 30.3).




**Ryc. 30.2. a)** Przekrój tranzystora polowego; **b)** symbol tego typu tranzystora




**Ryc. 30.3.** Podłączenie tranzystora umożliwiające sterowanie prądem płynącym przez odbiornik energii elektrycznej

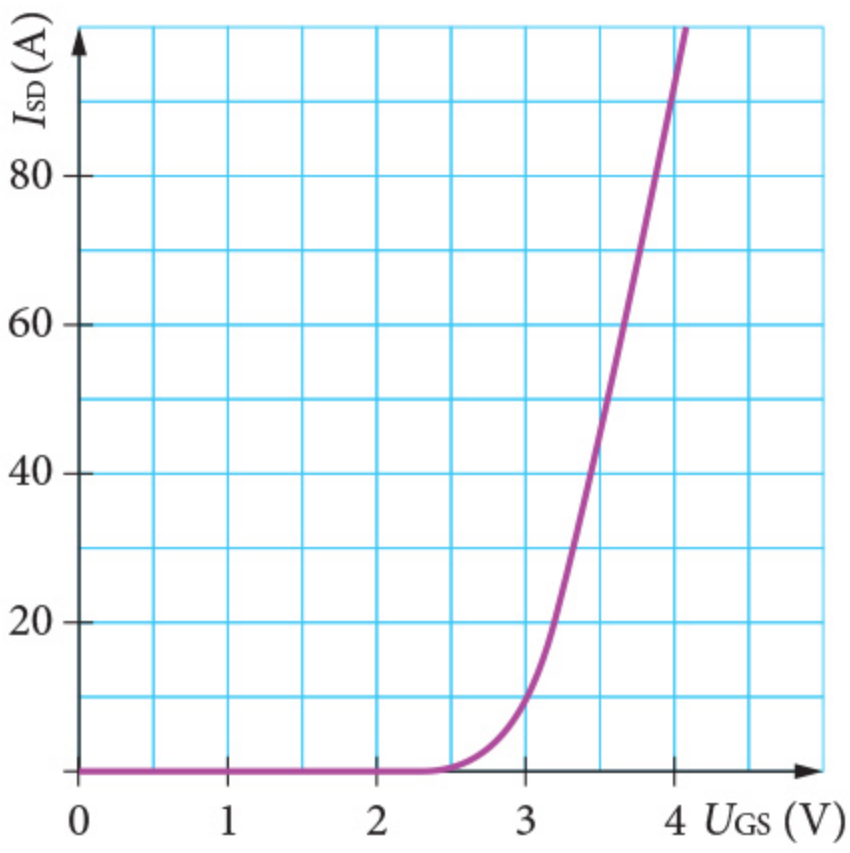



**Ryc. 30.4.** Bramka tranzystora podłączona do „+" napięcia sterującego przyciąga do kanału elektrony, które mogą tworzyć prąd elektryczny

## Działanie tranzystora

Tranzystor stanowi układ dwóch złączy p-n. Elektrony w obszarze typu p mają za małą energię, aby przejść do obszaru typu n. Prąd między elektrodami S i D nie może płynąć w żadną stronę.

Sytuacja zmieni się, gdy między bramką i kanałem przyłożymy napięcie tak, że „+" będzie na bramce. Powstanie pole elektryczne, które będzie przyciągać do kanału elektrony z pozostałych obszarów (ryc. 30.4). Te elektrony mogą tworzyć prąd elektryczny między elektrodami S i D. Poprzez zmianę napięcia między kanałem a bramką (tzw. napięcie sterujące) można regulować liczbę elektronów swobodnych w kanale. W ten sposób można zmieniać natężenie prądu płynącego przez tranzystor (ryc. 30.5).




**Ryc. 30.5.** Zależność natężenia prądu płynącego przez tranzystor SiR826ADP od napięcia sterującego (między bramką a kanałem)

**PRZYKŁAD 1.**

Tranzystor SiR826ADP połączono szeregowo z elektryczną nagrzewnicą (element instalacji ogrzewania w samochodzie elektrycznym) w sposób analogiczny do przedstawionego na rycinie 30.3 i podłączono do źródła napięcia 48 V. Na podstawie wykresu na rycinie 30.5 wyznaczmy napięcie, jakie należy ustawić między bramką a kanałem, aby moc nagrzewnicy wynosiła 2400 W.

Natężenie prądu płynącego przez nagrzewnicę obliczamy z przekształconego wzoru na moc:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2400\ \text{W}}{48\ \text{V}} = 50\ \text{A}$$

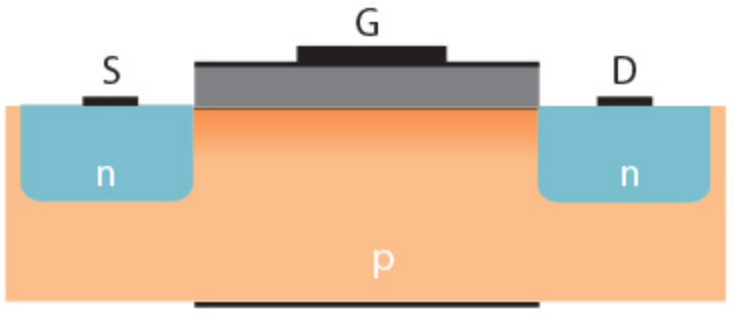
Tranzystor jest połączony z nagrzewnicą szeregowo, zatem natężenie prądu płynącego przez niego również będzie wynosiło 50 A. Z wykresu na rycinie 30.5 odczytujemy, że prąd o takim natężeniu płynie przez tranzystor, gdy napięcie sterujące wynosi ok. 3,5 V.

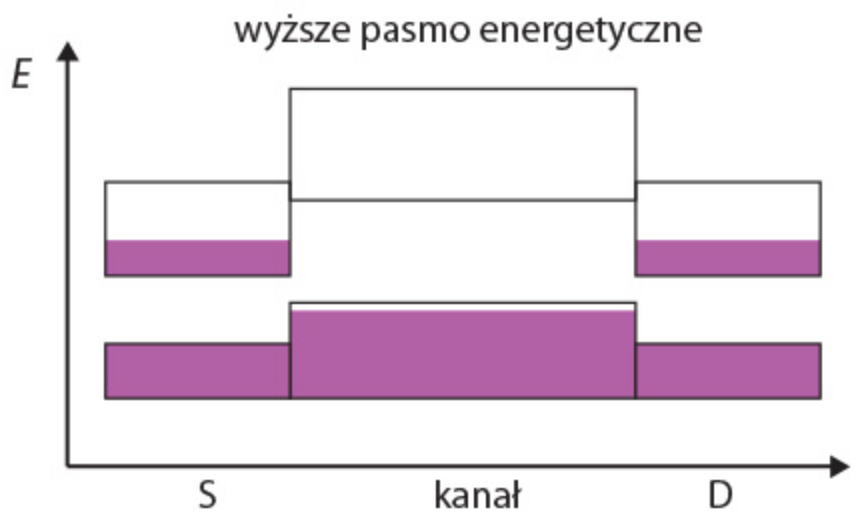
## WARTO WIEDZIEĆ

**Model pasmowy tranzystora**

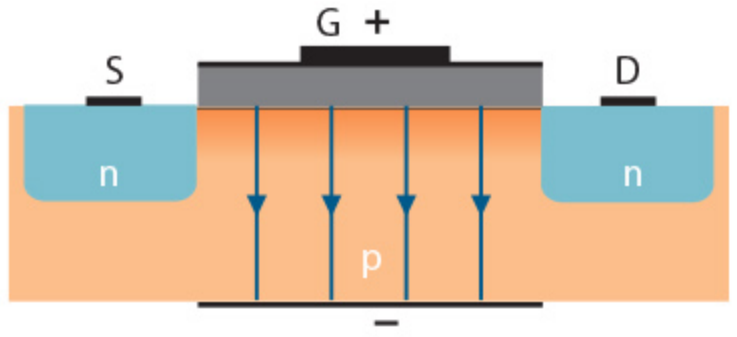
Energia elektryczna elektronów rośnie, gdy są przesuwane zgodnie ze zwrotem linii pola, a maleje, gdy są przesuwane w kierunku przeciwnym. Na tym opiera się sterowanie prądem płynącym przez tranzystor polowy.

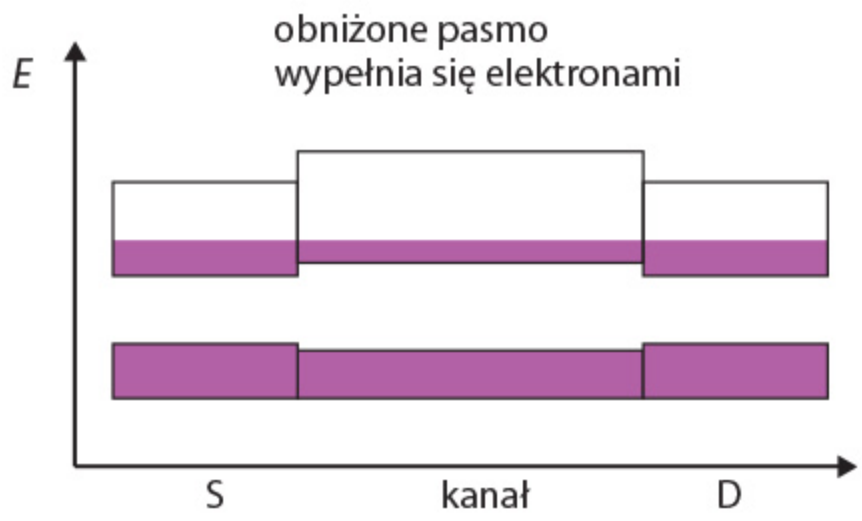
Gdy nie ma napięcia między bramką a kanałem, energia elektronów swobodnych w kanale tranzystora jest niższa niż w elektrodach S i D (ryc. 1).




**Ryc. 1.**




**Ryc. 2.**

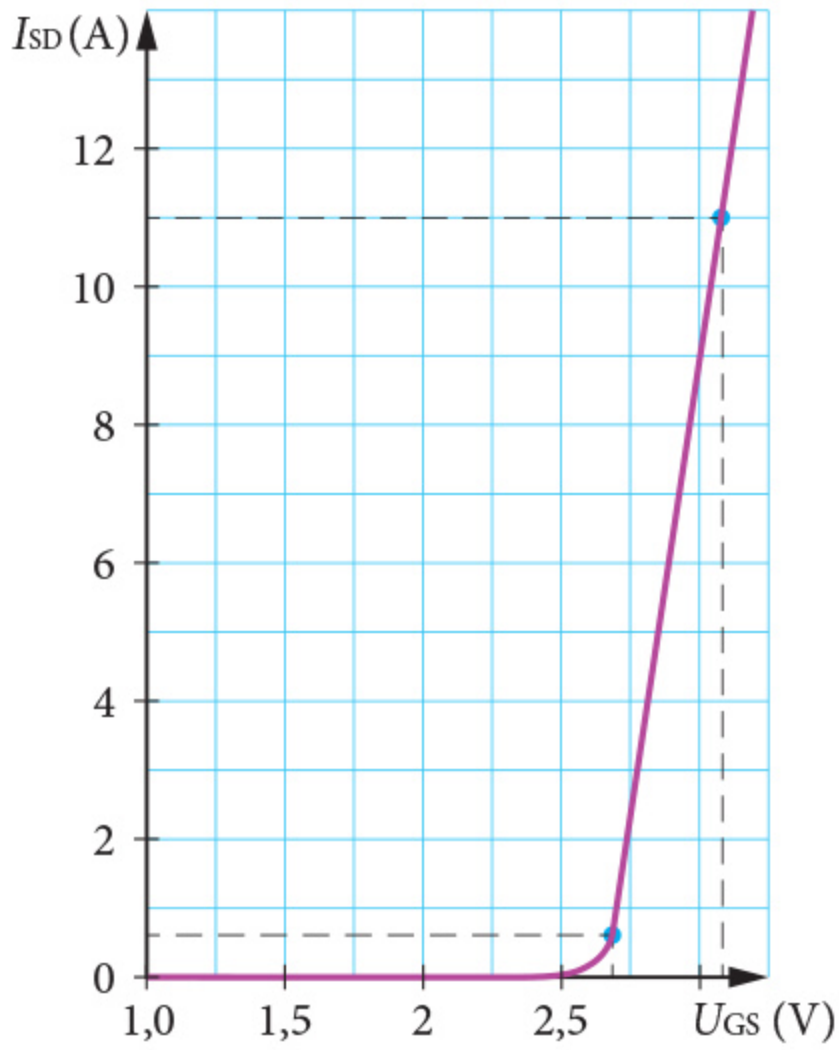
Przyłożenie napięcia sterującego powoduje, że w kanale powstaje pole elektryczne, (ryc. 2). To skutkuje obniżeniem się pasm energetycznych kanału w pobliżu bramki. Mniejszą energię ma wówczas zarówno pasmo dotychczas wypełnione elektronami, jak i pasmo powyżej niego, które wcześniej było puste. To wyższe pasmo staje się teraz dostępne dla elektronów elektrod S i D (półprzewodniki typu n) i w kanale może płynąć prąd.

## Zastosowanie tranzystorów

Tranzystory znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach naszego życia. Są one m.in. głównym elementem wzmacniaczy akustycznych. Słaby sygnał elektryczny obecny na wyjściu gniazda słuchawkowego w smartfonach wystarcza do działania miniaturowych głośników w słuchawkach, ale jest zbyt słaby, aby zapewnić nagłośnienie dużej sali czy stadionu. Dzięki wzmacniaczom można uzyskać prąd o znacznie większej mocy – trzeba tylko podłączyć gniazdo słuchawek do bramki tranzystora, który umożliwi przepływ przez głośniki prądu o odpowiednio dużym natężeniu (patrz odbiornik na ryc. 30.3).

**PRZYKŁAD 2.**

Podczas odtwarzania muzyki na pewnym smartfonie napięcie na wyjściu jego gniazdka słuchawkowego zmienia się w zakresie od 2,7 V do 3,1 V. Smartfon podłączono do wzmacniacza, którego głównym elementem jest tranzystor MOSFET. Zależność natężenia prądu płynącego przez ten tranzystor od napięcia między bramką a kanałem przedstawia wykres.




Obliczmy, w jakim zakresie zmienia się moc głośnika włączonego w obwód tranzystora. Napięcie zasilania głośnika wynosi 4 V.

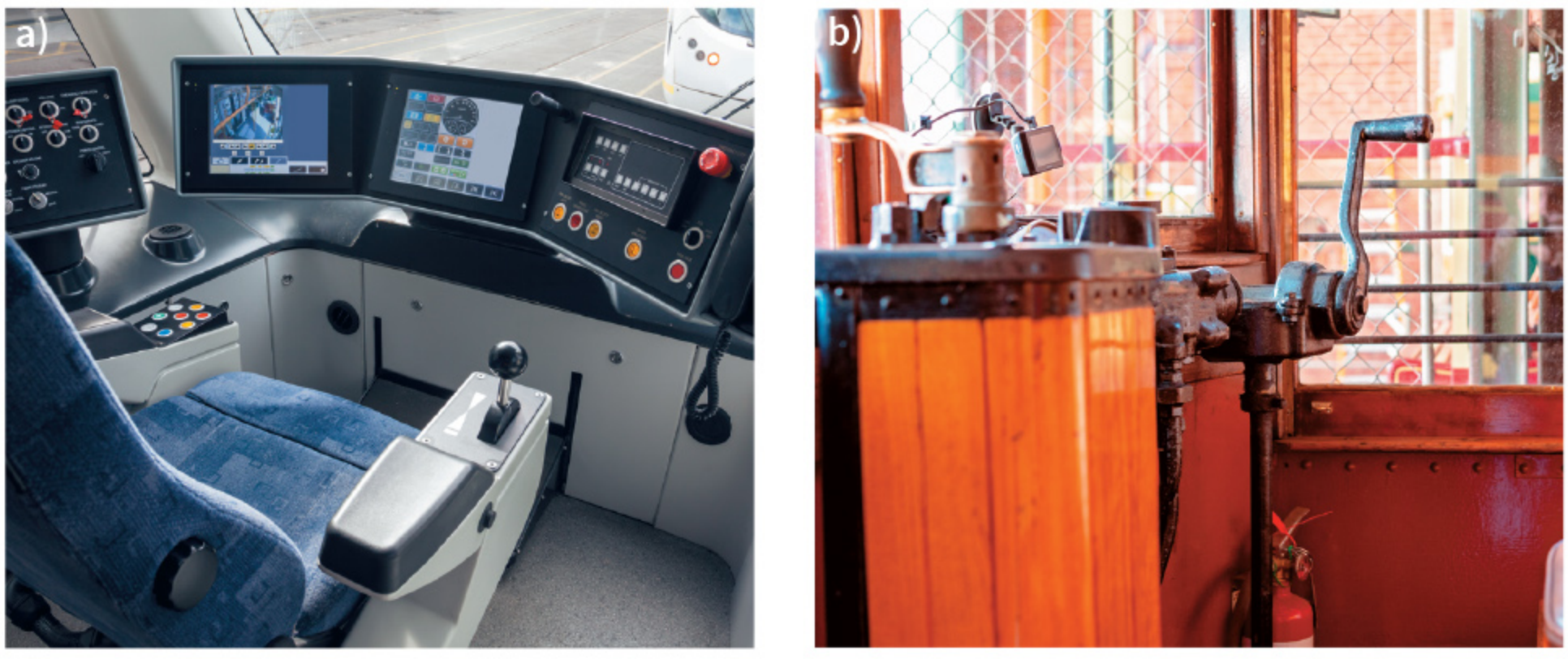
Z wykresu odczytujemy, że dla napięcia sterującego zmieniającego się w zakresie od 2,7 V do 3,1 V natężenie prądu płynącego w kanale tranzystora zmienia się w zakresie od 0,6 A do 11 A. Moc głośnika dla takich wartości granicznych natężenia prądu będzie zatem wynosić:

$$P_1 = UI_1 = 4\ \text{V} \cdot 0{,}6\ \text{A} = 2{,}4\ \text{W}$$

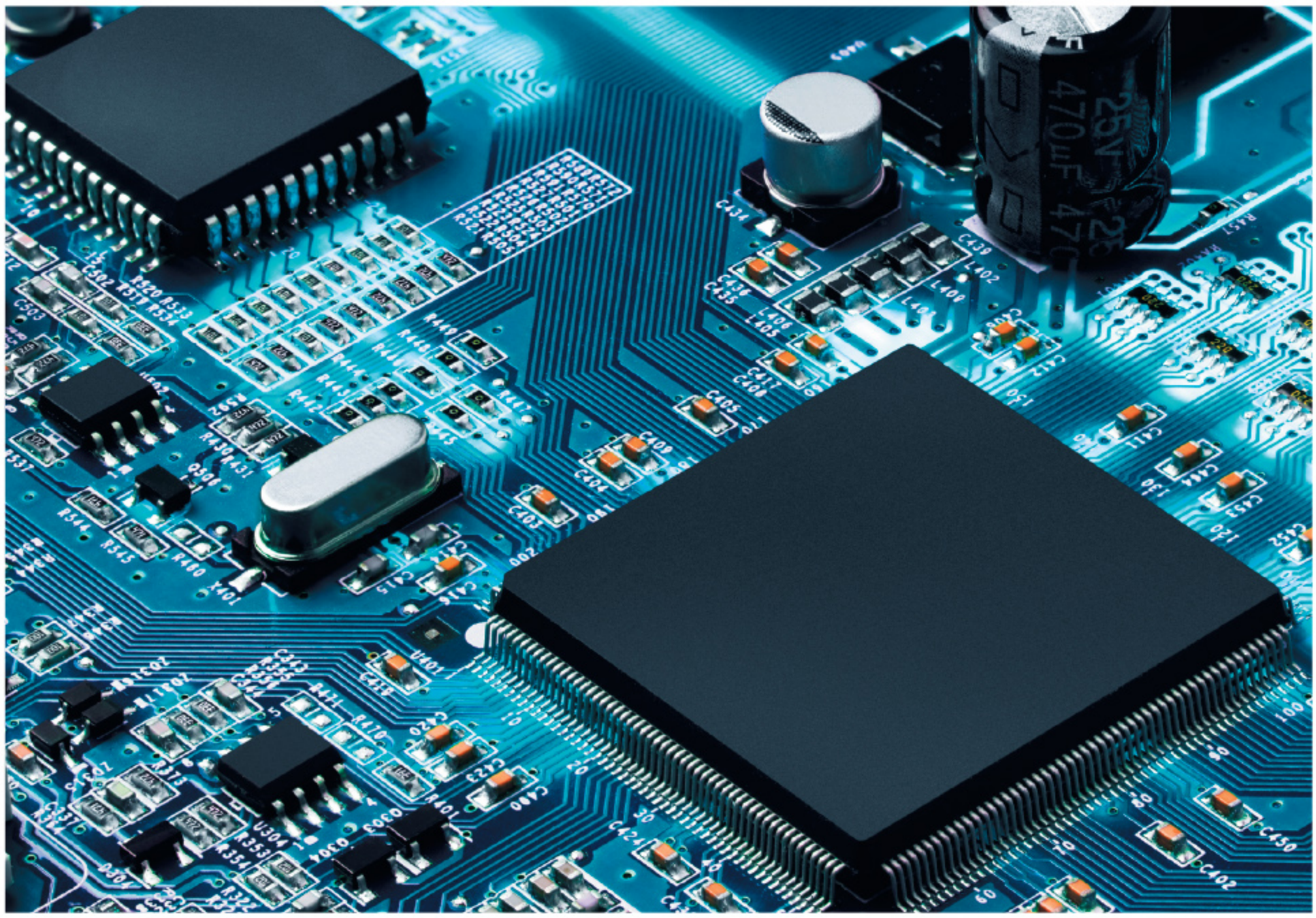
$$P_2 = UI_2 = 4\ \text{V} \cdot 11\ \text{A} = 44\ \text{W}$$

Moc głośnika zmienia się od $2{,}4\ \text{W}$ do $44\ \text{W}$.

Tranzystory kojarzą się głównie ze sprzętem elektronicznym, ale są stosowane również w urządzeniach elektrycznych dużej mocy. Za ich pomocą można sterować dużymi prądami elektrycznymi płynącymi w silnikach tramwajów czy lokomotyw elektrycznych (ryc. 30.6a). Dawniej włączenie lub wyłączenie takiego silnika elektrycznego polegało na zwarciu lub przerwaniu obwodu, a to powodowało iskrzenie nadpalające powierzchnie wyłącznika (ryc. 30.6b).




**Ryc. 30.6. a)** Stanowisko kierującego we współczesnym tramwaju. **b)** W dawnym tramwaju za pomocą korby przekręcano wyłącznik zasilania, który znajdował się w szafce poniżej



**Ryc. 30.7.** Procesor komputera zawiera miliony tranzystorów

Tranzystory wykorzystywane do przetwarzania informacji w układach elektronicznych mogą być bardzo małe – kanał może mieć grubość zaledwie kilkudziesięciu atomów. To dlatego obecnie budowane elektroniczne układy scalone zawierają tysiące, a nawet miliony mikroskopijnych tranzystorów. Procesory komputerowe to wyspecjalizowane układy scalone, w których tranzystory tworzą tzw. bramki logiczne (ryc. 30.7).

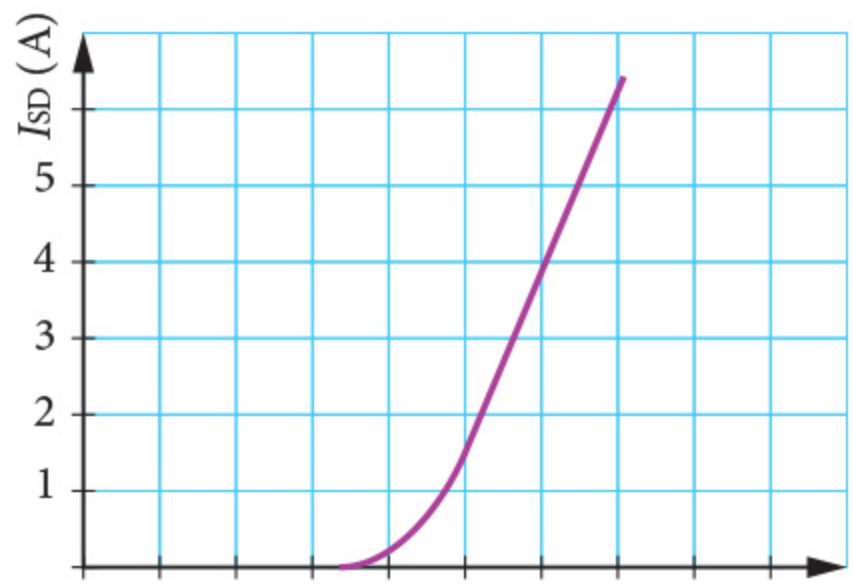
Przechodzenie tranzystora ze stanu przewodzenia do stanu, w którym nie przewodzi on prądu, to proces praktycznie natychmiastowy. Właśnie dzięki temu mamy dziś możliwość budowy komputerów wykonujących miliardy operacji na sekundę. Ograniczeniem szybkości wykonywania obliczeń nie jest już czas przełączania, ale skończona prędkość rozchodzenia się pola elektrycznego i stosunkowo powolny proces odprowadzania ciepła z grzejących się procesorów.

## PODSUMOWANIE

- **Tranzystor** wpięty do obwodu umożliwia płynną i szybką zmianę natężenia prądu w tym obwodzie.
- Tranzystory znajdziemy w urządzeniach elektronicznych i w systemach sterujących maszynami elektrycznymi.
- **Procesory** są układami zawierającymi miliony tranzystorów.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Czy w obwodzie sterującym tranzystora MOSFET (ryc. 30.3), czyli między kanałem i bramką, płynie prąd elektryczny? Uzasadnij odpowiedź.
2. Tranzystor typu MOSFET nie przewodzi prądu, gdy nie ma napięcia między kanałem a bramką – wówczas kanał wraz z elektrodami S i D tworzy układ dwóch diod półprzewodnikowych. Narysuj schemat elektryczny tego układu. Wyjaśnij, dlaczego prąd nie może płynąć przez taki układ.
3. Z wykresu na rycinie 30.5 odczytaj, przy jakim napięciu sterującym tranzystor wchodzi w stan przewodzenia oraz jakie napięcie sterujące należy ustawić na tranzystorze, aby prąd płynący przez niego miał natężenie 90 A.
4. Czy natężenie prądu płynącego przez tranzystor jest wprost proporcjonalne do napięcia sterującego? Uzasadnij odpowiedź; możesz skorzystać z wykresu na rycinie 30.5.
5. Na wykresie przedstawiono zależność natężenia prądu płynącego przez pewien typ tranzystora od napięcia sterującego.
   W jakim zakresie należy zmieniać napięcie sterujące, aby moc odbiornika elektrycznego połączonego szeregowo z tym tranzystorem zmieniała się od 18 W do 45 W, jeśli napięcie zasilania wynosi 12 V?



# 31. Fotoefekty

- Zjawisko fotoelektryczne
- Ogniwo fotoelektryczne
- Zjawiska fotochemiczne

➔ **Przypomnij sobie**, czym są poziomy energetyczne, zjawisko jonizacji oraz informacje dotyczące fotonu.

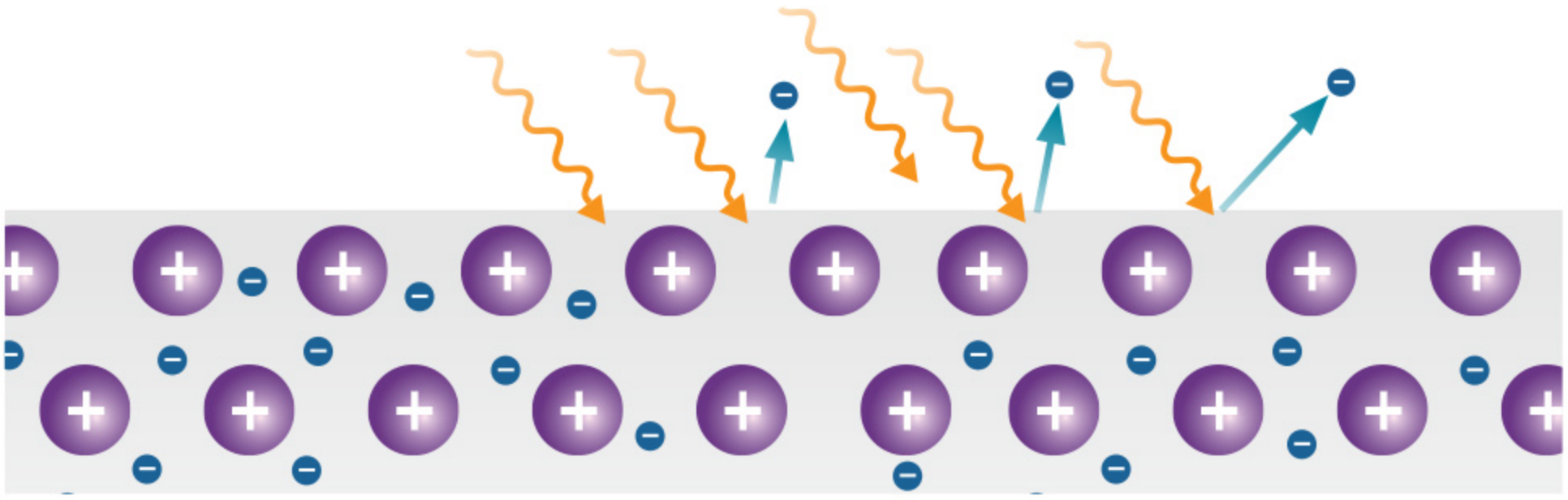
Każdy z nas widział pilota do telewizora, kalkulator zasilany światłem czy lampkę solarną. Wszystkie te urządzenia działają dlatego, że światło to strumień fotonów. W tym rozdziale wyjaśnimy, jakie są fizyczne podstawy działania takich urządzeń.

## Zjawisko fotoelektryczne

Pod koniec XIX wieku Heinrich Hertz odkrył, że ujemnie naelektryzowane metalowe płytki tracą swój ładunek w wyniku oświetlenia nadfioletem. Dziś wiemy, że zmniejszanie się ładunku elektrycznego na takich płytkach zachodzi w wyniku emisji elektronów z ich powierzchni. Efekt ten nazywamy zjawiskiem fotoelektrycznym zewnętrznym.

**Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne** to emisja elektronów z powierzchni ciał pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego.

Podstawową cechą tego zjawiska jest istnienie tzw. **częstotliwości granicznej**. Emisja elektronów następuje tylko wtedy, gdy częstotliwość padającego promieniowania jest co najmniej równa częstotliwości granicznej. Przy mniejszych częstotliwościach emisji nie ma, choćby promieniowanie miało bardzo duże natężenie.



**Ryc. 31.1.** Podczas zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego elektrony są wybijane z powierzchni metalu

Aby wyjaśnić istnienie częstotliwości granicznej, należy pamiętać, że promieniowanie elektromagnetyczne składa się z fotonów. Gdy na próbkę danej substancji pada strumień fotonów (ryc. 31.1), niektóre z nich są pochłaniane przez elektrony. Jeśli pochłonięty foton miał odpowiednio dużą energię, elektron może opuścić próbkę. Energia potrzebna do wybicia elektronu nazywana jest **pracą wyjścia** $W$ i zależy od rodzaju substancji. Padający foton powinien mieć energię co najmniej równą pracy wyjścia elektronu z danej substancji:

$$hf \geqslant W$$

gdzie $hf$ – energia fotonu.

Z tej zależności wynika, że elektron może zostać wybity tylko przez promieniowanie o częstotliwości spełniającej warunek:

$$f \geqslant \frac{W}{h}$$

Częstotliwość graniczną promieniowania powodującego zjawisko fotoelektryczne w danej substancji można więc wyznaczyć ze wzoru:

$$f_{\mathrm{gr}} = \frac{W}{h} \tag{1}$$

Praca wyjścia $W$ jest różna dla różnych substancji, zatem również częstotliwość graniczna $f_{\mathrm{gr}}$ zależy od rodzaju substancji. Częstotliwości graniczne w wypadku większości metali odpowiadają promieniowaniu z zakresu nadfioletu.

**PRZYKŁAD 1.**

Praca wyjścia dla miedzi jest równa 4,5 eV. Obliczmy, jaka jest minimalna częstotliwość promieniowania mogącego wywołać zjawisko fotoelektryczne na powierzchni miedzi.

Pracę wyjścia wyrażamy w dżulach:

$$W = 4{,}5\ \mathrm{eV} = 4{,}5 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J} = 7{,}2 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

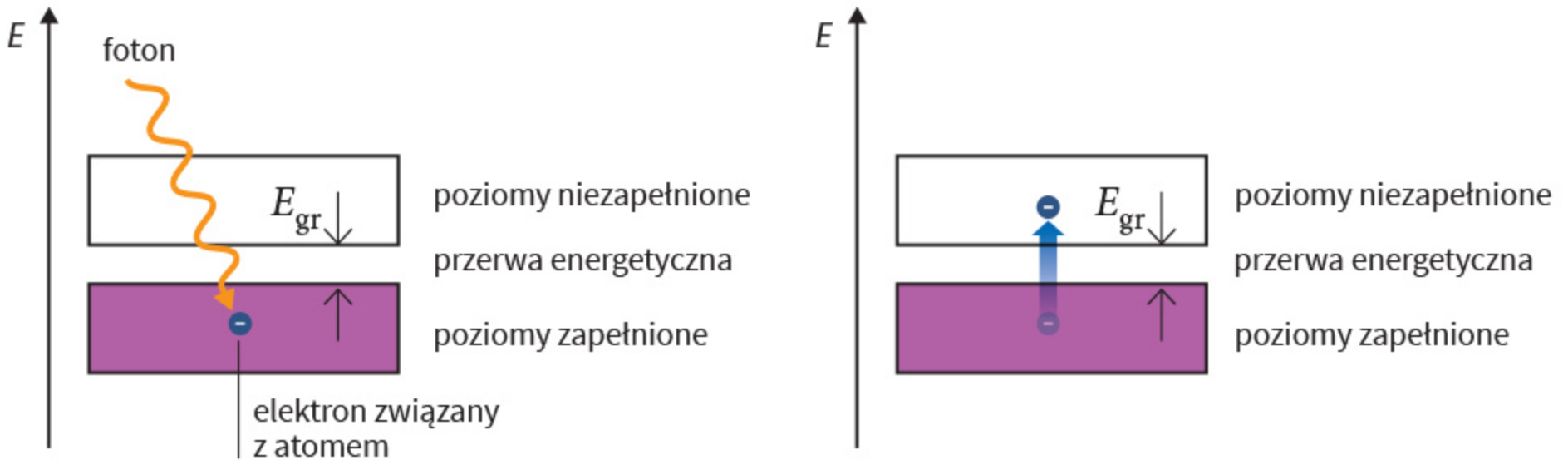
Podstawiamy dane do wzoru (1) i otrzymujemy wynik – częstotliwość graniczna dla miedzi jest równa:

$$f_{\mathrm{gr}} = \frac{7{,}2 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}} \approx 1{,}1 \cdot 10^{15}\ \mathrm{Hz}$$

Promieniowanie o takiej częstotliwości należy do nadfioletu.

Gdy na ciało padają fotony o energii mniejszej od pracy wyjścia, nie powodują one emisji elektronów, jednak mogą spowodować oderwanie się elektronu od atomu. Wówczas elektron przechodzi na wyższy poziom energetyczny (ryc. 31.2). Ten efekt nazywamy zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym.

Przechodzenie elektronów na wyższe poziomy energetyczne pod wpływem promieniowania nazywamy **zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym**.




**Ryc. 31.2.** Schemat wewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego

Aby elektron mógł przejść na wyższy poziom, energia pochłoniętego fotonu musi być co najmniej równa przerwie energetycznej $E_{gr}$. Wobec tego warunek przejścia elektronu można zapisać następująco:

$$hf \geqslant E_{gr}$$

Minimalną częstotliwość promieniowania powodującego przeniesienie elektronu na poziom o wyższej energii można obliczyć ze wzoru:

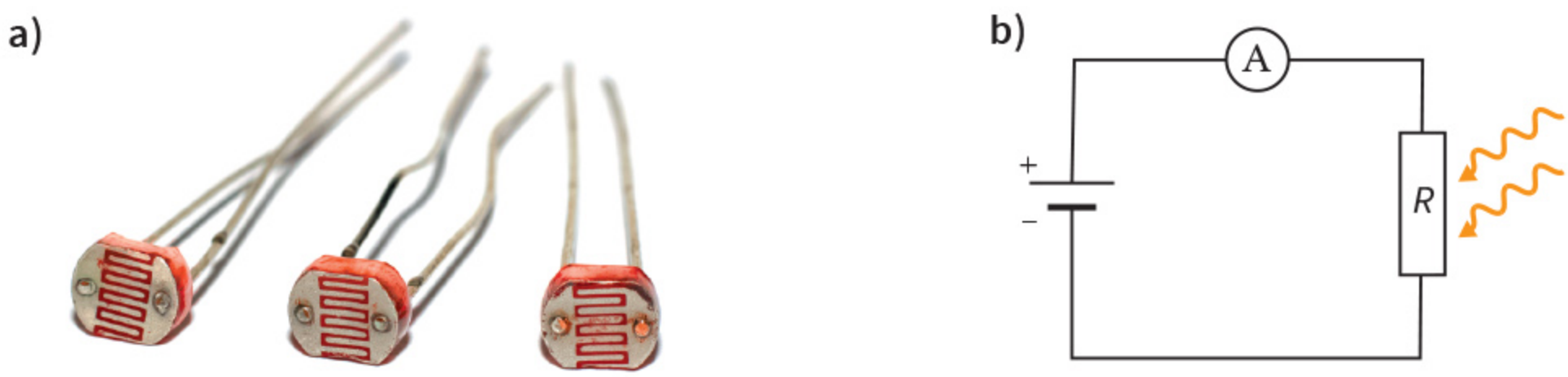
$$f_{gr} = \frac{E_{gr}}{h} \tag{2}$$

Jest to również częstotliwość graniczna. Tylko promieniowanie o częstotliwości co najmniej równej częstotliwości granicznej może spowodować przejście elektronu:

$$f \geqslant f_{gr} \tag{3}$$

Zwróćmy uwagę, że warunki zachodzenia obu zjawisk fotoelektrycznych – wewnętrznego i zewnętrznego – mają tę samą postać. Jedyną różnicą jest to, że w zjawisku fotoelektrycznym wewnętrznym rolę pracy wyjścia odgrywa szerokość przerwy energetycznej. W przypadku półprzewodników zjawisko fotoelektryczne powoduje przejście elektronów na wyższe niezajęte poziomy energetyczne. Dzięki tym dodatkowym elektronom swobodnym półprzewodnik lepiej przewodzi prąd elektryczny. Półprzewodnikowe elementy obwodów elektrycznych zmieniające swoje właściwości elektryczne pod wpływem światła nazywamy **fotoelementami**. Przykładem takiego elementu jest fotoopornik (ryc. 31.3). Im więcej fotonów pada na fotoopornik, tym więcej elektronów przechodzi na wyższe poziomy energetyczne i może tworzyć prąd elektryczny. Wobec tego przy zadanym napięciu zasilania większe jest wówczas natężenie prądu. Gdy padający foton ma zbyt małą

energię, nie zostanie pochłonięty i elektron nie przejdzie na wyższy poziom. Dzięki dobraniu półprzewodnika z odpowiednią przerwą między poziomami możemy np. sprawić, że dany fotoelement zareaguje na światło zielone, a nie zareaguje na światło czerwone.



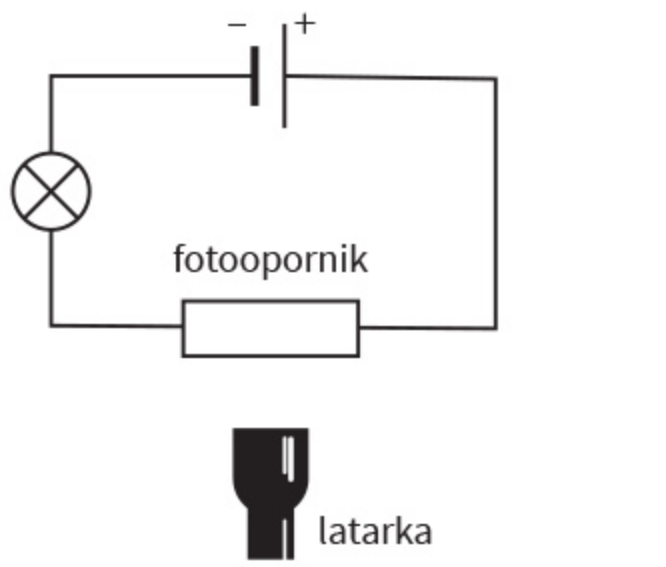

**Ryc. 31.3 a)** Fotooporniki; **b)** obwód z fotoopornikiem i amperomierzem

**DOŚWIADCZENIE 1.**

Do wykonania doświadczenia potrzebne będą: fotoopornik (do kupienia w sklepie z częściami elektronicznymi), żarówka, bateria, przewody łączące oraz latarka.

Elementy obwodu należy połączyć szeregowo, tak jak na schemacie.

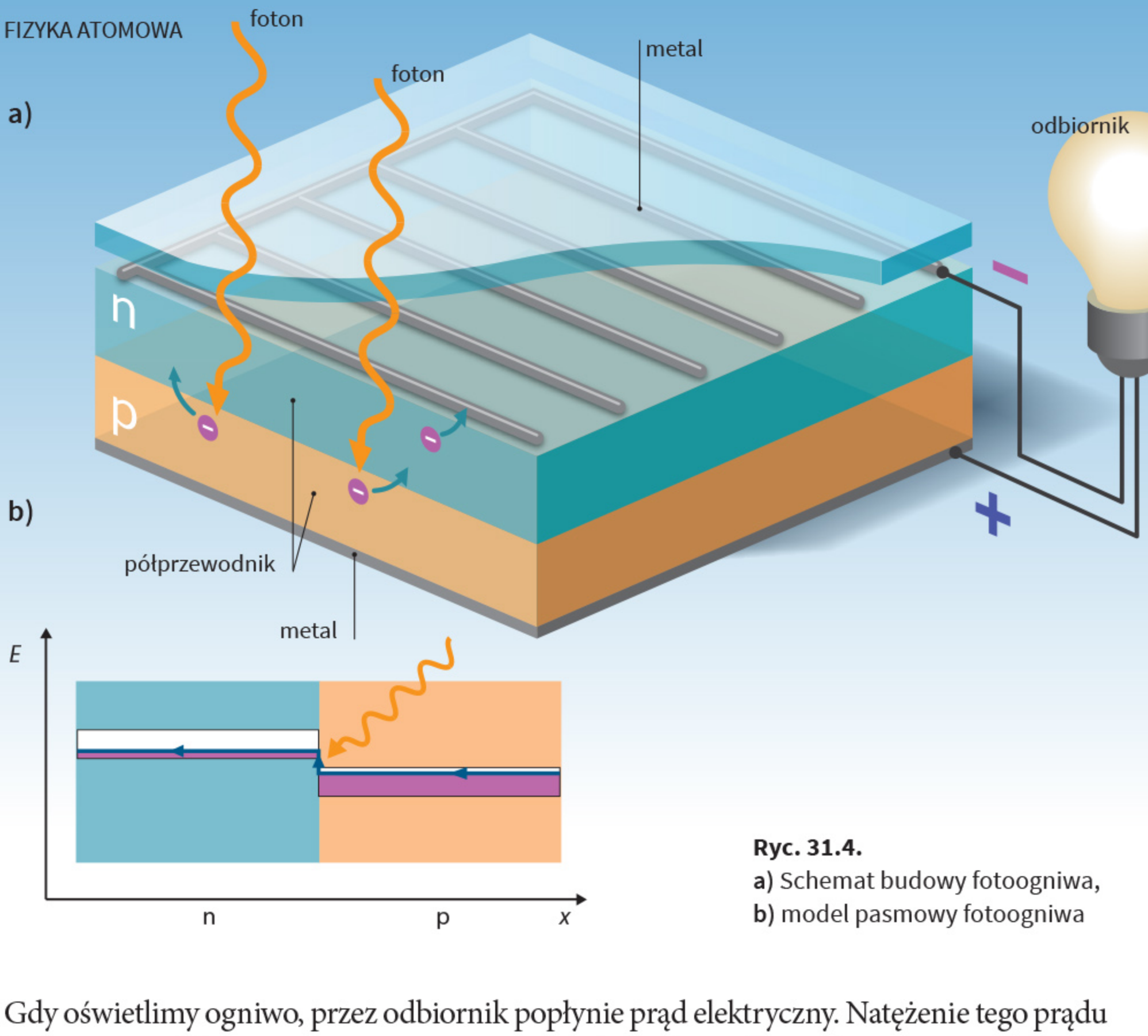
Sprawdź, jakie są różnice w świeceniu żarówki, gdy fotoopornik jest nieoświetlony oraz gdy jest oświetlony światłem z latarki.




Współcześnie fotoelementy znajdziemy w czujnikach ruchu służących do automatycznego zapalenia światła przed domem lub w czytnikach kodów kreskowych. W każdym z tych urządzeń wykorzystuje się zmianę natężenia prądu elektrycznego płynącego w obwodzie, spowodowaną zmianą oświetlenia. W czytnikach kodów kreskowych plamka światła laserowego bardzo szybko przesuwa się tam i z powrotem przez czarno-białe paski. Fotoelement rejestruje światło rozproszone przez jasne i ciemne pola (z ciemnych pól dociera do detektora mniej światła niż z jasnych). Układ elektroniczny czytnika potrafi jednoznacznie zinterpretować sekwencję zmian natężenia prądu elektrycznego spowodowaną zmianą intensywności światła rozproszonego.

## Ogniwo fotoelektryczne

W rozdziale 29. mówiliśmy o diodach LED, w których podczas przejścia elektronu do niższego pasma energetycznego w złączu p-n (diodzie) następuje emisja fotonu. Okazuje się, że występuje także zjawisko odwrotne. Elektron po pochłonięciu fotonu przechodzi do wyższego pasma energetycznego. Ten efekt jest podstawą działania **fotoogniwa**, czyli elementu wytwarzającego napięcie pod wpływem światła. W takim ogniwie do warstw półprzewodników typu n oraz p dołącza się metalowe elektrody (ryc. 31.4). Do elektrod można podłączyć odbiornik i utworzyć w ten sposób obwód zamknięty.




**Ryc. 31.4.**
**a)** Schemat budowy fotoogniwa,
**b)** model pasmowy fotoogniwa

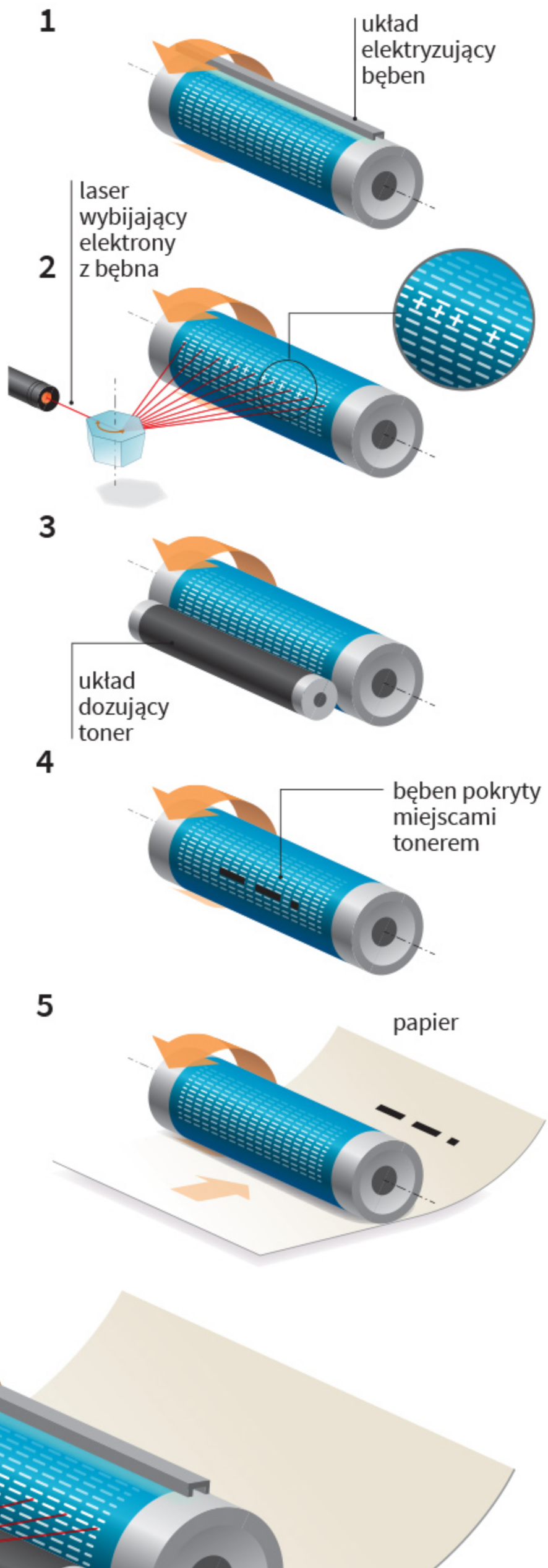
Gdy oświetlimy ogniwo, przez odbiornik popłynie prąd elektryczny. Natężenie tego prądu będzie w przybliżeniu wprost proporcjonalne do liczby padających na ogniwo fotonów o wystarczająco dużych energiach. Ogniwa można łączyć ze sobą szeregowo i uzyskać napięcie umożliwiające np. zasilanie instalacji elektrycznej w domu czy obiekcie pływającym, takim jak tramwaj wodny (ryc. 31.5).

**Ryc. 31.5.** Tramwaj wodny w Bydgoszczy, zasilany przez ogniwa fotoelektryczne

## WARTO WIEDZIEĆ

**Jak działa drukarka laserowa?**

Drukarka laserowa to urządzenie, w którym wykorzystuje się zjawisko fotoelektryczne do uzyskiwania wydruków. Najważniejszym elementem takiej drukarki jest bęben pokryty warstwą izolatora, która umożliwia elektryzowanie wybranych fragmentów swojej powierzchni. Na początku cała powierzchnia bębna jest elektryzowana ładunkiem ujemnym. Następnie kierowana jest na nią wiązka światła laserowego, które wybija elektrony i w ten sposób powoduje, że pewne obszary powierzchni bębna elektryzują się dodatnio. Powstaje wówczas elektrostatyczny obraz przyszłego wydruku. Na ten obraz nanosi się toner, czyli drobniutkie kulki odpowiedniej żywicy. Toner jest naelektryzowany ujemnie, więc jego drobinki są przyciągane przez oświetlone (czyli naelektryzowane dodatnio) obszary bębna, a odpychane od pozostałych. Następnie tak przygotowany bęben styka się z papierem. Papier podczas przemieszczania go do bębna jest elektryzowany dodatnio, dlatego ujemnie naelektryzowane drobiny przenoszą się z bębna na papier. Pokryty tonerem papier trafia do układu gorących wałków, które w temperaturze bliskiej 300 °C wtapiają toner w papier. Bęben jest następnie czyszczony i przygotowywany do kolejnej części wydruku.



## Zjawiska fotochemiczne

Istnieją sytuacje, w których dzięki oświetleniu można na tyle zmienić właściwości atomu lub cząsteczki, że będą one w stanie połączyć się z innym atomem lub cząsteczką. Reakcje chemiczne zachodzące pod wpływem promieniowania nazywamy **reakcjami fotochemicznymi.** Warunkiem zajścia każdej reakcji fotochemicznej jest absorpcja promieniowania przez substancję reagującą. Takie reakcje mogą być wywołane przez fotony z szerokiego zakresu fal elektromagnetycznych, od podczerwieni do promieniowania rentgenowskiego. Dla każdej reakcji istnieje częstotliwość graniczna, czyli minimalna częstotliwość promieniowania, które tę reakcję wywołuje. Jedną z najważniejszych przemian biochemicznych na Ziemi jest fotosynteza, podczas której zachodzą reakcje fotochemiczne. Gdy elektrony w cząsteczkach wody i dwutlenku węgla znajdują się w stanach podstawowych, między tymi cząsteczkami nie zachodzą reakcje chemiczne. Pochłonięcie fotonów powoduje przejście elektronów do stanów wzbudzonych i wówczas te elektrony inicjują reakcje chemiczne prowadzące do powstania glukozy.

$$6H_2O + 6CO_2 + \text{fotony} \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

woda — dwutlenek węgla — glukoza — tlen

**Ryc. 31.6.** Schemat fotosyntezy

Liczba reakcji chemicznych wywołanych światłem zależy od liczby fotonów padającego promieniowania, podobnie jak w przypadku zjawiska fotoelektrycznego. Dzięki istnieniu częstotliwości granicznej istnieją materiały niewrażliwe na światło o barwie czerwonej, lecz wrażliwe na światło zielone lub o większych częstotliwościach (im mniejsza jest długość fali, tym większa jest częstotliwość tego promieniowania).

**Ryc. 31.7.** Reakcje fotochemiczne w stomatologii

Kolejnym przykładem zjawiska fotochemicznego jest utrwalanie lakierów do paznokci oraz wypełnień w uzębieniu promieniowaniem nadfioletowym (ryc. 31.7). Energia niesiona przez fotony światła nie jest wystarczająca do zainicjowania reakcji chemicznych zmieniających właściwości lakierów oraz plomb, więc inicjują je fotony nadfioletu.

Innym przykładem reakcji fotochemicznej jest rozpad bromku srebra pod wpływem światła.

$$AgBr + \text{foton} \rightarrow Ag^+ + Br^-$$

Bromek srebra jest podstawową substancją światłoczułą stosowaną w fotografii analogowej. Podczas oświetlania fragmentu kliszy fotograficznej następuje rozpad tej substancji na jony srebra oraz bromu. Podczas procesu wywoływania srebro pozostaje na kliszy, a brom przechodzi do cieczy, w której zanurzamy kliszę.

Współcześnie coraz rzadziej wykonuje się zdjęcia na materiałach chemicznych. Wyparły je elementy półprzewodnikowe, takie jak matryce CCD czy CMOS. W przypadku tych matryc warunkiem powstania obrazu również jest pochłonięcie fotonu. Matryce te składają się z małych elementów półprzewodnikowych zwanych pikselami. Gdy na piksel pada światło, fotony powodują przejścia elektronów na wyższe poziomy energetyczne (zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne). Elektrony są gromadzone w kondensatorach, a potem „zliczane" przez układy elektroniczne. Tak powstają zdjęcia i filmy w naszych smartfonach.

## PODSUMOWANIE

- **Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne** to emisja elektronów z powierzchni ciał pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego.
- **Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne** to przejście elektronów na wyższe poziomy energetyczne pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego.
- **Fotoelement** to część obwodu elektrycznego zmieniająca swoje właściwości pod wpływem padającego światła.
- **Reakcje fotochemiczne** to reakcje chemiczne zachodzące pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego.
- Zjawisko fotoelektryczne i reakcje fotochemiczne może wywołać tylko promieniowanie o częstotliwości równej co najmniej **częstotliwości granicznej** dla danego zjawiska.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Na fotoopornik pada w każdej sekundzie 10 tys. fotonów o energii 0,2 eV każdy, ale zjawisko fotoelektryczne nie zachodzi. Co należy zrobić, aby zaszło: zwiększyć liczbę fotonów padających w ciągu sekundy czy zwiększyć częstotliwość promieniowania? Uzasadnij odpowiedź.
2. Na dwa identyczne ogniwa fotoelektryczne pada światło. Na jedno z nich w czasie 1 s pada $10^{15}$ fotonów światła niebieskiego, a na drugie – $10^{14}$ fotonów światła zielonego. Do obu ogniw podłączono takie same odbiorniki energii. Przez który z odbiorników popłynie prąd o większym natężeniu? Uzasadnij odpowiedź.
3. Przerwa energetyczna w pewnym półprzewodniku jest równa 0,9 eV. Jaka może być maksymalna długość fali promieniowania elektromagnetycznego padającego na ten półprzewodnik, aby możliwe było przejście elektronu na wyższy poziom energetyczny?
4. Do utrwalenia lakieru pokrywającego paznokcie używa się lamp emitujących ultrafiolet o mocy 50 W i częstotliwości $10^{15}$ Hz. Dlaczego nie używa się lamp emitujących światło o częstotliwości o połowę mniejszej, lecz o dwa razy większej mocy?
5. Praca wyjścia dla żelaza jest równa 4,4 eV. Do powierzchni Ziemi dociera ze Słońca promieniowanie nadfioletowe o długościach fal nie mniejszych niż 300 nm. Czy nadfiolet słoneczny wybija elektrony z powierzchni żelaznych słupów wysokiego napięcia? Odpowiedź uzasadnij za pomocą odpowiednich obliczeń.

# FIZYKA ATOMOWA

prędkość światła w próżni

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

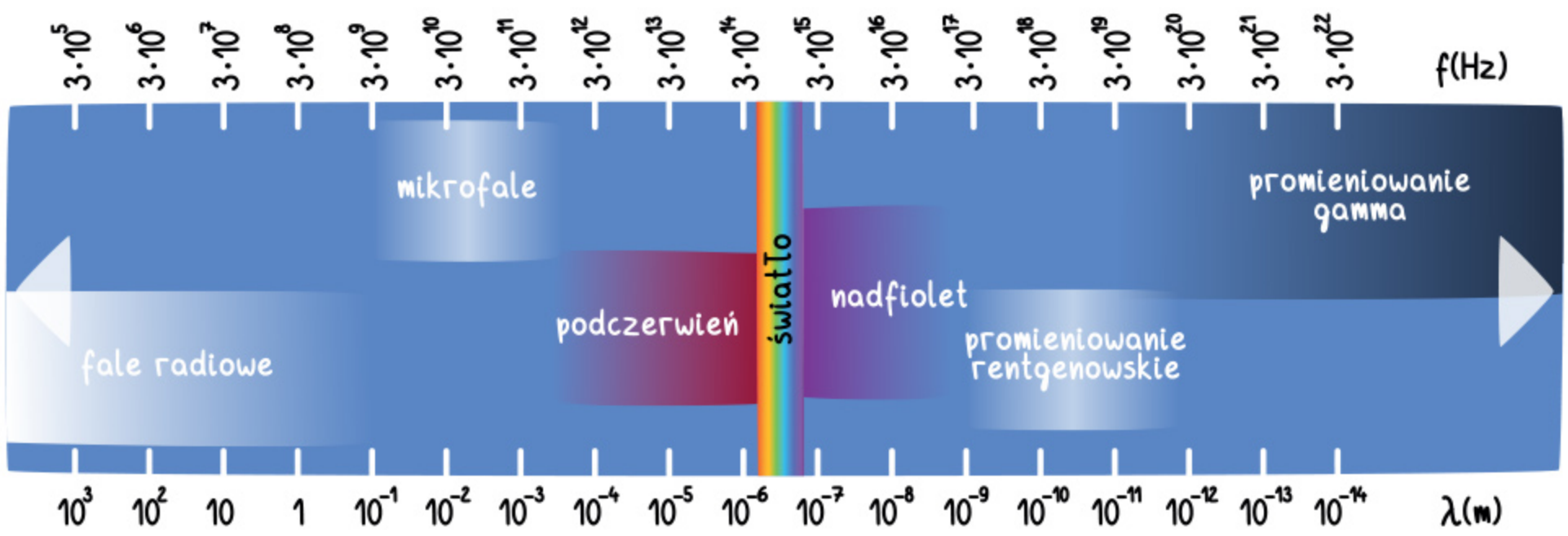
## FALA ELEKTROMAGNETYCZNA

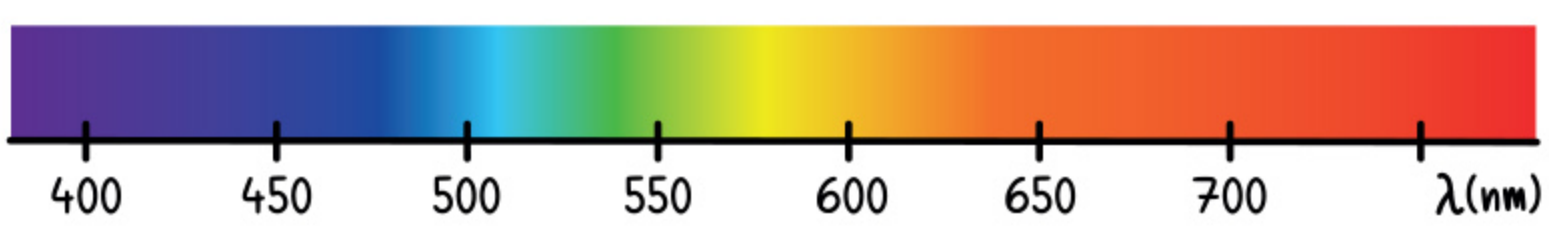
to rozchodzące się i wzajemnie przenikające zmienne pola elektryczne i magnetyczne.

$$\lambda \cdot f = c$$

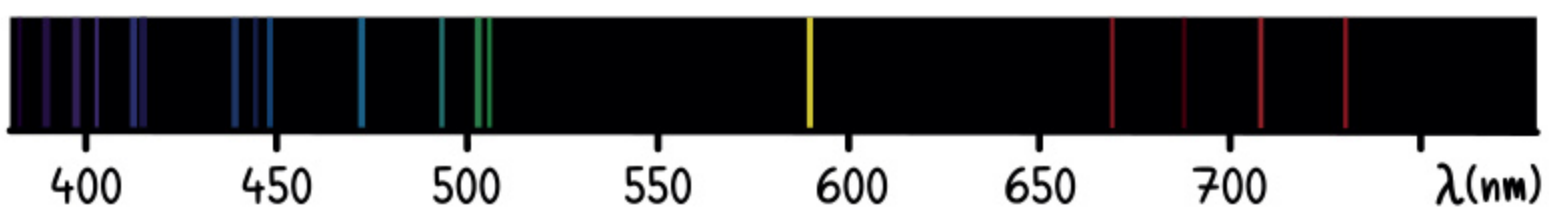
$\lambda$ – długość fali

$f$ – częstotliwość



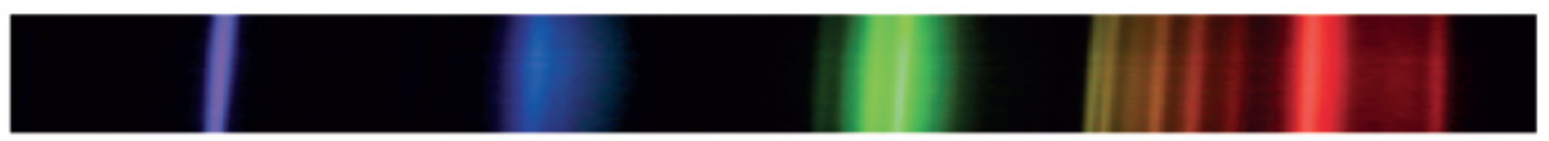




widmo ciągłe światła




widmo emisyjne helu

(przykład widma liniowego)



widmo emisyjne świetlówki

Promieniowanie elektromagnetyczne to strumień fotonów.

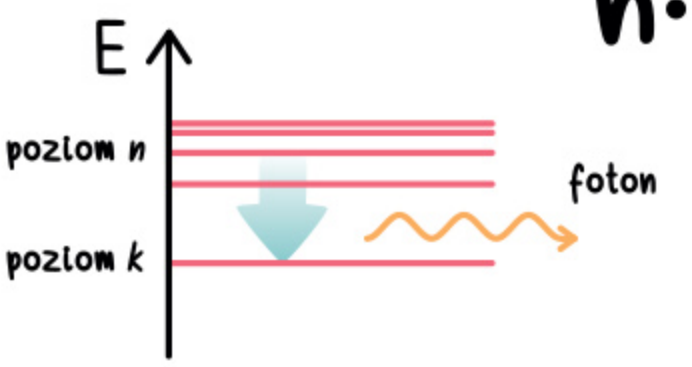
## ENERGIA FOTONU

$$E = h \cdot f$$

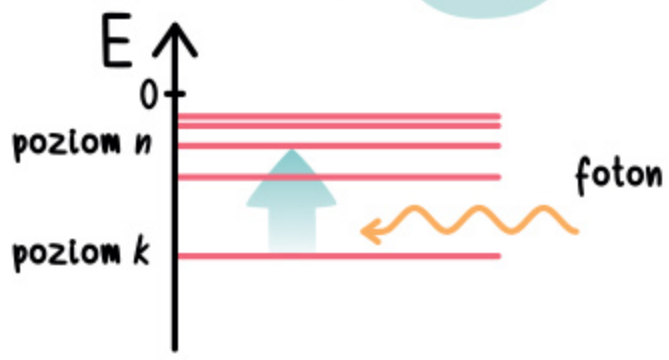
$h$ – stała Plancka

$f$ – częstotliwość

$$h \cdot f = E_n - E_k$$

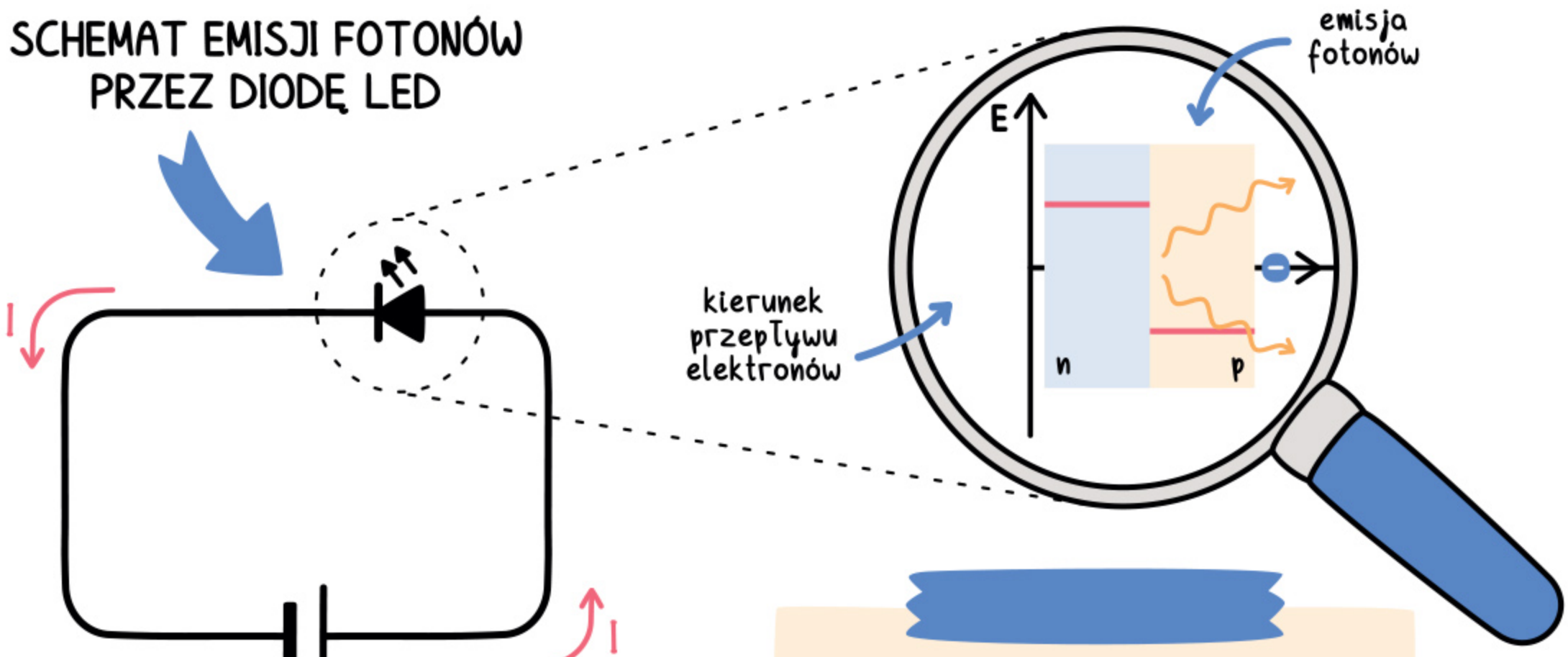



Gdy elektron przechodzi z wyższego poziomu energetycznego na niższy, emituje foton.




Elektron, pochłaniając foton, przechodzi z niższego poziomu energetycznego na wyższy.

## SCHEMAT EMISJI FOTONÓW PRZEZ DIODĘ LED




**DIODA**

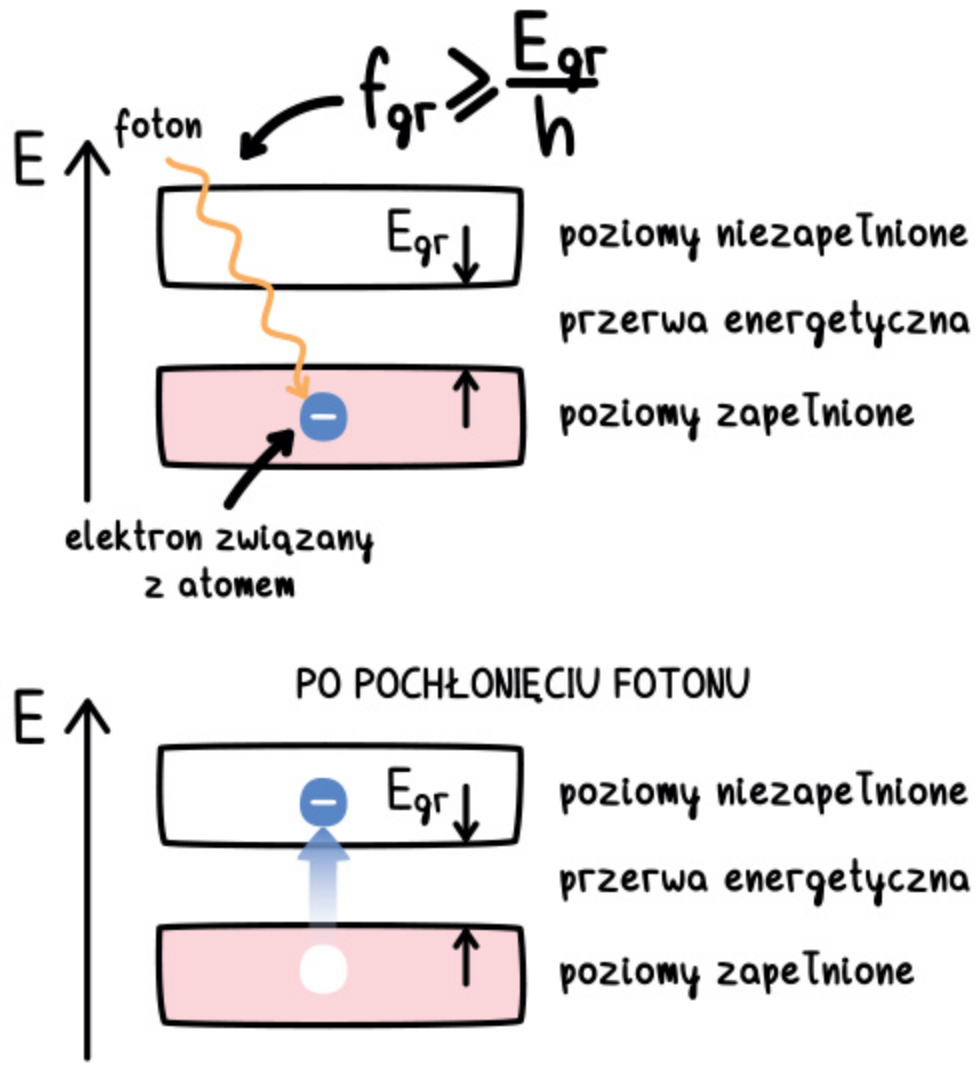
to element półprzewodnikowy, który przewodzi prąd tylko w jedną stronę.

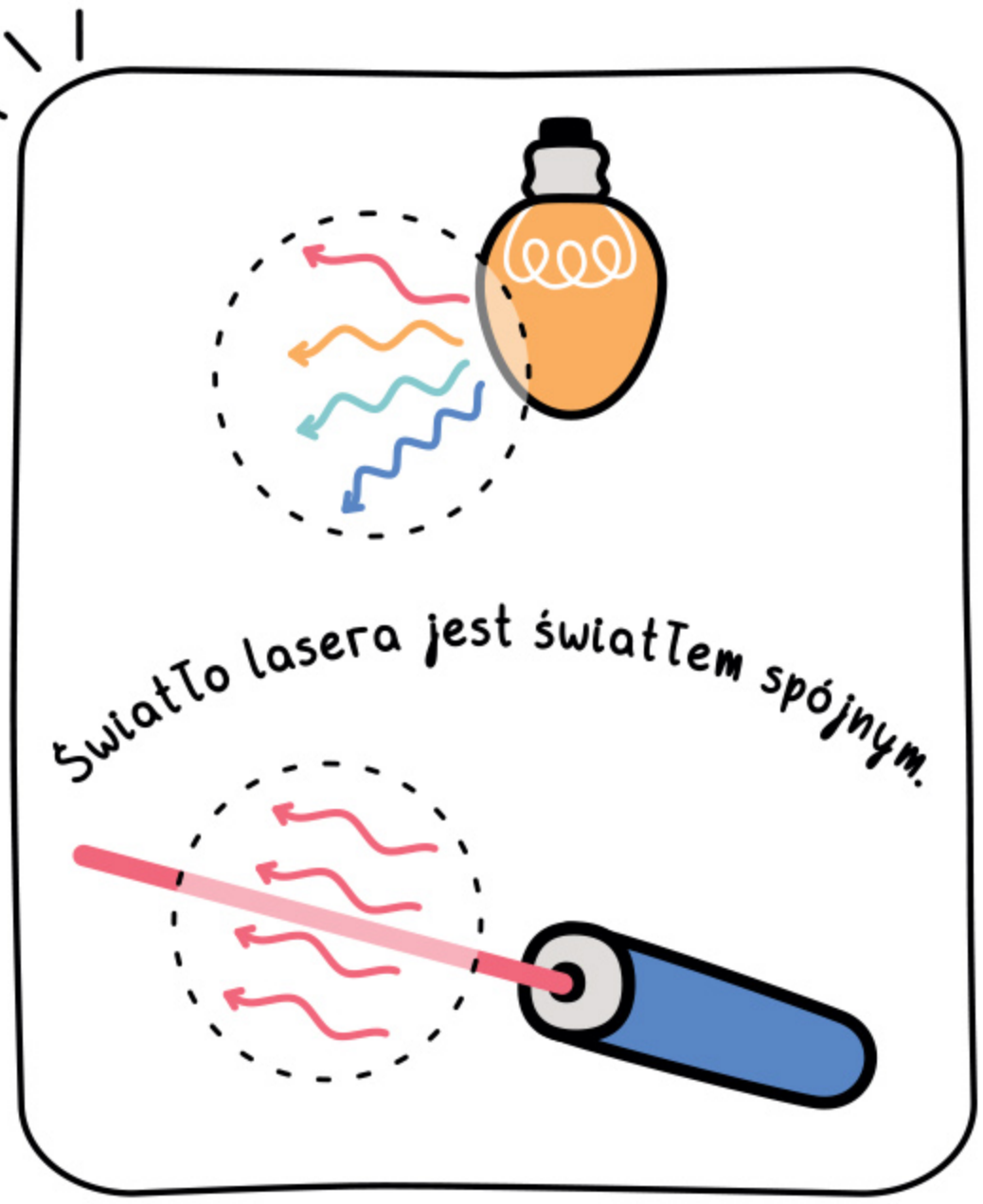
### Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne

to emisja elektronów z powierzchni ciał pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego.

Przechodzenie elektronów na wyższe poziomy energetyczne pod wpływem promieniowania nazywamy **zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym**.

## ZJAWISKA FOTOELEKTRYCZNE ZACHODZĄ DLA CZĘSTOTLIWOŚCI WIĘKSZEJ OD GRANICZNEJ



## PYTANIA I ZADANIA

1. Domowe sieci wi-fi wykorzystują obecnie dwa pasma częstotliwości: od 2400 MHz do 2480 MHz (określane jako 2,4 GHz) oraz od 5150 MHz do 5730 MHz (5 GHz). Jaki jest stosunek największej do najmniejszej długości fali spośród fal w opisanych pasmach?

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

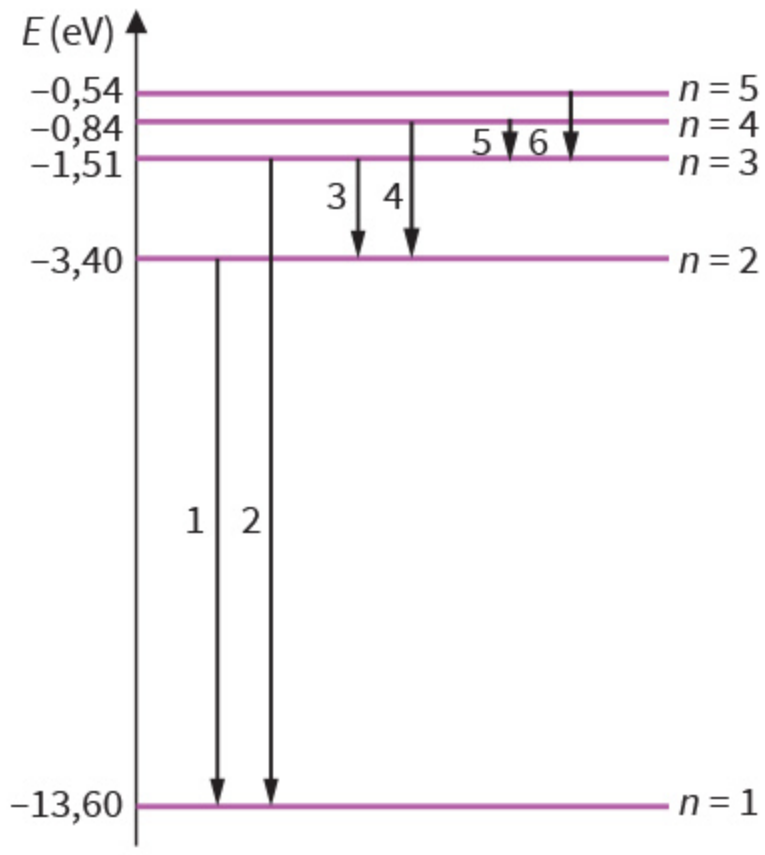
| | | | |
|---|---|---|---|
| **1.** | Promieniowanie źródeł termicznych ma widmo nieciągłe. | **P** | **F** |
| **2.** | W widmie promieniowania źródeł termicznych stosunek natężenia barwy niebieskiej do czerwonej rośnie wraz z temperaturą źródła. | **P** | **F** |
| **3.** | Widmo absorpcyjne pozwala wyznaczyć skład chemiczny nieświecącej materii. | **P** | **F** |

3. Energia jonizacji atomu argonu jest równa ok. 16 eV. Jaka jest częstotliwość graniczna promieniowania wywołującego jonizację argonu? Do jakiej części widma fal elektromagnetycznych należy to promieniowanie?

4. Energia fotonów promieniowania podczerwonego zawiera się w przedziale od 0,001 eV do 1,6 eV. Jaki jest zakres częstotliwości tego promieniowania?

5. Podaj trzy przykłady pierwiastków, których atomy mogą zostać zjonizowane po oświetleniu ich promieniowaniem o energii fotonów 10 eV. Skorzystaj z ryc. 27.8.

6. Na rysunku przedstawiono uproszczony schemat poziomów energetycznych w atomie wodoru. Numerami od 1 do 6 oznaczono przejścia między poziomami, związane z emisją fotonów. Przejście oznaczone numerem 4 zachodzi z emisją fotonu światła niebieskiego, a numerem 3 – fotonu światła czerwonego.
**Wybierz wszystkie zdania prawdziwe.**



**A.** Fotony emitowane przy przejściach numer 1 oraz numer 2 należą do nadfioletu.
**B.** Energia fotonu emitowanego przy przejściu numer 3 jest ok. 2 razy większa od energii fotonu emitowanego przy przejściu numer 6.
**C.** Długość fali promieniowania odpowiadającego przejściu oznaczonemu numerem 3 jest mniejsza niż długość fali promieniowania odpowiadającego przejściu oznaczonemu numerem 2.
**D.** Przejścia oznaczone numerami 5 oraz 6 należą do podczerwieni.

**7.** Gdy na powierzchnię pewnego metalu padają fotony o energii 3,2 eV, nie wybijają z niego elektronów.

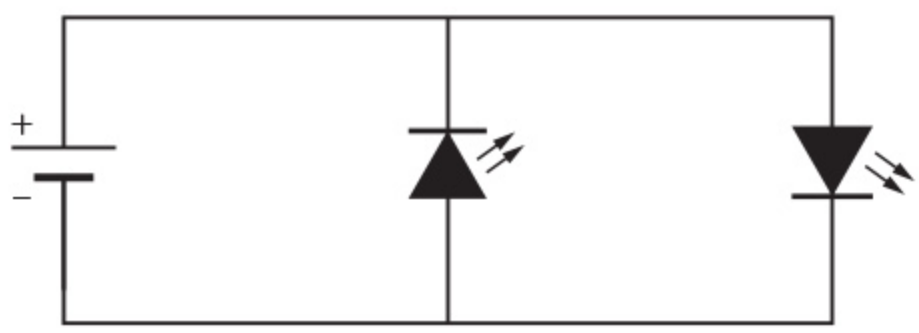
**Wybierz wszystkie poprawne dokończenia zdania.**

Aby możliwe było wybicie elektronów z powierzchni metalu, należy skierować na nią

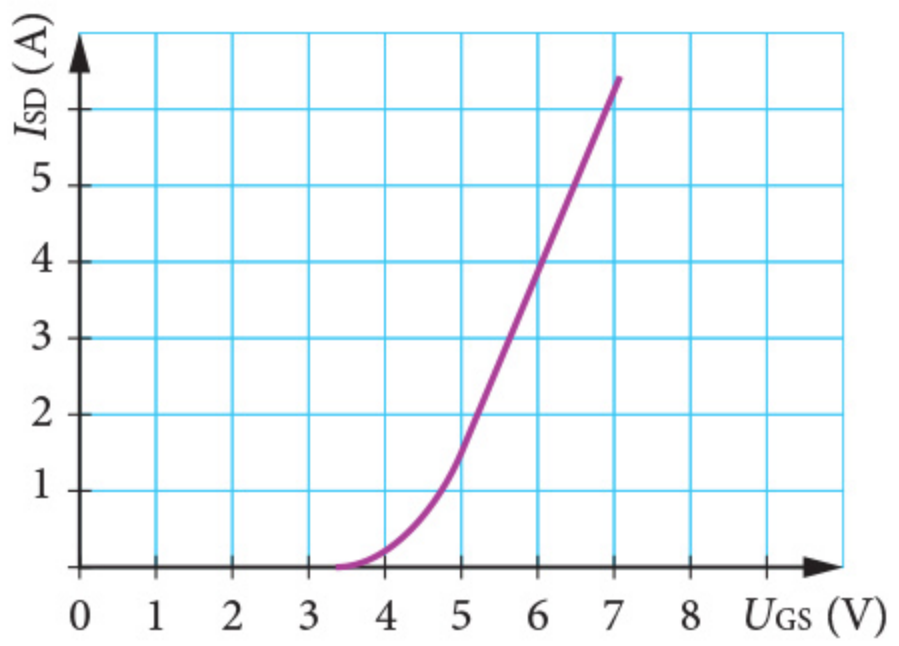
**A.** taką samą liczbę fotonów światła o większej częstotliwości.
**B.** taką samą liczbę fotonów światła o mniejszej częstotliwości.
**C.** większą liczbę fotonów światła o tej samej częstotliwości.
**D.** większą liczbę fotonów światła o większej częstotliwości.

**8.** Do utwardzenia wypełnienia w zębie należy użyć lampy emitującej promieniowanie o częstotliwości co najmniej $7{,}1 \cdot 10^{14}$ Hz i mocy 1,2 W. Czy promieniowanie o trzy razy mniejszej częstotliwości, lecz dziewięciokrotnie większej mocy wywoła taki sam efekt?

**9.** Dwie diody świecące podłączono do baterii według schematu. Czy świecą obie diody, czy jedna dioda, a może żadna z nich? Uzasadnij odpowiedź.




**10.** Na wykresie przedstawiono zależność natężenia prądu płynącego przez tranzystor od napięcia sterującego. Oszacuj, o ile zmieni się natężenie prądu płynącego przez tranzystor, gdy napięcie sterujące wzrośnie z 5 V do 7 V.

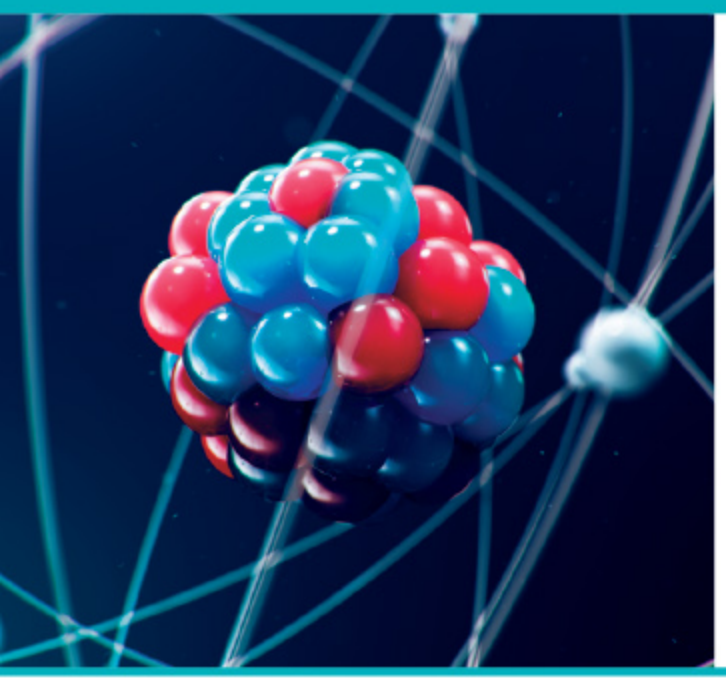


## Najważniejsze pojęcia

- atom [*atom*] 197–198
- chmura elektronowa [*electron cloud*] 203–204
- częstotliwość [*frequency*] 176–177
- częstotliwość graniczna [*cutoff frequency*] 209, 232
- dioda półprzewodnikowa [*semiconductor diode*] 219
- dioda świecąca [*light emitting diode*] 222
- długość fali [*wavelength*] 178
- elektron swobodny [*free electron*] 214
- fale elektromagnetyczne [*electromagnetic waves*] 148, 176
- fale radiowe [*radio waves*] 179
- foton [*photon*] 197
- ogniwo fotoelektryczne (fotoogniwo) [*photoelectric cell*] 235
- pasmo energetyczne [*energy band*] 214
- poziom energetyczny [*energy level*] 204–205
- poziom podstawowy [*basic level*] 205
- poziom wzbudzony [*excited level*] 205
- powłoka elektronowa [*electron shell*] 204
- półprzewodnik [*semiconductor*] 216
- praca wyjścia [*work function*] 233
- promieniowanie elektromagnetyczne [*electromagnetic radiation*] 176
- promieniowanie gamma [*gamma radiation*] 183
- promieniowanie mikrofalowe [*microwave radiation*] 180
- promieniowanie nadfioletowe [*ultraviolet radiation*] 182
- promieniowanie podczerwone [*infrared radiation*] 181
- promieniowanie rentgenowskie [*X-rays*] 183
- prostownik [*rectifier*] 221
- proton [*proton*] 246
- przerwa energetyczna [*band gap*] 214
- przewodnik [*conductor*] 215
- stała Plancka [*Planck constant*] 199
- tranzystor [*transistor*] 225
- tranzystor polowy [*field-effect transistor*] 226
- widmo absorpcyjne [*absorption spectrum*] 191
- widmo ciągłe [*continuous spectrum*] 188
- widmo emisyjne [*emission spectrum*] 191
- widmo promieniowania [*spectrum of radiation*] 188
- zakaz Pauliego [*Pauli exclusion principle*] 212
- zjawisko fotoelektryczne [*photoelectric phenomenon (effect)*] 232, 234
- zjawisko fotochemiczne [*photochemical phenomenon*] 238
- źródło nietermiczne [*non-thermal source*] 187
- źródło termiczne [*thermal source*] 187

# FIZYKA JĄDROWA

Skąd gwiazdy czerpią energię? Jak ustalić wiek skał czy znalezisk archeologicznych? Jak działa elektrownia jądrowa? Dopiero od niecałych stu lat odpowiedzi na te pytania daje nam **FIZYKA JĄDROWA**.



# 32. Budowa jądra atomowego

- Siły jądrowe
- Izotopy
- Budowa jądra a układ okresowy pierwiastków

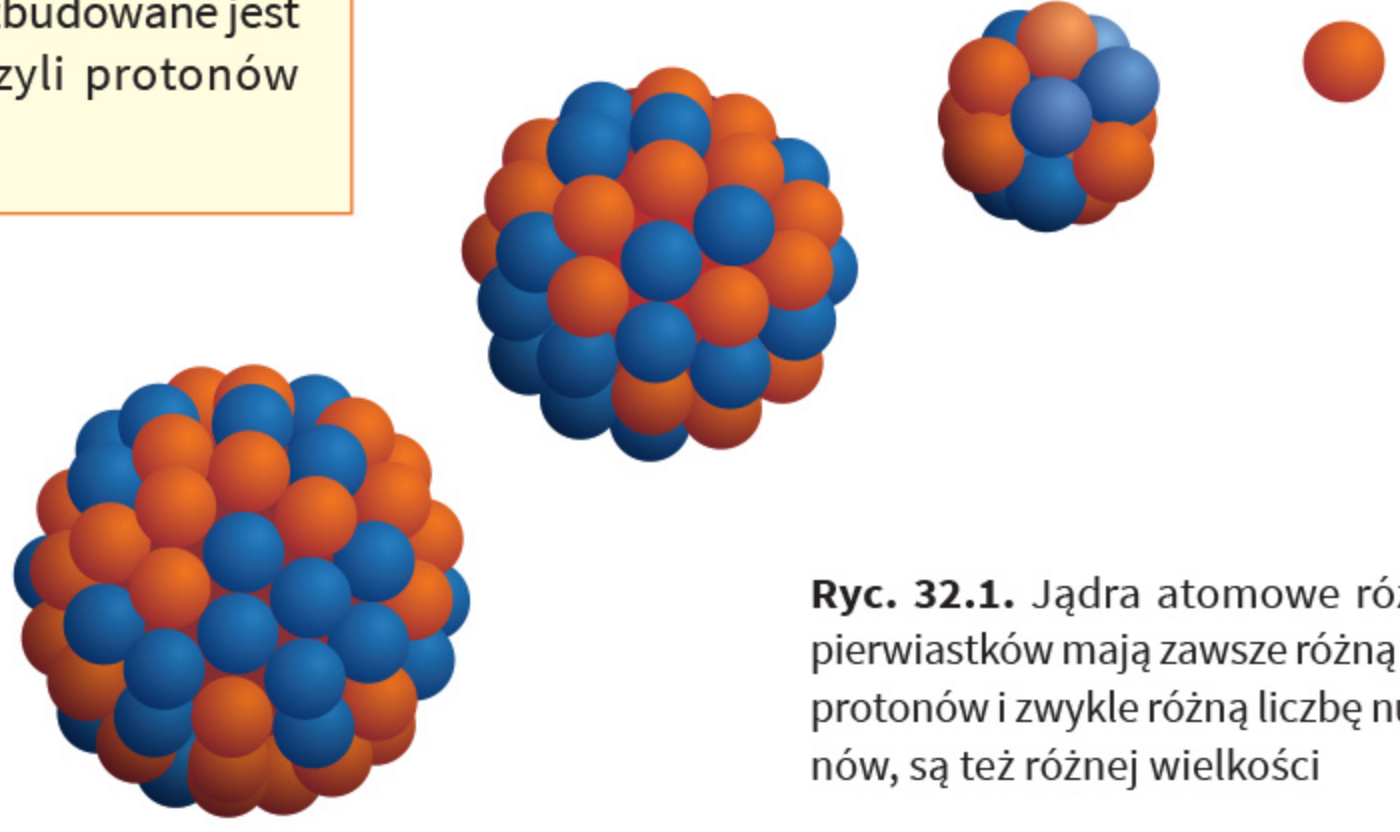
➔ **Przypomnij sobie**, jakie dane dotyczące budowy atomu można odczytać z układu okresowego pierwiastków.

Zjawiska, o których mówiliśmy w poprzednim dziale, były związane z procesami zachodzącymi w powłokach elektronowych atomu. Jądro atomowe, będące rdzeniem atomu, również ma pewną strukturę. Co więcej, przebiegają w nim procesy, których poznanie pozwoliło zarówno na opracowanie pewnych metod diagnostycznych w medycynie – choćby pozytonowej tomografii emisyjnej (PET) i rezonansu magnetycznego (MRI) – jak i na rozwój energetyki jądrowej.

## Budowa jądra atomowego

Jądro atomu wodoru, najlżejszego i najprostszego atomu, stanowi pojedynczy proton, czyli cząstka o dodatnim ładunku elementarnym i masie niemal dwa tysiące razy większej od masy elektronu. W jądrze każdego atomu znajdują się protony, a ich liczba jest równa liczbie elektronów na powłokach, dzięki czemu atomy są elektrycznie obojętne. Liczba protonów jest charakterystyczna dla danego pierwiastka, np. w jądrze węgla jest zawsze 6 protonów. W jądrze zwykle znajdują się również neutrony, czyli cząstki o masie trochę większej od masy protonu, ale nieposiadające ładunku. Protony i neutrony mają wspólną nazwę – **nukleony**. Jądro atomowe można sobie wyobrazić jako maleńką kulkę złożoną z bardzo gęsto ułożonych nukleonów (ryc. 32.1).

Jądro atomowe zbudowane jest z nukleonów, czyli protonów i neutronów.



**Ryc. 32.1.** Jądra atomowe różnych pierwiastków mają zawsze różną liczbę protonów i zwykle różną liczbę nukleonów, są też różnej wielkości

s. 352

Jeden nukleon ma średnicę ok. $10^{-15}$ m, a jądra atomowe – średnice rzędu $10^{-14}$ m. Atomy mają średnice rzędu $10^{-10}$ m, więc jądra są co najmniej 10 000 razy od nich mniejsze. W skali atomowej elektrony znajdują się zatem bardzo daleko od jądra i dlatego nie mają wpływu na jego budowę.

## Siły jądrowe

Skoro jądra atomowe składają się z protonów, które elektrycznie się odpychają, to co sprawia, że w ogóle istnieją? Okazuje się, że między nukleonami działają siły dużo większe od elektrycznych. Nazywamy je **siłami jądrowymi.** Działają one wyłącznie na bardzo małych odległościach, w zasadzie tylko między bezpośrednio „stykającymi" się nukleonami, więc nie są wprost obserwowane w świecie makroskopowym. Oddziaływania jądrowe są jednak najsilniejszymi oddziaływaniami w przyrodzie. To dlatego wiele jąder atomowych ma strukturę bardzo trwałą mimo silnego odpychania elektrycznego między protonami.

**Siły jądrowe** to siły oddziaływania między nukleonami, działające na odległościach rzędu średnicy nukleonu.

**PRZYKŁAD 1.**

Oszacujmy, jaką siłą elektryczną odpychają się dwa protony stykające się ze sobą w jądrze oraz jakie przyspieszenie nadałaby im ta siła, gdyby nie było sił jądrowych. Odległość między protonami to $10^{-15}$ m, a masa protonu wynosi $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg.

Siłę obliczamy z prawa Coulomba:

$$F = k\frac{e^2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \ \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{(1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C})^2}{(10^{-15}\ \mathrm{m})^2} \approx 230\ \mathrm{N}$$

To na tyle duża wartość, że przeciętnemu człowiekowi trudno byłoby przytrzymać obiema rękami tak odpychające się protony. Siły jądrowe, którymi nukleony są ze sobą związane, muszą być wobec tego jeszcze większe.

Przyspieszenie protonu pod wpływem siły odpychania obliczamy z II zasady dynamiki:

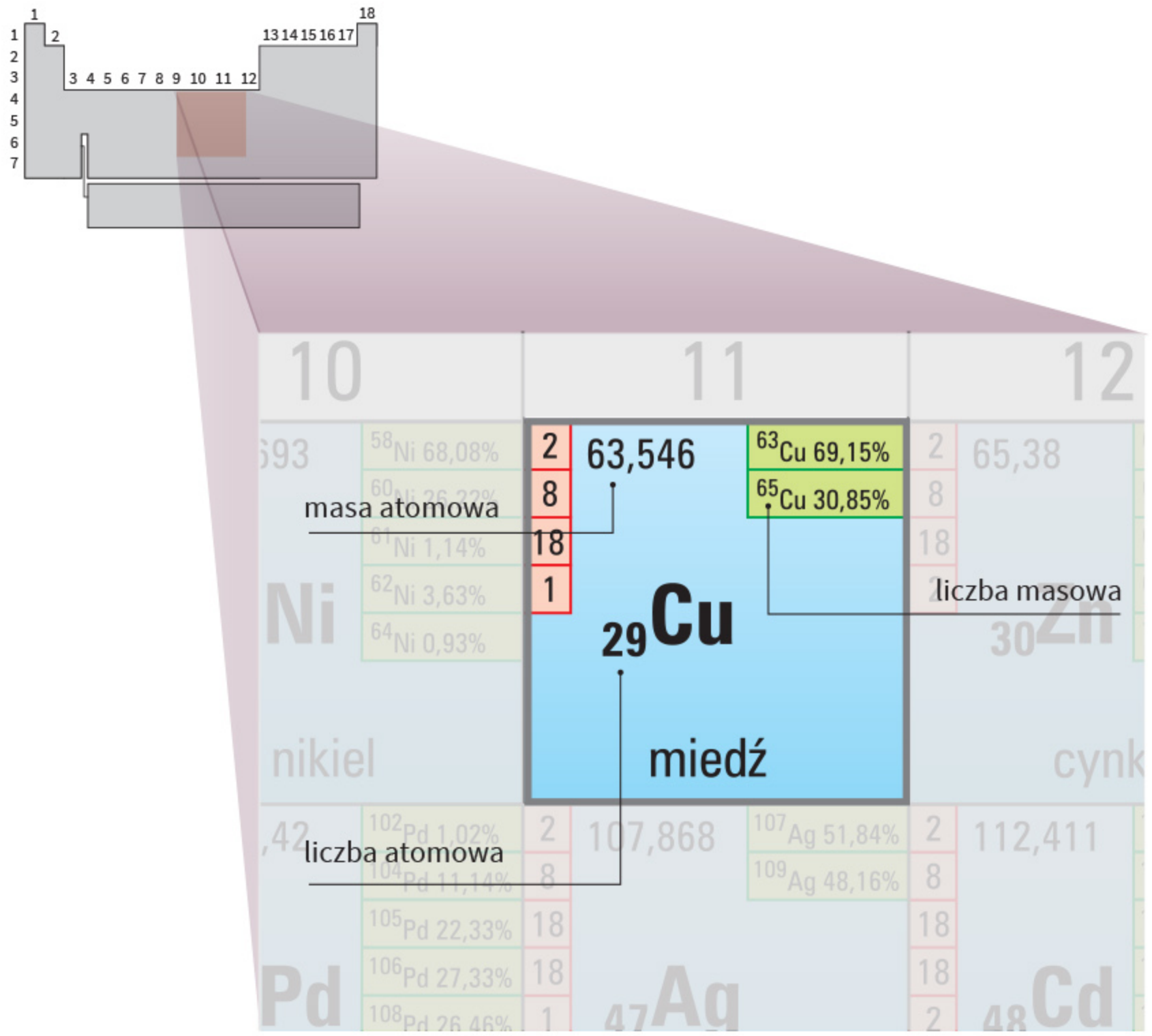
$$a = \frac{F}{m} = \frac{230\ \mathrm{N}}{1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}} \approx 1{,}4 \cdot 10^{29}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}$$

To przyspieszenie niewyobrażalne w świecie makroskopowym.

## Skład jądra atomowego a układ okresowy pierwiastków. Izotopy

Informacje dotyczące składu jądra atomowego danego atomu są zawarte w układzie okresowym pierwiastków. Liczba atomowa $Z$ wskazuje liczbę protonów, a liczba masowa $A$ – liczbę wszystkich nukleonów w jądrze (ryc. 32.2). Liczbę neutronów uzyskamy, gdy od liczby masowej odejmiemy liczbę atomową:

$$N = A - Z$$




**Ryc. 32.2.** W układzie okresowym pierwiastków są zawarte informacje o składzie jądra atomowego danego pierwiastka

**Liczba atomowa** *Z* określa liczbę protonów, a **liczba masowa** *A* – liczbę wszystkich nukleonów w jądrze atomu.

W układzie okresowym pierwiastków dołączonym do podręcznika dla większości pierwiastków podano kilka liczb masowych. Oznacza to, że w przyrodzie atomy danego pierwiastka mogą różnić się liczbą nukleonów w jądrze. Na przykład atomy miedzi (Cu) mogą mieć ich w jądrze albo 63, albo 65. Ponieważ liczba protonów jest stała dla danego pierwiastka i dla miedzi wynosi ona 29, w jądrach atomów miedzi znajdziemy różną liczbę neutronów – albo 34, albo 36. Te dwie odmiany atomów to różne **izotopy** miedzi. W miedzianym druciku są one wymieszane ze sobą, nie da się ich rozdzielić w reakcji chemicznej.

**Izotopy** to atomy tego samego pierwiastka o różnej liczbie neutronów w jądrze.

Właściwości fizyczne izotopów tego samego pierwiastka mogą się znacznie różnić. W związku z tym w fizyce jądrowej stosuje się zapis, który jednoznacznie określa skład

jądra. Obok symbolu pierwiastka w indeksie dolnym zapisuje się liczbę atomową, a w indeksie górnym – masową, np. $^{63}_{29}\mathrm{Cu}$, $^{200}_{80}\mathrm{Hg}$, $^{238}_{92}\mathrm{U}$ (czytamy: izotop miedzi 63, izotop rtęci 200, izotop uranu 238). Czasem pomija się w zapisie liczbę atomową, gdyż symbol jednoznacznie określa pierwiastek, a tym samym liczbę protonów w jądrze atomu.

Z układu okresowego zamieszczonego w podręczniku możemy odczytać, które izotopy danego pierwiastka występują w przyrodzie i jaka jest ich procentowa zawartość na Ziemi (ryc. 32.2). W laboratoriach fizycznych wytwarza się izotopy, które nie mogłyby powstać naturalnie, ale mają zastosowania w badaniach naukowych czy w medycynie.

Izotopy tego samego pierwiastka mają różną masę ze względu na różną liczbę nukleonów. Wobec tego masa atomowa pierwiastka podana w układzie okresowym jest średnią masą atomu, obliczoną z uwzględnieniem procentowej zawartości izotopów tego pierwiastka występujących w przyrodzie. Wyrażona jest w jednostkach masy atomowej ($1\ \mathrm{u} = 1{,}661 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$; 1 u to ½₂ masy atomu węgla $^{12}\mathrm{C}$).

**PRZYKŁAD 2.**

Ile wynoszą masy protonu, neutronu i elektronu wyrażone w jednostkach masy atomowej?

Z tabeli stałych fizycznych i astronomicznych znajdującej się na końcu podręcznika odczytujemy masy nukleonów i elektronu:

$$m_\mathrm{p} = 1{,}673 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

$$m_\mathrm{n} = 1{,}675 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

$$m_\mathrm{e} = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$$

Wiemy, że:

$$1\ \mathrm{u} = 1{,}661 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

zatem:

$$1\ \mathrm{kg} = \frac{1\ \mathrm{u}}{1{,}661 \cdot 10^{-27}} \approx 6{,}02 \cdot 10^{26}\ \mathrm{u}$$

Wobec tego otrzymujemy:

$$m_\mathrm{p} = 1{,}673 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} \approx 1{,}673 \cdot 10^{-27} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{26}\ \mathrm{u} \approx 1{,}0071\ \mathrm{u}$$

$$m_\mathrm{n} = 1{,}675 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} \approx 1{,}675 \cdot 10^{-27} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{26}\ \mathrm{u} \approx 1{,}0084\ \mathrm{u}$$

$$m_\mathrm{e} = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg} \approx 9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{26}\ \mathrm{u} \approx 0{,}00055\ \mathrm{u}$$

Jednostka masy atomowej jest w przybliżeniu równa masie nukleonu, dlatego często stosuje się ją w fizyce jądrowej. Warto zauważyć, że choć masy protonu i neutronu są bardzo zbliżone, to ich różnica jest większa od masy elektronu.

## PODSUMOWANIE

- Jądro atomowe jest zbudowane z **nukleonów**, czyli z protonów i neutronów.
- Sąsiadujące nukleony w jądrze działają na siebie **siłami jądrowymi**.
- Atomy tego samego pierwiastka mogą się różnić liczbą neutronów w jądrze – tworzą wtedy różne **izotopy**.
- **Liczba atomowa** określa liczbę protonów w jądrze, **liczba masowa** – liczbę wszystkich nukleonów w jądrze.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Podaj skład jądra atomowego następujących izotopów: ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, ${}^{44}_{20}\mathrm{Ca}$, ${}^{96}_{42}\mathrm{Mo}$, ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$, ${}^{208}_{82}\mathrm{Pb}$, ${}^{122}_{50}\mathrm{Sn}$, ${}^{23}_{11}\mathrm{Na}$.
2. Odczytaj z układu okresowego i zapisz w zeszycie, jakie izotopy wapnia, złota, magnezu, fosforu i tlenu występują w przyrodzie.
3. Jednostka masy atomowej jest równa w przybliżeniu masie nukleonu w jądrze atomowym. Oblicz w przybliżeniu masę atomu złota ${}^{197}_{79}\mathrm{Au}$ w gramach. Oszacuj, ile atomów jest w złotym pierścionku o masie 3 g.
4. Promień jądra atomowego można w przybliżeniu obliczyć ze wzoru:

$$R = 1{,}2 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A}\ (\mathrm{m})$$

   gdzie $A$ jest liczbą masową.
   Oblicz promień jądra uranu ${}^{238}\mathrm{U}$.
5. Oszacuj, jaki procent objętości atomu stanowi jądro atomowe. Potrzebne dane znajdziesz w treści rozdziału.

# 33. Promieniowanie jądrowe

- Promieniotwórczość naturalna
- Rodzaje promieniowania jądrowego
- Reakcje rozpadów promieniotwórczych

➔ **Przypomnij sobie** budowę jądra atomowego i wiadomości na temat ruchu cząstki naładowanej w polu magnetycznym.

W 1896 roku francuski fizyk Henri Becquerel, prowadzący badania nad fosforescencją (świeceniem substancji wywołanym uprzednim naświetleniem), zauważył, że ruda uranowa położona na kliszy fotograficznej spowodowała jej zaczernienie, mimo że klisza była osłonięta od światła. W ten sposób zostało odkryte zjawisko promieniotwórczości.

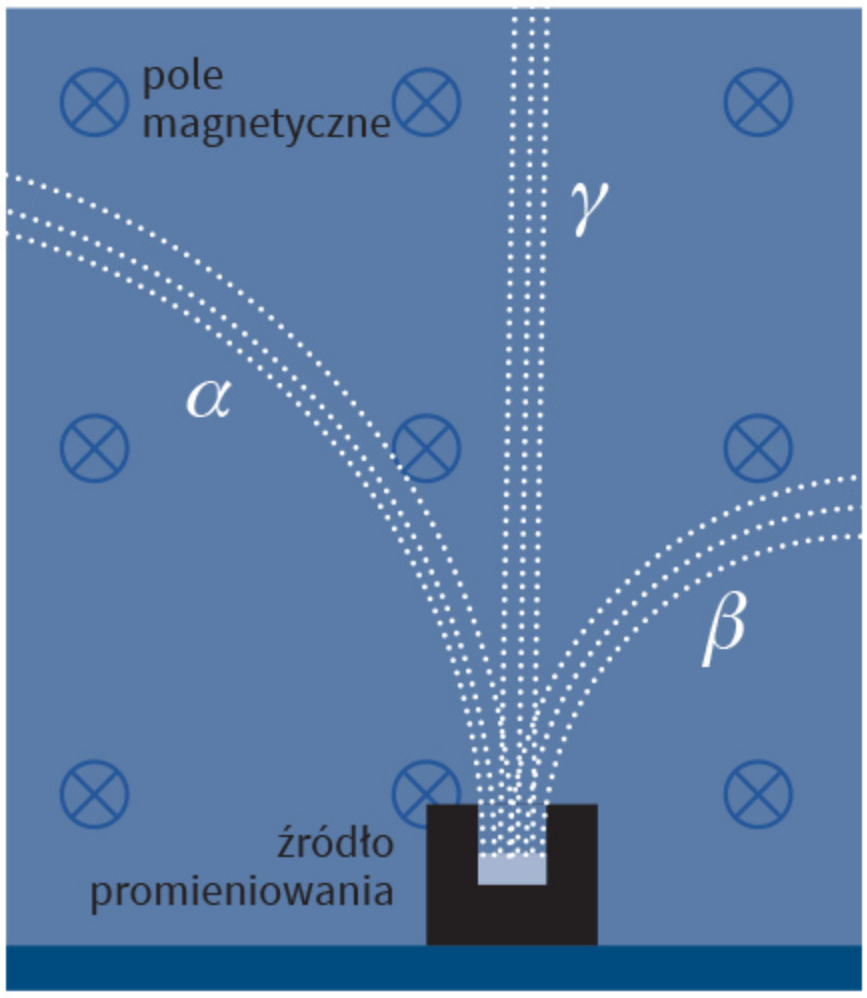
## Promieniotwórczość

Zjawiskiem promieniotwórczości zainteresowała się wówczas Maria Skłodowska-Curie, późniejsza dwukrotna laureatka Nagrody Nobla. Odkryła ona, że natężenie tego niewidzialnego promieniowania, które zaczernia kliszę fotograficzną, jest związane z liczbą atomów uranu zawartych w próbce, niezależnie od tego, w jakim związku chemicznym ten uran występuje. Później odkryto inne pierwiastki emitujące promieniowanie, podobnie jak uran. Takie pierwiastki nazywamy **promieniotwórczymi**. Gdy odkryto, że atomy zbudowane są z jądra atomowego i elektronów, uczeni zorientowali się, że odkryte promieniowanie pochodzi właśnie z jądra atomowego. Z tego powodu niewidzialne promieniowanie emitowane przez izotopy promieniotwórcze nazywamy **promieniowaniem jądrowym**.

Izotopy promieniotwórcze emitują promieniowanie jądrowe.

## Rozpad promieniotwórczy

Dziś wiemy, że emisja promieniowania jądrowego związana jest z przemianami zachodzącymi w jądrze atomu. Niektóre izotopy w przyrodzie – w tym wszystkie pierwiastki cięższe od bizmutu – są nietrwałe. Jądra tych izotopów są **niestabilne**, a więc bez żadnej zewnętrznej przyczyny, w sposób spontaniczny zmieniają swój skład (jądra izotopów trwałych nazywamy stabilnymi). Te przemiany nazywamy **rozpadem promieniotwórczym**. Towarzyszy im emisja promieniowania, które podczas przechodzenia przez materię powoduje jonizację atomów i narusza strukturę cząsteczek. Mówimy, że **promieniowanie**




**Ryc. 33.1.** W polu magnetycznym promieniowanie $\alpha$ i promieniowanie $\beta$ mogą poruszać się po zakrzywionym torze

**jądrowe jest jonizujące**. Głębokość, na jaką promieniowanie wnika w materię (czyli jego przenikliwość), a także zmiany kierunku jego rozchodzenia się wywołane polem magnetycznym, pozwoliły wyróżnić trzy rodzaje promieniowania jądrowego, które początkowo oznaczono jako alfa ($\alpha$), beta ($\beta$) i gamma ($\gamma$) (ryc. 33.1). Z oddziaływania pola magnetycznego na te trzy rodzaje promieniowania od razu wynika, że cząstki składające się na promieniowanie $\gamma$ nie mają ładunku elektrycznego. Promieniowanie $\alpha$ najwidoczniej składa się z cząstek o ładunku dodatnim, a $\beta$ z cząstek o ładunku ujemnym. Obecnie znamy naturę każdego z tych rodzajów promieniowania.

## WARTO WIEDZIEĆ

### Maria Skłodowska-Curie

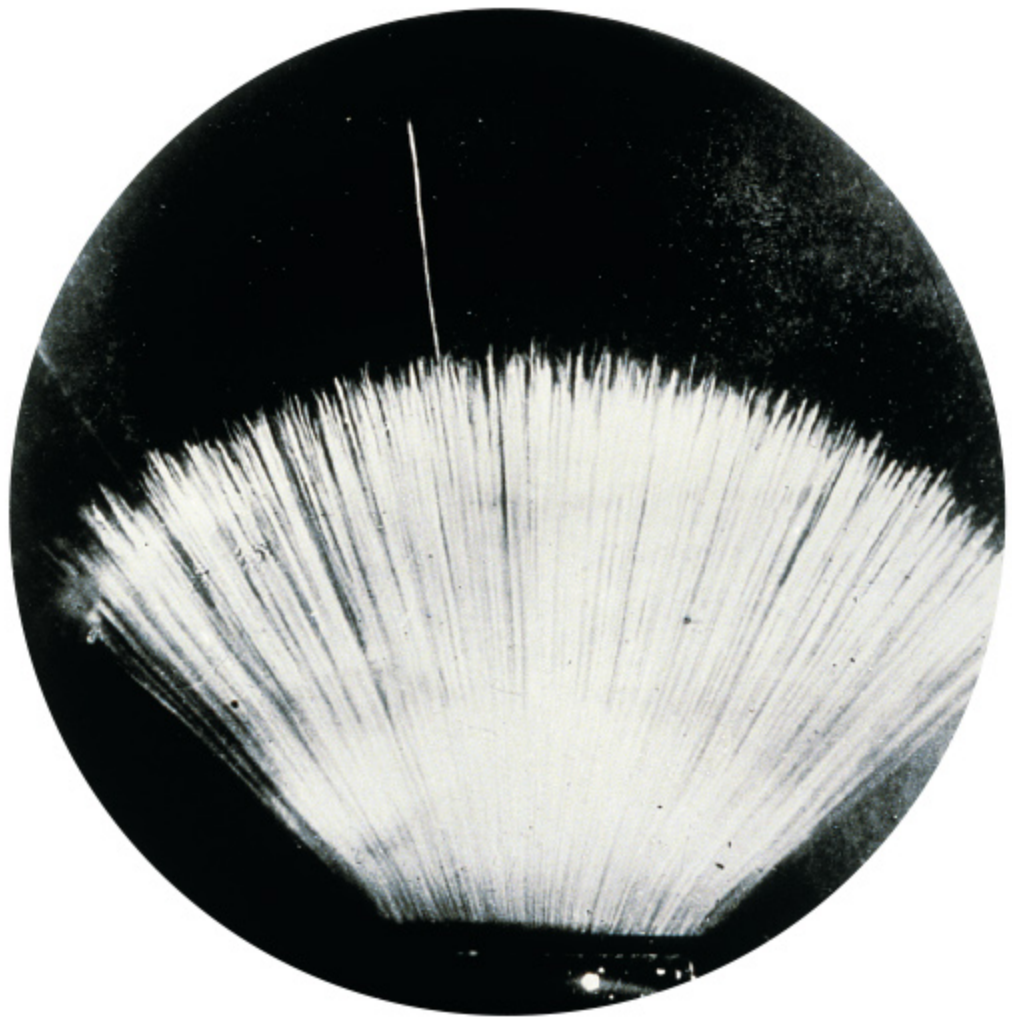
Urodziła się w Warszawie w 1867 roku. Już w gimnazjum, które ukończyła ze złotym medalem, wykazywała niebywałe zdolności, które w połączeniu z pracowitością zaowocowały późniejszymi sukcesami. Uniwersytet w Warszawie, pozostającej pod zaborem rosyjskim, nie przyjmował na studia kobiet, więc Maria Skłodowska ukończyła paryską Sorbonę. Tam też poznała swojego przyszłego męża Piotra Curie. Podczas badań nad promieniotwórczością Maria i Piotr odkryli dwa nowe pierwiastki występujące w przyrodzie – rad i polon.

Maria Skłodowska-Curie była bardzo ceniona w świecie naukowym i aż dwukrotnie została uhonorowana Nagrodą Nobla. Uczestniczyła w tzw. Kongresach Solvaya, które skupiały najwybitniejszych fizyków tamtego okresu. Do końca życia pracowała we Francji, ale utrzymywała ścisłe związki z Polską. Wygłaszała odczyty, publikowała w polskich czasopismach naukowych. Z jej inicjatywy powstał w Warszawie Instytut Radowy. Miała to być placówka przeznaczona, według jej słów, „nie tylko dla prac naukowych, lecz również dla leczenia chorych bez względu na zamożność”*. Instytut działa do dziś pod nazwą Narodowy Instytut Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie.

* M. Chorąży, *Książka o dawnym Instytucie Radowym i jego nowym wcieleniu – Centrum Onkologii*, „Nowotwory. Journal of Oncology” 2013, t. 63, nr 2, s. 183–184.

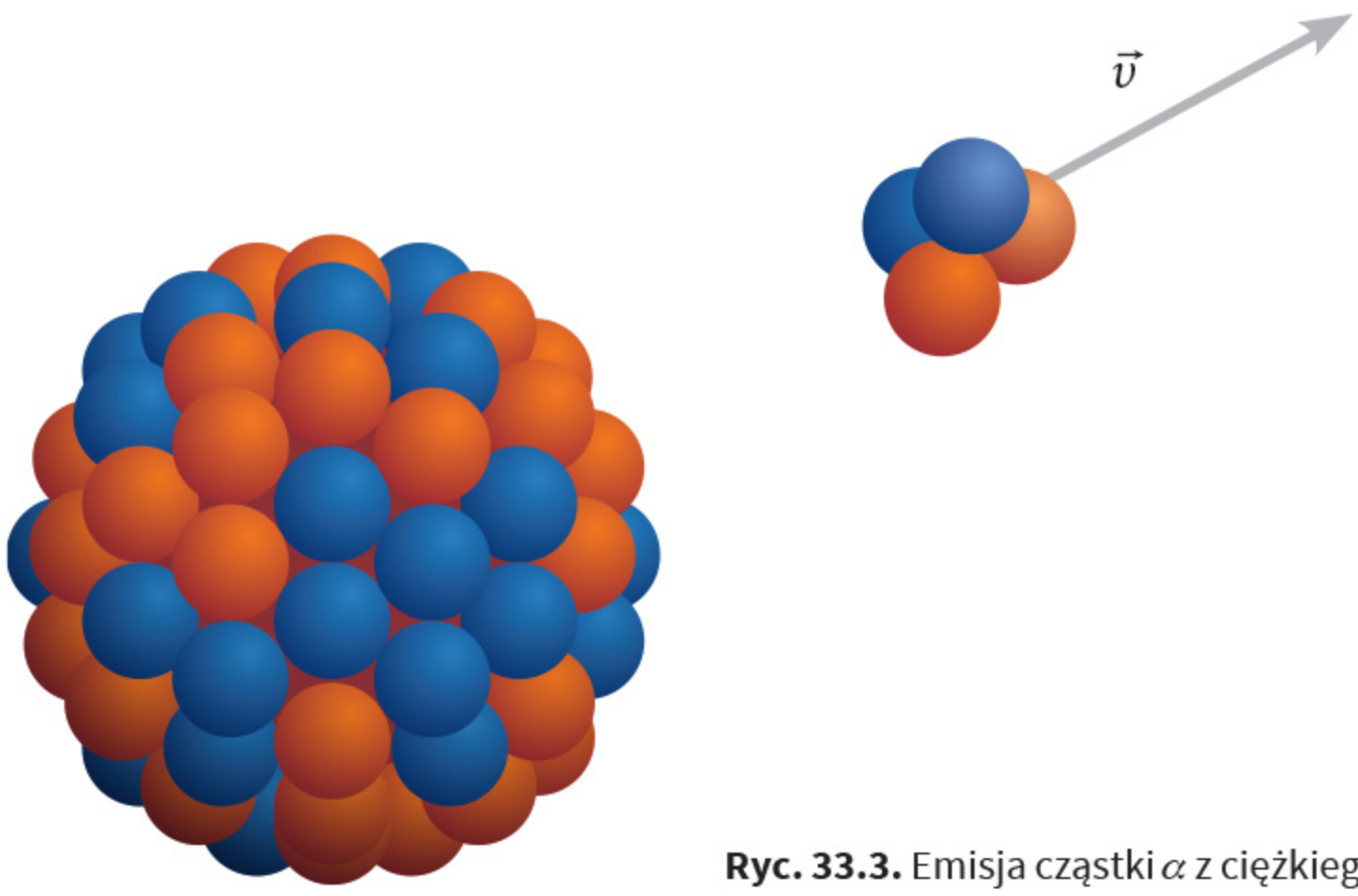
## Promieniowanie $\alpha$

Promieniowanie $\alpha$ (alfa) to strumień tzw. cząstek $\alpha$, czyli jąder helu ${}_2^4\mathrm{He}$, składających się z dwóch protonów i dwóch neutronów. Ten rodzaj promieniowania obserwuje się głównie w przypadku izotopów cięższych od bizmutu. Promieniowanie to jest praktycznie nieprzenikliwe: w powietrzu cząstki te mogą pokonać odległość kilku centymetrów, a w materii gęstszej (ciała stałe, ciecze) – ułamki milimetra. Promieniowanie $\alpha$ jest silnie jonizujące – pojedyncza cząstka, gdy przechodzi przez materię, pozostawia za sobą ślad w postaci ścieżki setek tysięcy jonów (ryc. 33.2). W wyniku bardzo dużej liczby zderzeń cząstki te szybko tracą energię, więc ich zasięg w materii jest niewielki.



**Ryc. 33.2.** Ślady cząstek $\alpha$ pozostawione w nasyconej parze wodnej w tzw. komorze Wilsona. Na wytworzonych przez cząstki jonach w wyniku kondensacji tworzą się kropelki wody

**Rozpad $\alpha$** to emisja z jądra atomowego jądra helu ${}_2^4\mathrm{He}$.




**Ryc. 33.3.** Emisja cząstki $\alpha$ z ciężkiego jądra atomowego

W wyniku rozpadu $\alpha$ zmienia się skład jądra atomowego, więc w konsekwencji dany atom zmienia się w inny (zmiana jądra powoduje też zmianę liczby elektronów tworzących powłoki i wymusza inną ich konfigurację). Powstaje wówczas jądro, które ma

o dwa protony i dwa neutrony mniej niż jądro przed rozpadem. Przykładem może być rozpad $\alpha$ jednego z izotopów uranu:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \xrightarrow{\alpha} {}^{234}_{90}\mathrm{Th}$$

Przemianę $\alpha$ można zapisać również w następujący sposób:

$$^{222}_{86}\mathrm{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\mathrm{Po} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

Rozpad $\alpha$ można zapisać wzorem ogólnym:

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

gdzie:
Z – liczba atomowa,
A – liczba masowa.

## Promieniowanie $\beta$

Promieniowanie $\beta$ (beta), również jonizujące, cechuje się znacznie większą przenikliwością niż promieniowanie $\alpha$. Jego zasięg w powietrzu może sięgać kilkuset metrów, a w ciałach stałych i cieczach wynosi kilka milimetrów (im większa gęstość substancji, tym mniejszy zasięg). Tym promieniowaniem jest strumień szybkich elektronów, emitowanych z jąder atomowych. Elektron powstaje w wyniku zachodzącej w jądrze przemiany neutronu w proton – neutron rozpada się na proton, elektron i antyneutrino $\bar{\nu}$:

$$\mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e} + \bar{\nu}$$

Taką przemianę nazywamy rozpadem $\beta$. Antyneutrino jest cząstką elementarną, która praktycznie nie oddziałuje z materią, więc jest niezwykle trudna do zaobserwowania. Dlatego będziemy ją pomijać w zapisie rozpadu $\beta$.

Rozpad $\beta$ zachodzi w jądrach atomowych, w których jest wyraźna przewaga neutronów nad protonami. Izotopy danego pierwiastka, które są cięższe od jego trwałych izotopów występujących w przyrodzie, są $\beta$-promieniotwórcze.

W wyniku rozpadu $\beta$ także zmienia się skład jądra. Nowe jądro ma tę samą liczbę nukleonów (czyli liczbę masową), ale o jeden proton więcej (liczba atomowa jest większa o 1). Rozpad $\beta$ zachodzi np. w jądrze izotopu węgla $^{14}_{6}\mathrm{C}$:

$$^{14}_{6}\mathrm{C} \xrightarrow{\beta} {}^{14}_{7}\mathrm{N}$$

Przemianę $\beta$ można zapisać również w inny sposób:

$$^{110}_{47}\mathrm{Ag} \rightarrow {}^{110}_{48}\mathrm{Cd} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

W tym zapisie liczbę w dolnym indeksie możemy rozumieć jako wielokrotność ładunku elementarnego, liczba w indeksie górnym to liczba nukleonów (elektron nie jest nukleonem, dlatego w indeksie górnym wpisujemy 0, a ponieważ ma ładunek przeciwny do

protonu, w indeksie dolnym wpisujemy –1). Zapis ten pokazuje wprost **zasadę zachowania ładunku elektrycznego**.
Rozpad $\beta$ zapisany ogólnie będzie miał postać:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$$

**Rozpad $\beta$** to rozpad jednego neutronu w jądrze na proton i elektron.

We wszystkich przemianach jądrowych liczba nukleonów się nie zmienia. Tę prawidłowość nazywamy **zasadą zachowania liczby nukleonów**. To z tej zasady i zasady zachowania ładunku wynika, że suma liczb w indeksach górnych i dolnych po obu stronach zapisu przemiany jądrowej musi się zgadzać.

WARTO WIEDZIEĆ

**Promieniowanie $\beta^+$**

W latach trzydziestych XX wieku odkryto izotopy, które emitują promieniowanie o właściwościach podobnych do promieniowania $\beta$, składające się z cząstek o masie elektronu, ale o ładunku dodatnim. Promieniowanie to nazwano promieniowaniem $\beta^+$, a te cząstki – pozytonami. W izotopach $\beta^+$-promieniotwórczych jeden z protonów zmienia się w neutron i emituje przy tym pozyton $e^+$ oraz neutrino $\nu$:

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu$$

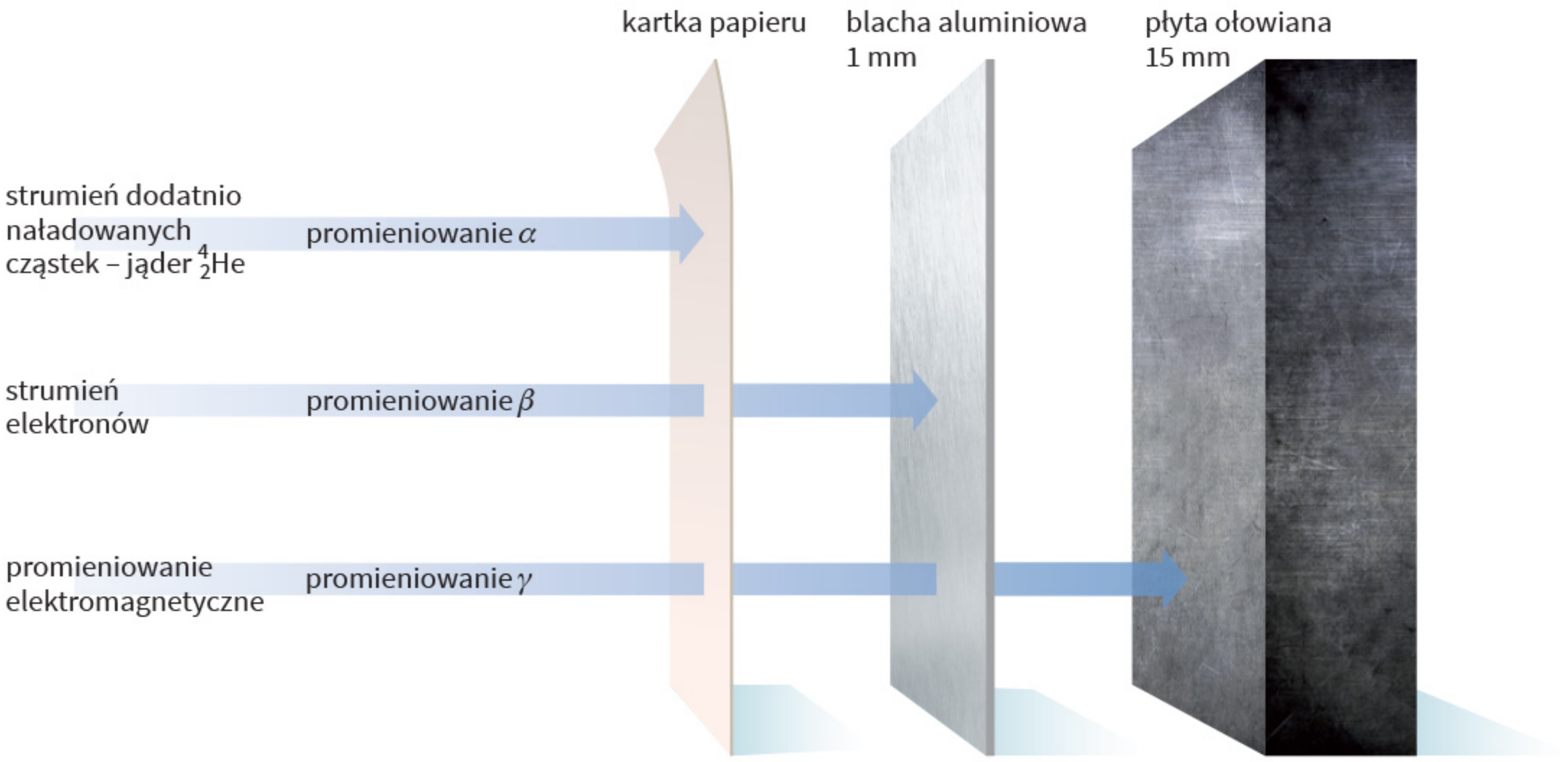
Przykładem takiego izotopu jest występujący w glebie w znikomych ilościach izotop potasu:

$$^{40}_{19}K \rightarrow {}^{40}_{18}Ar + {}^{0}_{+1}e$$

## Promieniowanie $\gamma$

Promieniowanie $\gamma$ (gamma), jeden z zakresów fal elektromagnetycznych, to strumień wysokoenergetycznych fotonów. Jest ono bardzo przenikliwe – potrzeba kilkucentymetrowych blach ołowianych lub znacznie grubszych warstw betonu, aby się przed nim osłonić. Duża przenikliwość świadczy o tym, że promieniowanie $\gamma$ słabo oddziałuje z materią, więc na swojej drodze zostawia niewiele jonów.
Emisja fotonu $\gamma$ towarzyszy rozpadom $\alpha$ i $\beta$. Po emisji cząstki $\alpha$ lub $\beta$ w jądrze zwalniają się stany o niższych energiach, które mogą być zajęte przez niektóre nukleony. Takie jądro jest niestabilne. Gdy nukleony przechodzą do stanów o niższej energii, emitują przy tym fotony $\gamma$.

**Promieniowanie $\gamma$** to strumień wysokoenergetycznych fotonów emitowanych z jądra atomowego.




**Ryc. 33.4.** Przenikliwość promieniowania jądrowego

**PRZYKŁAD 1.**

Jądro polonu $^{214}_{84}$Po rozpada się w kilku etapach na trwałe jądro ołowiu $^{206}_{82}$Pb. Ustalmy, ile rozpadów $\alpha$ i $\beta$ następuje w tym szeregu przemian.

Rozpad $\beta$ nie powoduje zmiany liczby masowej (liczby nukleonów), natomiast rozpad $\alpha$ zmniejsza ją o 4. Wobec tego możemy obliczyć liczbę rozpadów $\alpha$:

$$\frac{214 - 206}{4} = 2$$

Dwa rozpady $\alpha$ zmniejszają liczbę atomową o 4, czyli w wyniku tych rozpadów zmienia się liczba atomowa:

$$84 - 4 = 80$$

Każdy rozpad $\beta$ podwyższa liczbę atomową o 1. Skoro liczba atomowa ołowiu jest równa 82, liczba rozpadów $\beta$ to:

$$82 - 80 = 2$$

Stwierdzamy, że muszą nastąpić dwa rozpady $\alpha$ i dwa rozpady $\beta$, aby jądro $^{214}_{84}$Po przekształciło się w jądro $^{206}_{82}$Pb. Nie możemy jednak ustalić, ile było przemian $\gamma$, bo nie zmieniają one ani liczby masowej, ani atomowej.

## PODSUMOWANIE

- **Promieniotwórczość** to zjawisko emisji promieniowania jądrowego przez niektóre izotopy, nazywane promieniotwórczymi.
- **Rozpad promieniotwórczy** to samorzutna przemiana w jądrze atomowym zmieniająca jego skład.
- **Promieniowanie $\alpha$** to strumień jąder helu, a **promieniowanie $\beta$** – elektronów. Po emisji każdego z tych rodzajów promieniowania zmienia się skład jądra atomowego.
- **Promieniowanie $\gamma$** to strumień wysokoenergetycznych fotonów. Towarzyszy ono rozpadom $\alpha$ i $\beta$. Po emisji fotonu skład jądra atomowego nie ulega zmianie.

## PYTANIA I ZADANIA

**1.** Przepisz do zeszytu i dokończ poniższe zapisy przemian jądrowych.

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \xrightarrow{\alpha} \qquad ^{8}_{3}\mathrm{Li} \xrightarrow{\beta}$$

$$^{240}_{94}\mathrm{Pu} \xrightarrow{\alpha} \qquad ^{210}_{84}\mathrm{Po} \xrightarrow{\alpha}$$

$$^{229}_{89}\mathrm{Ac} \xrightarrow{\beta} \qquad ^{183}_{74}\mathrm{W} \xrightarrow{\gamma}$$

$$^{117}_{50}\mathrm{Sn} \xrightarrow{\gamma} \qquad ^{24}_{11}\mathrm{Na} \xrightarrow{\beta}$$

**2.** Które z wymienionych izotopów są $\beta$-promieniotwórcze: $^{58}\mathrm{Mn}$, $^{64}\mathrm{Co}$, $^{127}\mathrm{I}$, $^{44}\mathrm{K}$, $^{12}\mathrm{C}$, $^{3}\mathrm{H}$? Wskazówka: porównaj liczby masowe danych izotopów oraz tych w układzie okresowym pierwiastków.

**3.** W skałach zawierających uran znajdują się pojedyncze atomy helu. Jak można wyjaśnić ich obecność w tych skałach?

**4.** Pierwiastki ciężkie występujące w przyrodzie tworzą tzw. szeregi promieniotwórcze. Oznacza to, że jądro, które powstało z rozpadu jądra atomu danego pierwiastka, jest również nietrwałe i powstaje z niego inne jądro, również promieniotwórcze itd., aż do przekształcenia w trwały izotop ołowiu.
Poniżej przedstawiony jest szereg uranowo-aktynowy:

$$^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{231}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{231}_{91}\mathrm{Pa} \rightarrow {}^{227}_{89}\mathrm{Ac} \rightarrow {}^{227}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{223}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{219}_{86}\mathrm{Rn} \rightarrow {}^{215}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{215}_{85}\mathrm{At} \rightarrow$$

$$^{211}_{83}\mathrm{Bi} \rightarrow {}^{207}_{81}\mathrm{Tl} \rightarrow {}^{207}_{82}\mathrm{Pb}$$

Przepisz szereg do zeszytu i wpisz nad strzałkami odpowiednie symbole rozpadów promieniotwórczych ($\alpha$ i $\beta$).

**5.** W ramach jednego z ćwiczeń w uniwersyteckiej pracowni jądrowej studenci badają promieniowanie jądrowe w różnych odległościach od próbki materiału promieniotwórczego. Niewielką próbkę zawierającą izotop promieniotwórczy mocuje się w uchwycie, a następnie ustawia się detektor w określonej odległości od niej. Detektor zlicza cząstki, które docierają do niego w ciągu sekundy (tzw. liczba zliczeń) (rys.). Potem zmienia się odległość detektora od próbki i ponownie wykonuje pomiary.

Wyniki pomiarów otrzymane przez grupę studentów przedstawia tabela.

| Odległość (cm) | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Liczba zliczeń | 9 | 11 | 14 | 18 | 25 | 36 | 56 | 100 | 225 | 900 |

**a)** Przedstaw na wykresie zależność liczby zliczeń detektora od odległości od próbki.
**b)** Na podstawie wykresu oszacuj liczbę zliczeń zarejestrowanych przez detektor w odległości 22 cm od próbki.
**c)** Jaki rodzaj promieniowania – $\alpha$ czy $\beta$ – badali studenci? Uzasadnij odpowiedź.

# 34. Prawo rozpadu promieniotwórczego

- Czas połowicznego rozpadu
- Prawo rozpadu promieniotwórczego

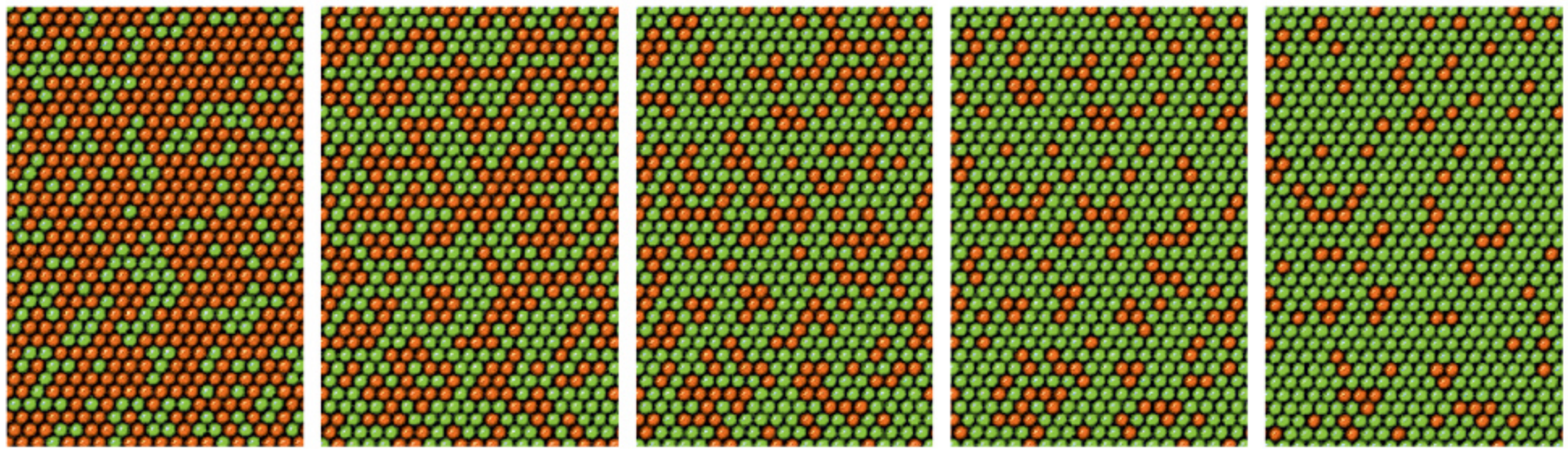
➔ **Przypomnij sobie** budowę jądra atomowego oraz informacje o rozpadzie promieniotwórczym.

Moment rozpadu promieniotwórczego pojedynczego jądra atomowego jest zupełnie nieprzewidywalny. Nie można go ani opóźnić, ani przyspieszyć. Jednak gdy mamy do czynienia z próbką izotopu składającą się z dużej liczby atomów, możemy zauważyć pewne prawidłowości związane z rozpadem promieniotwórczym.

## Zmiany składu próbki wraz z upływem czasu

Nie możemy przewidzieć momentu rozpadu konkretnego jądra, podobnie jak nie możemy przewidzieć liczby oczek w rzucie kostką do gry. Wiemy natomiast, że prawdopodobieństwo wyrzucenia np. szóstki to $^1/_6$, więc możemy z dobrą dokładnością przewidzieć, że gdy tysiąc osób rzuci jednocześnie kostkami, to wypadnie ok. 170 szóstek (bo $\frac{1}{6} \cdot 1000 \approx 170$). Podobnie jest w przypadku rozpadu promieniotwórczego: dla pojedynczego jądra znamy jedynie prawdopodobieństwo rozpadu w jednostce czasu, lecz właśnie dzięki temu jesteśmy w stanie przewidzieć liczbę rozpadów zachodzących w tym czasie w próbce zawierającej ogromną liczbę jąder.

Wyobraźmy sobie atomy w próbce izotopu promieniotwórczego (ryc. 34.1). Co jakiś czas losowo wybrane jądro atomu w wyniku rozpadu zmienia się w inne i powstaje atom innego pierwiastka. W miarę upływu czasu w próbce ubywa atomów izotopu

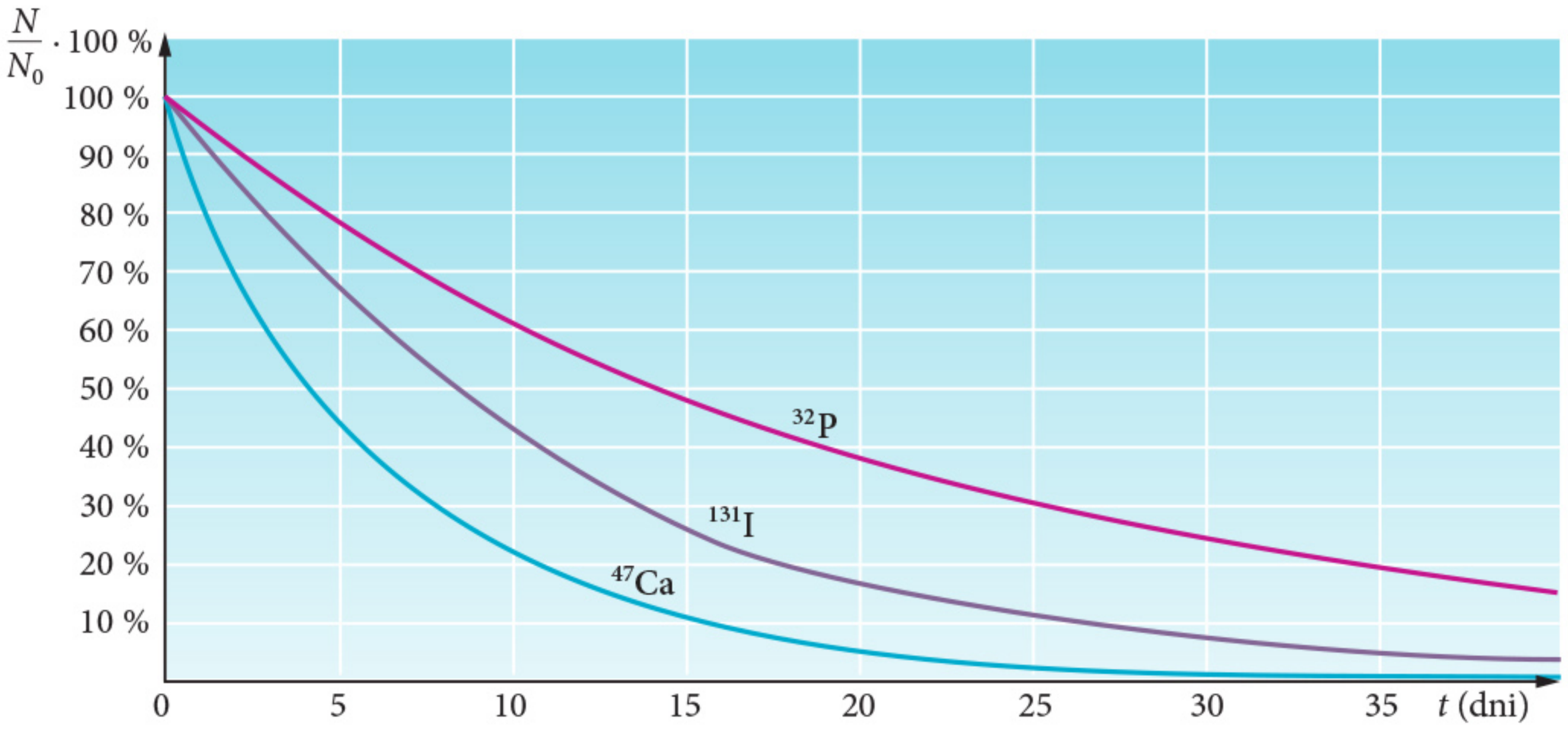


**Ryc. 34.1.** Liczba jąder izotopu promieniotwórczego (oznaczonych pomarańczowym kolorem) w próbce maleje z upływem czasu. Atomy tego izotopu są wymieszane z atomami powstałymi na skutek rozpadu

promieniotwórczego, rośnie za to liczba atomów nowego pierwiastka. Na rycinie 34.1 pomarańczowe kulki obrazują atomy izotopu promieniotwórczego, zielone – atomy powstałe na skutek rozpadu. Analizowana próbka składa się z wymieszanych ze sobą tych dwóch rodzajów atomów.

Liczba jąder izotopu promieniotwórczego w próbce maleje wraz z upływem czasu.

Zależność liczby jąder izotopu promieniotwórczego od czasu można przedstawić na wykresie. Rycina 34.2 przedstawia taką zależność dla trzech próbek różnych izotopów: $^{32}$P, $^{47}$Ca oraz $^{131}$I. Jeśli na osi pionowej zaznaczymy stosunek liczby jąder promieniotwórczych w danej chwili ($N$) do ich początkowej liczby ($N_0$) i wyrazimy go w procentach, to na początku pomiaru czasu będzie 100 % jąder. Jak widać, ta zależność nie jest liniowa. Dla każdego izotopu promieniotwórczego charakter zmian zachodzących w wyniku rozpadu jest podobny: liczba jąder tego izotopu szybko maleje na początku, kiedy w próbce jest go dużo, a gdy jego ilość jest mniejsza – maleje wolniej.

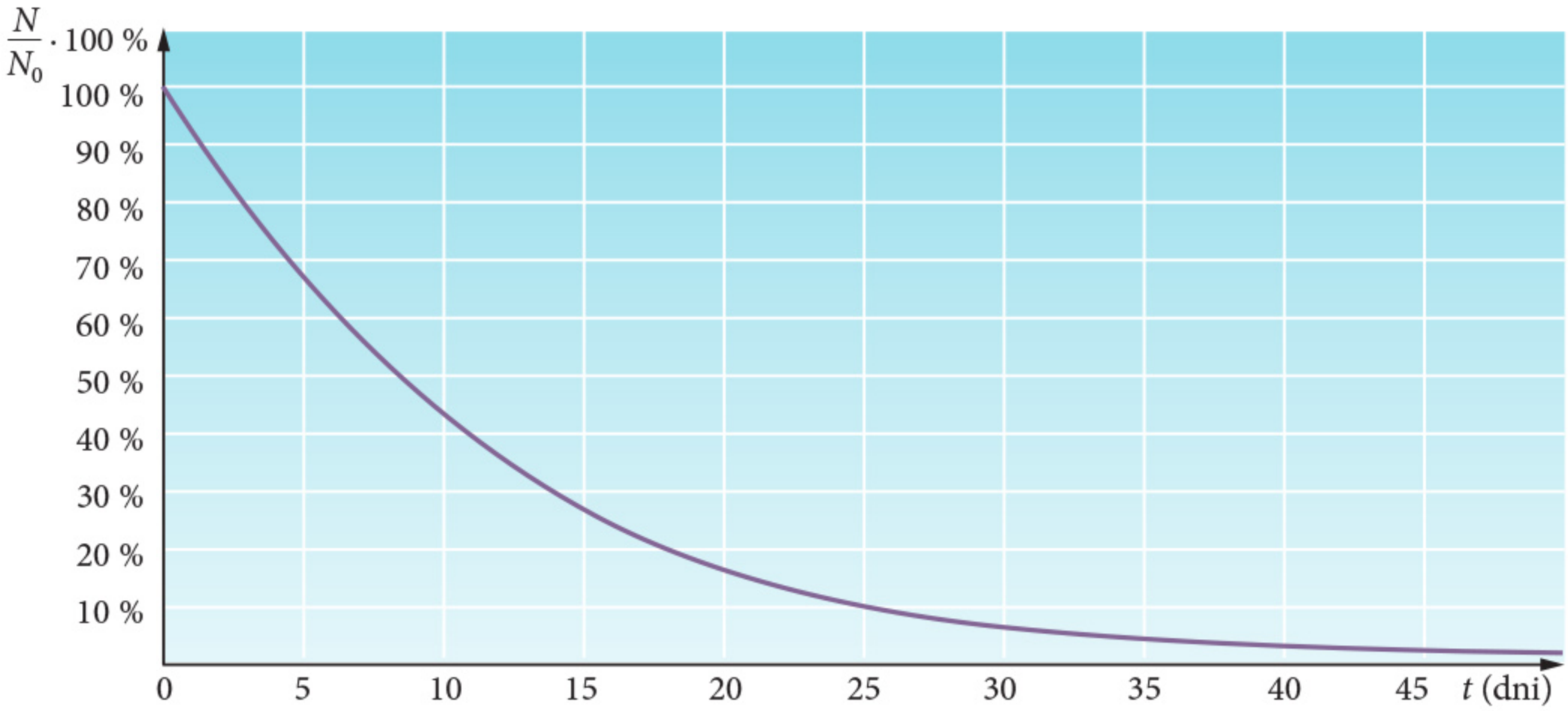



**Ryc. 34.2.** Wykresy zależności zawartości izotopu promieniotwórczego w próbce od czasu dla trzech różnych izotopów

## Czas połowicznego rozpadu

Przeanalizujmy dokładniej wykres opisujący rozpad jodu $^{131}$I (ryc. 34.3). Na początku pomiaru zawartość izotopu $^{131}$I w badanej próbce wynosiła 100 %. Po ośmiu dniach w próbce pozostała połowa jąder izotopu promieniotwórczego, gdyż pozostała część uległa rozpadowi. Po kolejnych ośmiu dniach pozostała połowa połowy, czyli 25 % zawartości początkowej, po kolejnych ośmiu dniach – 12,5 %, czyli połowa poprzedniej ilości – i tak dalej.

s. 348




**Ryc. 34.3.** Wykres zależności zawartości procentowej izotopu jodu $^{131}$I w próbce od czasu

Dla innych izotopów zawartość jąder promieniotwórczych w próbce zmienia się zgodnie z tą samą regułą, inny jest tylko czas, po którym pozostaje połowa pierwotnej zawartości izotopu. Ten czas nazywa się czasem (lub okresem) połowicznego rozpadu (lub zaniku).

**Czas połowicznego rozpadu $T_{1/2}$** to czas, w którym rozpada się połowa jąder izotopu promieniotwórczego w danej próbce.

Czas połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ jest określony dla danego izotopu. Im jest on krótszy, tym izotop szybciej się rozpada i jego ilość szybciej maleje. Może on być bardzo krótki i trwać ułamki sekund, a może być bardzo długi i sięgać nawet miliardów lat (tabela 1).

**Tabela 1.** Czas połowicznego rozpadu niektórych izotopów promieniotwórczych

| Izotop promieniotwórczy | Czas połowicznego rozpadu |
|---|---|
| krypton $^{95}_{36}$Kr ($\beta$) | 0,8 sekundy |
| kobalt $^{63}_{27}$Co ($\beta$) | 33 sekundy |
| cez $^{139}_{55}$Cs ($\beta$) | 9 minut |
| sód $^{24}_{11}$Na ($\beta$) | 15,3 godziny |
| radon $^{222}_{86}$Rn ($\alpha$) | 3,8 dnia |
| bizmut $^{210}_{83}$Bi ($\beta$) | 5 dni |
| polon $^{210}_{84}$Po ($\alpha$) | 138 dni |
| rad $^{226}_{88}$Ra ($\alpha$) | 1600 lat |
| węgiel $^{14}_{6}$C ($\beta$) | 5730 lat |
| uran $^{238}_{92}$U ($\alpha$) | 4,5 miliarda lat |

## Prawo rozpadu promieniotwórczego

Prawidłowość zmian zawartości izotopu promieniotwórczego w próbce wraz z upływem czasu nazywamy **prawem rozpadu promieniotwórczego**.

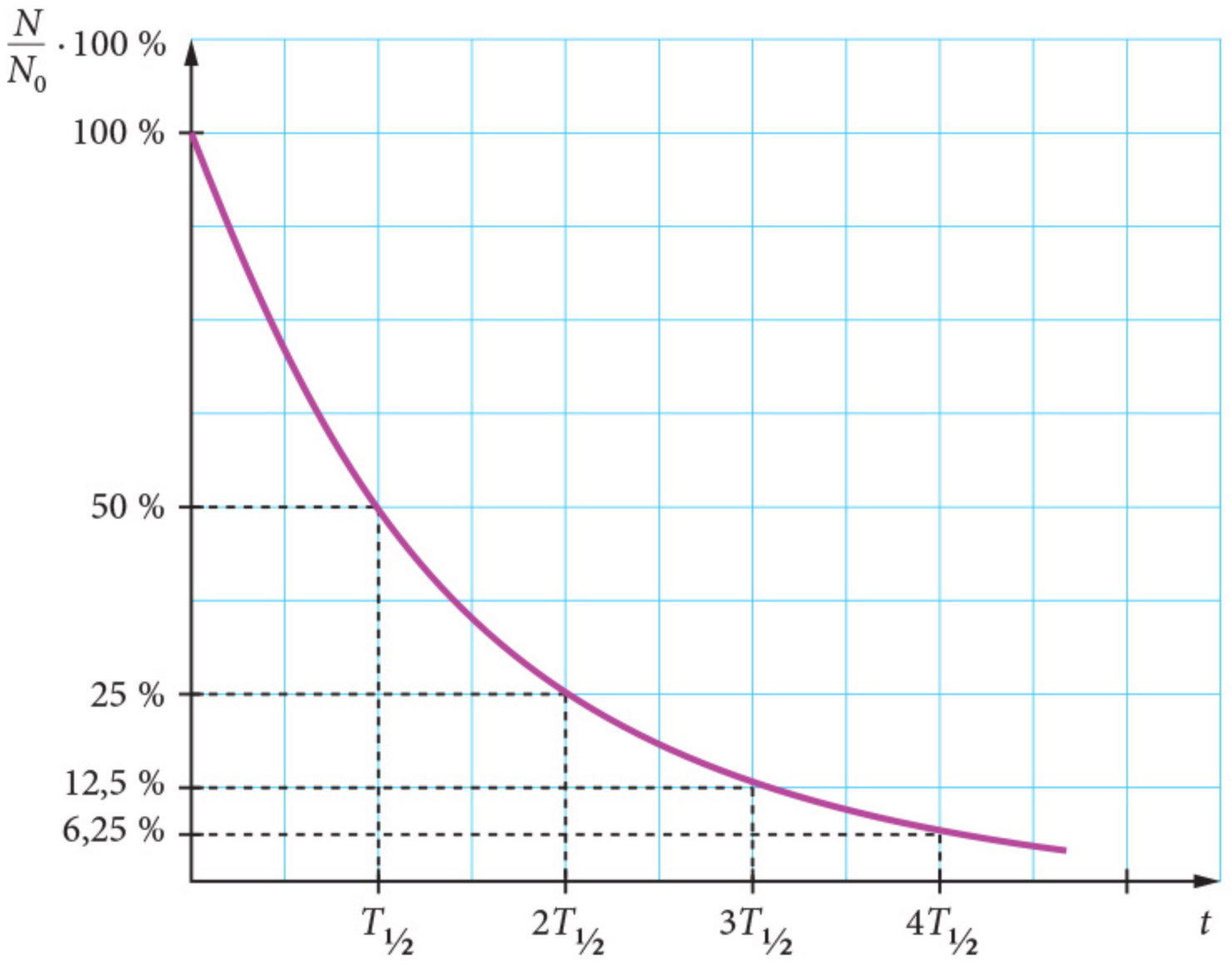
s. 348

Przeanalizujmy wykres na rycinie 34.4. Po upływie czasu równego okresowi połowicznego rozpadu liczba jąder zmniejsza się dwukrotnie, po dwóch okresach – $2^2$ razy, po trzech – $2^3$ razy itd. Zawartość jąder promieniotwórczych w próbce można wyrazić wzorem:

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n \qquad (1)$$

gdzie $n$ – liczba okresów połowicznego rozpadu, które upłynęły od początku obserwacji.

Gdy znana jest początkowa liczba jąder promieniotwórczych $N_0$, z tego wzoru można obliczyć, ile jąder promieniotwórczych pozostanie w próbce po czasie będącym wielokrotnością okresu połowicznego rozpadu $t = nT_{1/2}$.




**Ryc. 34.4.** Zależność procentowej zawartości jąder dowolnego izotopu promieniotwórczego od czasu

**PRZYKŁAD 1.**

Oszacujmy, jaka część jąder promieniotwórczego jodu $^{131}$I rozsianego po katastrofie elektrowni w Czarnobylu pozostała w naszym otoczeniu do wiosny 2020 roku. Dla tego izotopu jodu $T_{1/2} = 8$ dni, a katastrofa wydarzyła się w kwietniu 1986 roku.

Od daty katastrofy do kwietnia 2020 roku minęło $34 \cdot 365 \approx 12\,400$ dni, czyli $n = 12\,400 : 8 = 1550$ okresów połowicznego rozpadu jodu $^{131}$I. Ze wzoru (1) możemy obliczyć, jaka część początkowej liczby jąder promieniotwórczych nie uległa rozpadowi:

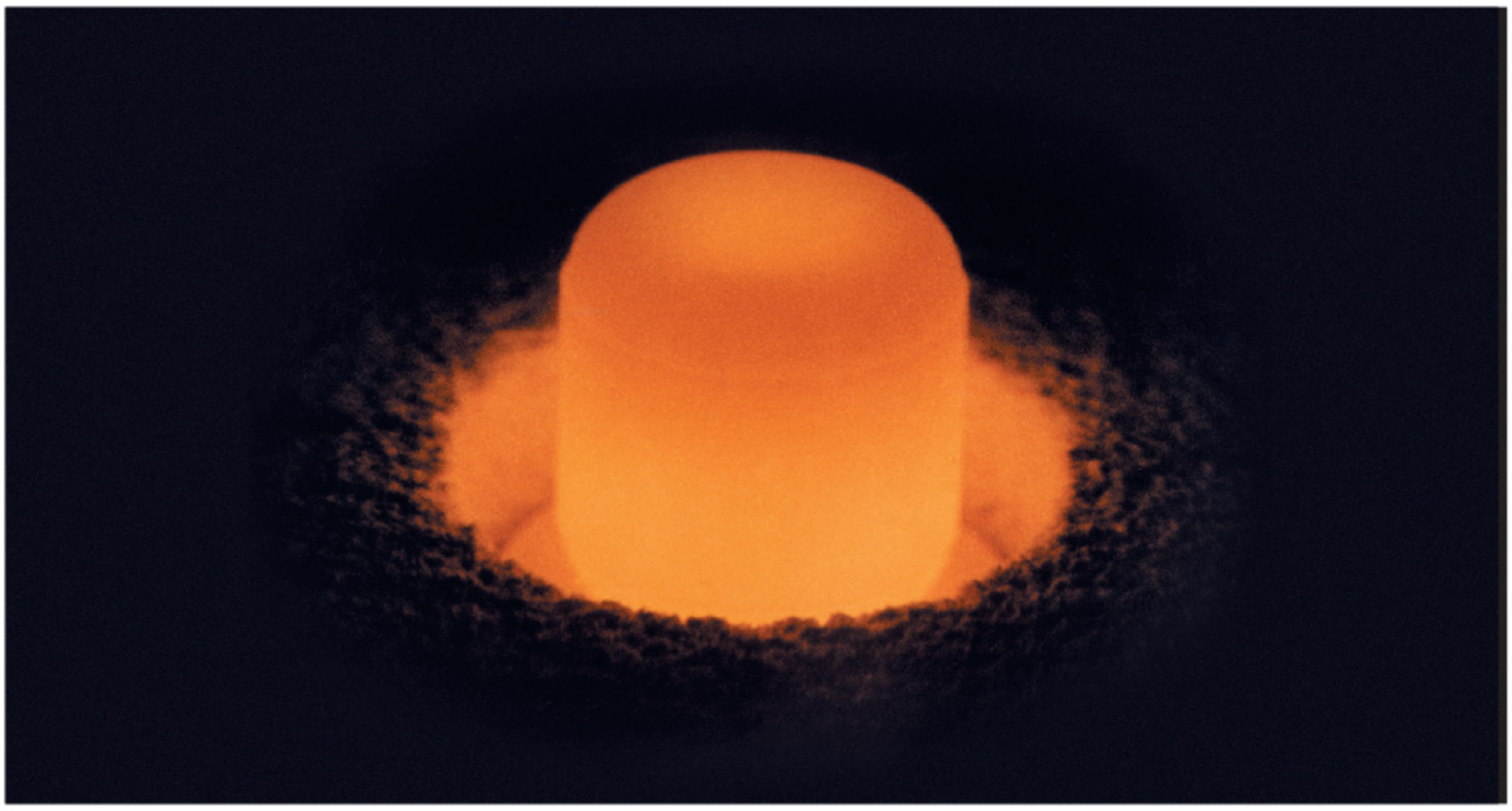
$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n = 0{,}5^{1550} \approx 2{,}5 \cdot 10^{-467}$$

Otrzymana liczba jest w praktyce nieodróżnialna od zera, a to oznacza, że jod rozpadł się już dawno temu.

## WARTO WIEDZIEĆ

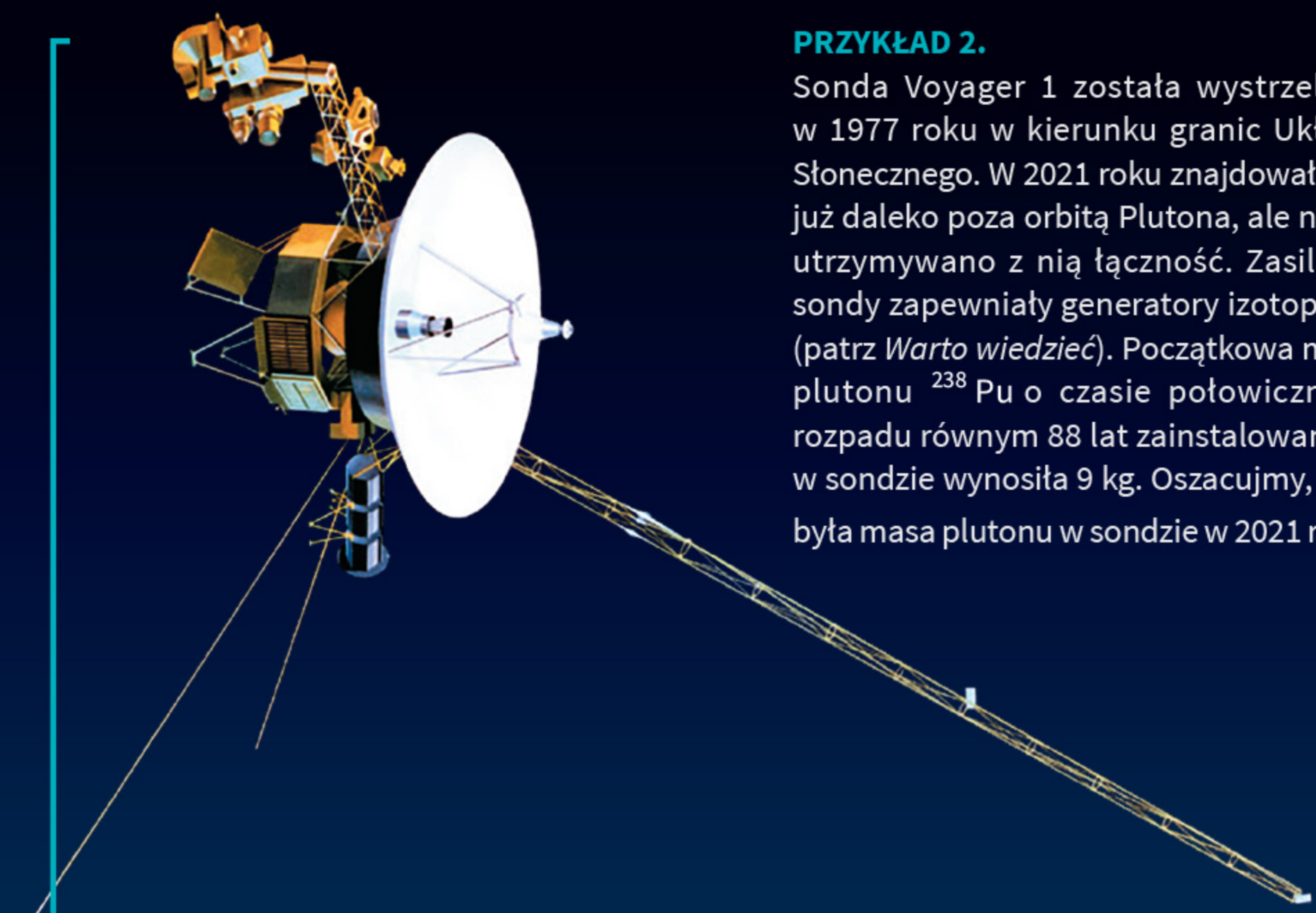
**Rozpad promieniotwórczy jako źródło energii**

Każdy rozpad promieniotwórczy wiąże się z emisją jakiejś cząstki. Gdy cząstki nie opuszczają próbki (np. cząstki $\alpha$ ze względu na znikomy zasięg), przekazują jej swoją energię, dzięki czemu próbki o dużej aktywności (czyli dużej liczbie rozpadów zachodzących w ciągu sekundy) stają się ciepłe, a nawet gorące.



Próbka plutonu rozgrzana w wyniku reakcji rozpadu

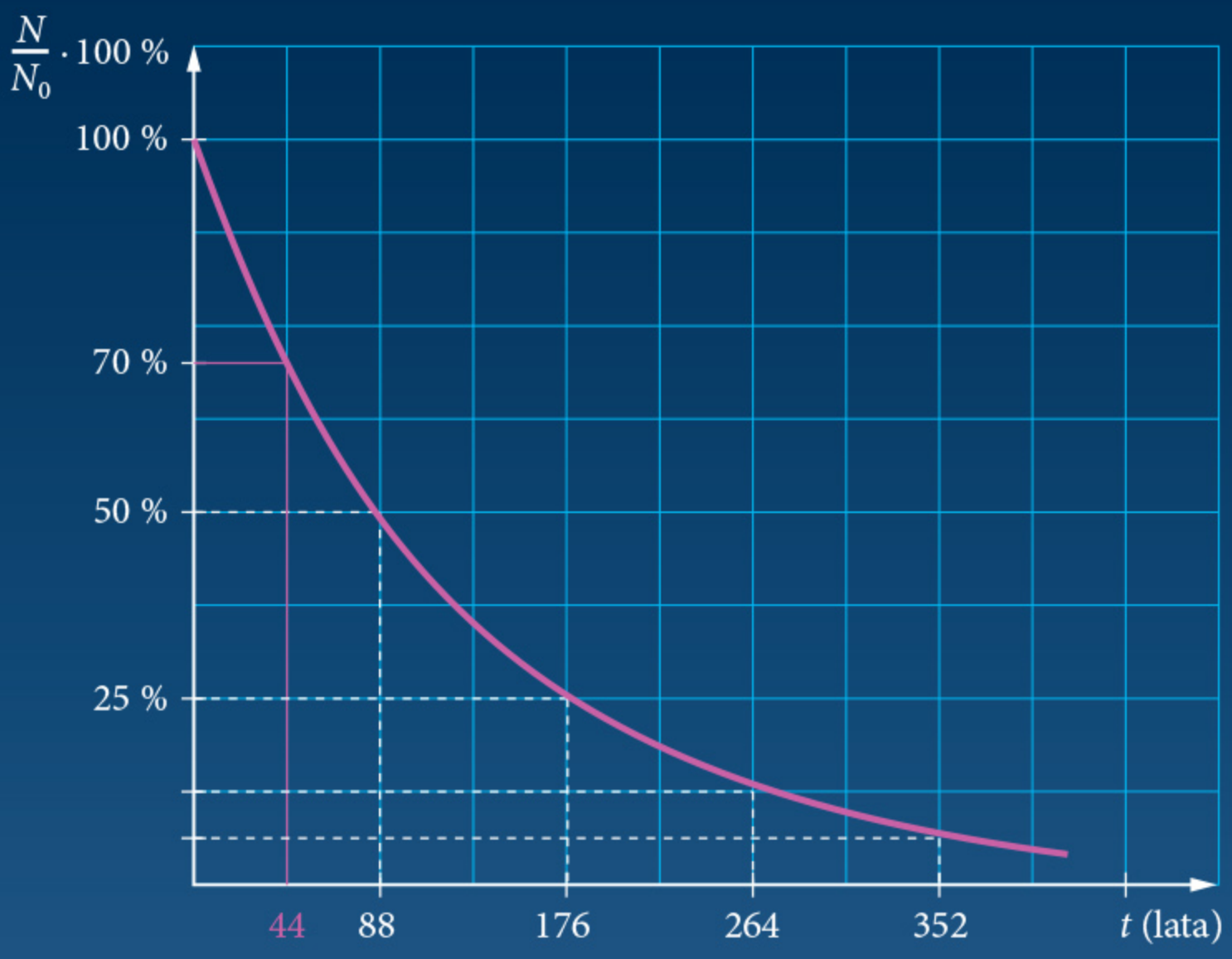
Ciepło wytwarzane w wyniku rozpadu promieniotwórczego wykorzystuje się jako długotrwałe źródło energii. Na przykład aparatura sondy New Horizon, wystrzelonej w 2006 roku, która jako pierwsza dotarła do Plutona, w roku 2015, zasilana była prądem z generatora wykorzystującego energię uwolnioną podczas rozpadu. Źródłem promieniowania był izotop plutonu $^{238}_{94}$Pu, emitujący cząstki $\alpha$ o energii 5,6 MeV. Również na Ziemi korzystamy z takich izotopowych generatorów ciepła. Na przykład na biegnących po dnie oceanów światłowodach, które zapewniają łączność internetową, w pewnych odstępach instalowane są wzmacniacze sygnału. Ich źródłem energii są właśnie generatory izotopowe.



**PRZYKŁAD 2.**

Sonda Voyager 1 została wystrzelona w 1977 roku w kierunku granic Układu Słonecznego. W 2021 roku znajdowała się już daleko poza orbitą Plutona, ale nadal utrzymywano z nią łączność. Zasilanie sondy zapewniały generatory izotopowe (patrz *Warto wiedzieć*). Początkowa masa plutonu $^{238}$Pu o czasie połowicznego rozpadu równym 88 lat zainstalowanego w sondzie wynosiła 9 kg. Oszacujmy, jaka była masa plutonu w sondzie w 2021 roku.

Aby oszacować procentową zawartość jąder plutonu po czasie, który upłynął od startu, najwygodniej będzie skorzystać z wykresu podobnego do tego z ryciny 34.4.




Z wykresu odczytujemy, że po 44 latach pozostało ok. 70 % jąder plutonu, czyli jego masa po tym czasie wynosi:

$$0{,}7 \cdot 9\ \text{kg} = 6{,}3\ \text{kg}$$

Wobec tego w 2021 roku w generatorach izotopowych sondy było ok. 6 kg plutonu.

## PODSUMOWANIE

- **Czas połowicznego rozpadu $T_{1/2}$** to czas, w którym rozpada się połowa jąder izotopu promieniotwórczego w danej próbce.
- Wykres zależności zawartości procentowej jąder promieniotwórczych w danej próbce od czasu ma taki sam charakter dla wszystkich izotopów promieniotwórczych. Tę zależność nazywamy **prawem rozpadu promieniotwórczego**.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Skorzystaj z wykresu zamieszczonego na rycinie 34.2 i wyznacz czas połowicznego rozpadu $^{47}Ca$ i $^{32}P$.
2. Czas połowicznego rozpadu uranu $^{238}U$ wynosi 4,5 mld lat – tyle, ile wiek Ziemi. O ile procent więcej tego izotopu zawierała kształtująca się Ziemia w porównaniu z dzisiejszą zawartością?
3. Czas połowicznego rozpadu uranu $^{235}U$ jest ponad 6 razy krótszy niż uranu $^{238}U$. Czy stosunek liczby atomów izotopu $^{235}U$ do liczby atomów izotopu $^{238}U$ w rudzie uranowej rośnie, czy maleje z czasem? Uzasadnij odpowiedź.
4. W tabeli przedstawiono zawartość izotopu promieniotwórczego w próbce na początku poszczególnych lat.
   a) Ile wynosi czas połowicznego rozpadu tego izotopu?
   b) Przerysuj tabelę do zeszytu i ją uzupełnij.

| Rok | | 2010 | 2012 | 2014 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|
| Zawartość izotopu | 64 % | | 8 % | 4 % | |

5. Izotopy o krótkim czasie połowicznego rozpadu, takie jak np. cez $^{129}Cs$, stosowane są w medycynie jako składniki tzw. znaczników promieniotwórczych. Tabela przedstawia zawartość izotopu cezu $^{129}Cs$ w preparacie służącym jako znacznik w zależności od czasu, który upłynął od momentu produkcji tego preparatu.

| Czas (h) | 0 | 7 | 15 | 20 | 26 | 34 | 39 | 47 | 52 | 59 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zawartość (‰) | 14,0 | 12,0 | 10,1 | 9,1 | 7,9 | 6,7 | 6,0 | 5,0 | 4,5 | 3,9 |

   a) Przedstaw na wykresie zawartość tego izotopu w próbce w zależności od czasu.
   b) Odczytaj z wykresu czas połowicznego rozpadu.
   c) Ile czasu od momentu produkcji ma lekarz radiolog na aplikację preparatu, jeżeli wiadomo, że jego przydatność kończy się, gdy stężenie izotopu promieniotwórczego spadnie poniżej 0,7 ‰?

# 35. Wpływ promieniowania jądrowego na organizmy

- Tło promieniowania
- Dawka promieniowania
- Choroba popromienna

➔ **Przypomnij sobie** właściwości promieniowania jądrowego.

Promieniowanie jądrowe zostawia na swej drodze ślad w postaci zjonizowanych atomów. Ta właściwość decyduje o skutkach, jakie niesie za sobą ekspozycja na to promieniowanie.

## Wpływ promieniowania na organizmy

Dla organizmów jednokomórkowych (np. bakterii) promieniowanie jądrowe jest zabójcze. Jeżeli cząstka $\alpha$ lub $\beta$ uderzy w komórkę, spowoduje powstanie tak wielu jonów (nawet kilkudziesięciu tysięcy!) i uszkodzi tyle struktur cząsteczkowych, że komórka umiera. Bakteriobójcze właściwości promieniowania jądrowego wykorzystuje się m.in. w procesie sterylizacji żywności, która ma być długo przechowywana.

Organizmy składające się z miliardów komórek wykształciły reakcje obronne przed promieniowaniem jądrowym. Są one niezbędne, gdyż bez przerwy jesteśmy na nie wystawieni. Jego źródłem są przede wszystkim izotopy promieniotwórcze występujące w skorupie ziemskiej i atmosferze (ryc. 35.1). To promieniowanie nazywamy **tłem**.

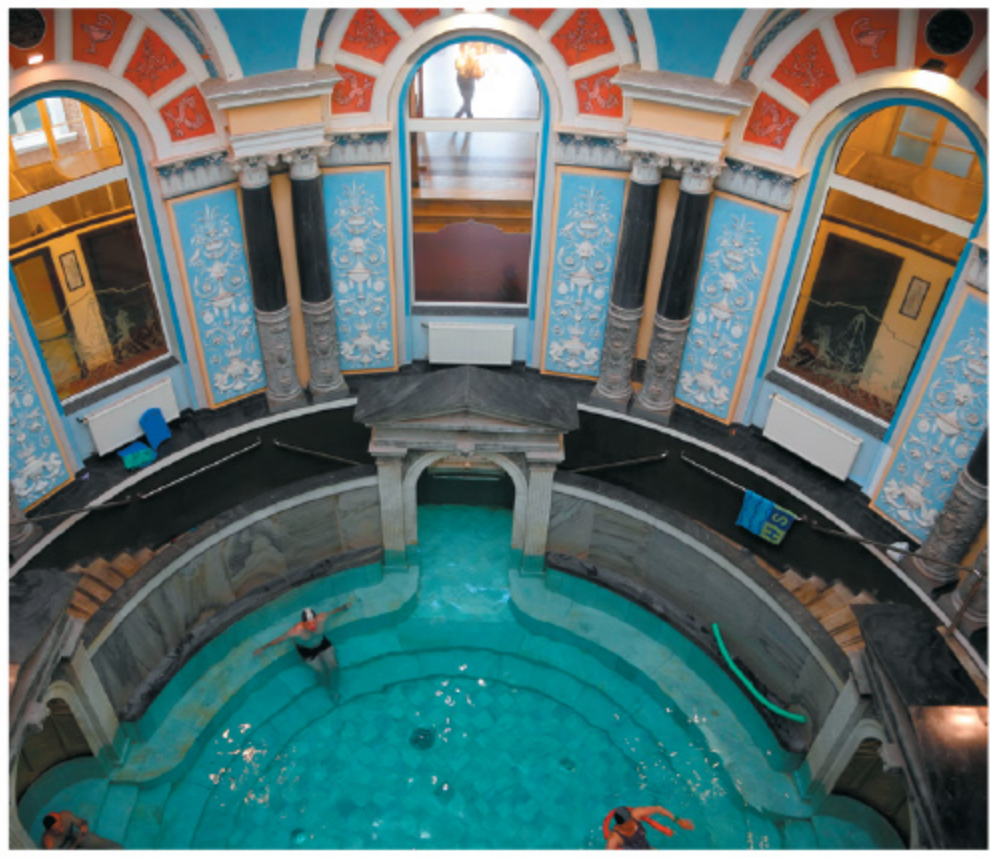
**Ryc. 35.1.**
Żółte kryształki promieniotwórczego krzemianu uranylu

Pojedyncze komórki organizmu złożonego mogą zostać uszkodzone przez promieniowanie (zdarza się to kilka razy na sekundę), ale zostają one wówczas usunięte przez organizm i zastąpione przez inne. Nie ma danych naukowych wskazujących na szkodliwość promieniowania tła dla naszego zdrowia. Pobudzenie układu odpornościowego za pomocą słabego promieniowania jądrowego pozwala nawet na leczenie niektórych chorób przewlekłych, np. chorób reumatycznych i narządów ruchu.

WARTO WIEDZIEĆ

**Wody radonowe**

Kilka uzdrowisk w Polsce, takich jak Świeradów-Zdrój czy Lądek-Zdrój, oferuje kuracje lecznicze – kąpiele lub inhalacje – z wykorzystaniem wód mineralnych zawierających rozpuszczony promieniotwórczy radon. Za wody radonowe uważa się te, w których zachodzą co najmniej 74 rozpady na sekundę w litrze. Z wykorzystaniem tych wód mineralnych leczy się np. choroby reumatyczne, układu krążenia i układu oddechowego, a także schorzenia dermatologiczne.



## Dawka promieniowania

Aby obliczyć dawkę promieniowania jonizującego, jaką przyjęło dane ciało, czyli tzw. **dawkę pochłoniętą**, należy podzielić energię tego promieniowania przez masę ciała.

$$D = \frac{E}{m} \tag{1}$$

Jednostką dawki pochłoniętego promieniowania jonizującego jest **grej** (**Gy**):

$$1\ \text{Gy} = \frac{1\ \text{J}}{1\ \text{kg}}$$

Szkodliwość promieniowania jonizującego zależy od jego rodzaju. Najbardziej niebezpieczne dla człowieka jest promieniowanie $\alpha$ – już dawka 200 mGy jest śmiertelna dla 50 % populacji, podczas gdy dla promieniowania $\beta$ i $\gamma$ ta wartość wynosi 4000 mGy. Z tego względu do porównywania skutków napromieniowania organizmu ludzkiego stosuje się **dawkę równoważną** (równoważnik dawki pochłoniętej), w której uwzględniony jest także rodzaj promieniowania. Jednostką dawki równoważnej jest siwert (Sv).

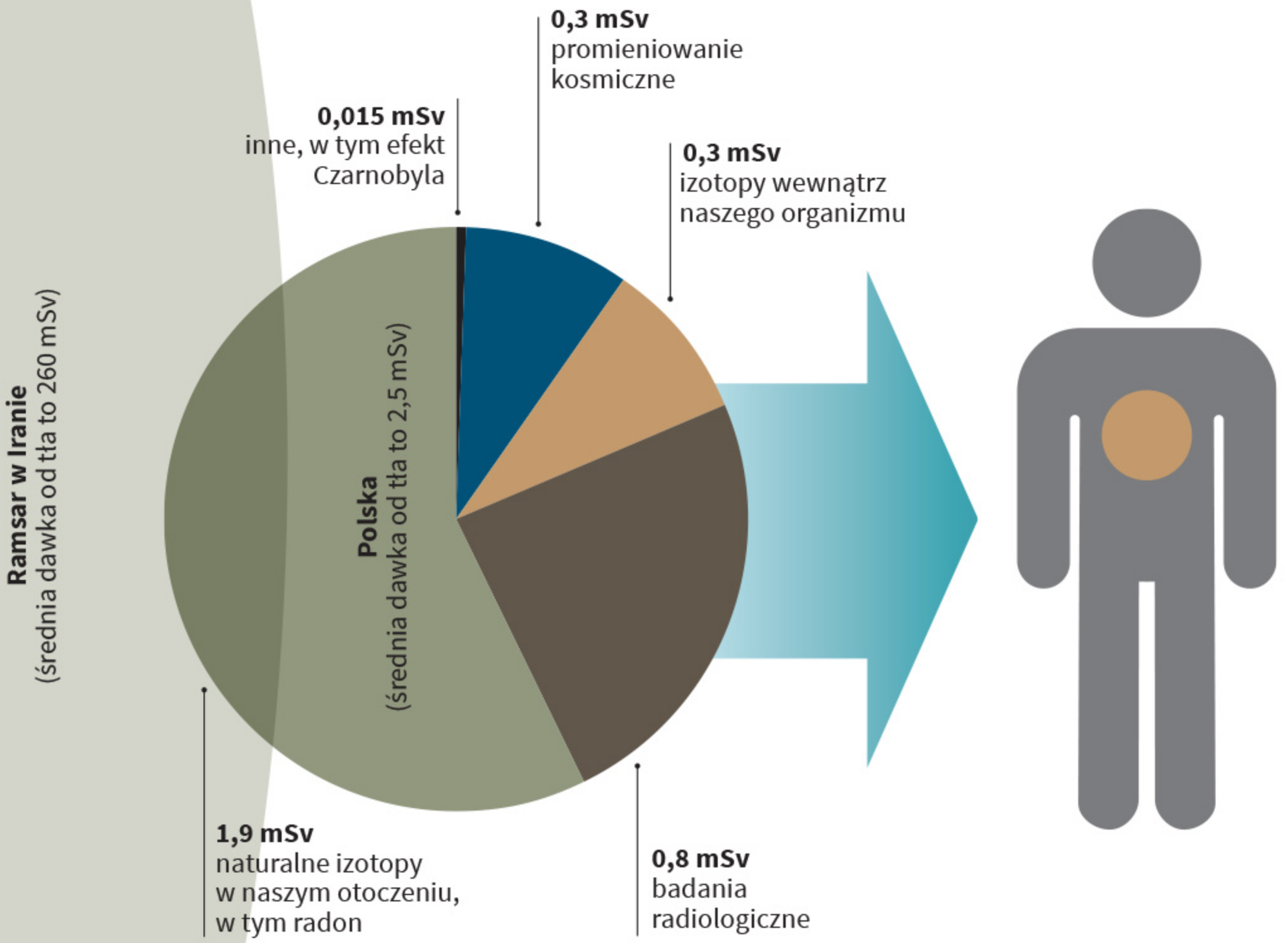
Dla promieniowania $\beta$ i $\gamma$ przyjmuje się, że:

$$1\ \text{Sv} = 1\ \text{Gy}$$

natomiast dla promieniowania $\alpha$:

$$1\ \text{Sv} = 0{,}05\ \text{Gy}$$

Średnia roczna dawka równoważna związana z tłem promieniowania, pochłonięta przez mieszkańca Polski, to ok. 2,5 mSv (ryc. 35.2).




**Ryc. 35.2.** Źródła dawki równoważnej pochłoniętej w ciągu roku przez statystycznego Polaka. Wartości są orientacyjne, mogą się znacznie różnić w zależności od miejsca zamieszkania

Tło promieniowania nie wszędzie jest jednakowe, ponieważ zależy od koncentracji izotopów promieniotwórczych w skorupie ziemskiej. Na przykład w Sudetach tło jest czterokrotnie większe niż średnie tło na terenie całego kraju – ze względu na rozproszone atomy uranu w skałach granitowych. Na Ziemi jest wiele obszarów, w których tło promieniowania jest wyjątkowo duże. Należą do nich okolice kurortu morskiego Ramsar w Iranie, gdzie roczna dawka promieniowania sięga 260 mSv, czy brazylijska plaża Guarapari z roczną dawką promieniowania 35 mSv. Nie stwierdzono, aby pochłonięcie w ciągu roku takich dawek było szkodliwe.

**PRZYKŁAD 1.**

W izotopowych czujnikach dymu najczęściej stosuje się izotop ameryku $^{241}_{95}\mathrm{Am}$, emitujący promieniowanie $\alpha$ i $\gamma$. Promieniowanie $\alpha$ nie przenika przez obudowę czujnika w przeciwieństwie do fotonów $\gamma$. Czujnik emituje w ciągu sekundy ok. 7000 fotonów o energii 0,06 MeV każdy.

Oszacujmy, jaką dawkę równoważną promieniowania jądrowego przyjmuje w ciągu 200 dni człowiek przebywający w pomieszczeniu z czujnikiem. Załóżmy, że spędza w nim po 8 godzin dziennie. Przyjmijmy, że masa człowieka jest równa 80 kg i że trafia do niego 2 % wyemitowanego promieniowania.

Liczba fotonów wyemitowanych przez czujnik w założonym czasie:

$$n = 7000\ \frac{1}{\mathrm{s}} \cdot 200 \cdot 8\ \mathrm{h} = 7000\ \frac{1}{\mathrm{s}} \cdot 200 \cdot 8 \cdot 3600\ \mathrm{s} \approx 4 \cdot 10^{10}$$

Energia pochłonięta przez człowieka przy założeniu, że każdy z padających na niego fotonów został pochłonięty:

$$E = 2\ \% \cdot 4 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}06\ \mathrm{MeV} = 8 \cdot 10^{8} \cdot 0{,}06 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-13}\ \mathrm{J} \approx 8 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{J}$$

Dawkę pochłoniętą obliczamy ze wzoru (1):

$$D = \frac{E}{m} = \frac{8 \cdot 10^{-6}\mathrm{J}}{80\ \mathrm{kg}} = 10^{-7}\ \mathrm{Gy}$$

$10^{-7}$ Gy $= 10^{-7}$ Sv, gdyż dla promieniowania $\gamma$ 1 Gy = 1 Sv.

Pochłonięta dawka równoważna jest bardzo mała – jest 25 tysięcy razy mniejsza od rocznej dawki, jaką każdy z nas przyjmuje z promieniowania tła.

## Choroba popromienna

Pochłonięcie przez człowieka w krótkim czasie dawki rzędu kilkuset milisiwertów powoduje, że liczba uszkodzonych cząsteczek w naszych komórkach staje się bardzo duża. W związku z tym organizm musi uruchomić specjalne mechanizmy obronne. Pojawiają się wtedy gorączka, osłabienie, bóle głowy, nudności – zaczyna się **choroba popromienna**. Przebieg i leczenie tej choroby są podobne do przebiegu i leczenia infekcji wirusowych (np. grypy), bo uszkodzone cząsteczki białek czy enzymów traktowane są przez organizm jak toksyny wytwarzane przez wirusy. Pochłonięcie dawki powyżej 2 Sv powoduje ostrą chorobę popromienną, której objawy to trudno gojące się rany, oparzenia i krwotoki wewnętrzne, mogące prowadzić do śmierci. Czasem dochodzi do uszkodzenia materiału genetycznego i jeżeli organizm w porę nie rozpozna uszkodzonej komórki, efektem tych uszkodzeń może być choroba nowotworowa.

Człowiek poddany promieniowaniu jonizującemu sam nie staje się źródłem promieniowania. Kontakty z taką osobą ogranicza się ze względu na jej bezpieczeństwo, gdyż taki organizm jest osłabiony i podatny na inne infekcje.

Szkodliwość izotopów promieniotwórczych jest związana z ich aktywnością, czyli liczbą rozpadów w jednej sekundzie. Izotopy o długim czasie połowicznego rozpadu, jak np. uran, w zasadzie nie stanowią zagrożenia ze względu na znikomą aktywność; zupełnie bezpiecznie można je trzymać w rękach (ryc. 35.3). Z kolei izotopy o dużej aktywności mogą być zagrożeniem nawet w niewielkich ilościach. Dotyczy to szczególnie izotopów $\alpha$-promieniotwórczych, gdy dostaną się do wnętrza organizmu, np. w pożywieniu czy przez błony śluzowe. Promieniowanie $\beta$ powoduje u człowieka głównie podrażnienia skóry (ze względu na przenikliwość wynoszącą kilka milimetrów), oczywiście gdy źródło promieniowania jest poza organizmem. Promieniowanie $\gamma$ uszkadza komórki organów wewnętrznych, jednak ze względu na słabe oddziaływanie fotonów $\gamma$ z materią (duża przenikliwość świadczy o tym, że promieniowanie $\gamma$ traci mało energii w organizmie) tylko silne źródła tego promieniowania są dla ludzi niebezpieczne.

**Ryc. 35.3.** W fabryce produkującej pręty paliwowe do elektrowni jądrowych nie stosuje się nadzwyczajnych środków ochronnych, mimo że takie pręty zawierają uran

Promieniowanie jądrowe jest cały czas obecne w naszym otoczeniu, podobnie jak różne toksyny, wirusy i bakterie. W pewnych warunkach może być szkodliwe, a nawet śmiertelne. Obecnie wiemy, jak chronić się przed negatywnymi skutkami tego promieniowania, a także jak je bezpiecznie wykorzystywać w codziennym życiu.

## PODSUMOWANIE

- Promieniowanie jądrowe niszczy bakterie.
- **Tło promieniowania** to promieniowanie jonizujące pochodzące ze źródeł naturalnych.
- Szkodliwość promieniowania zależy od dawki pochłoniętego promieniowania. Jednostką dawki równoważnej jest **siwert** (Sv). Roczna dawka pochodząca od tła to ok. 2,5 mSv.
- Przyjęcie przez człowieka dawki kilkuset milisiwertów może spowodować **chorobę popromienną**.

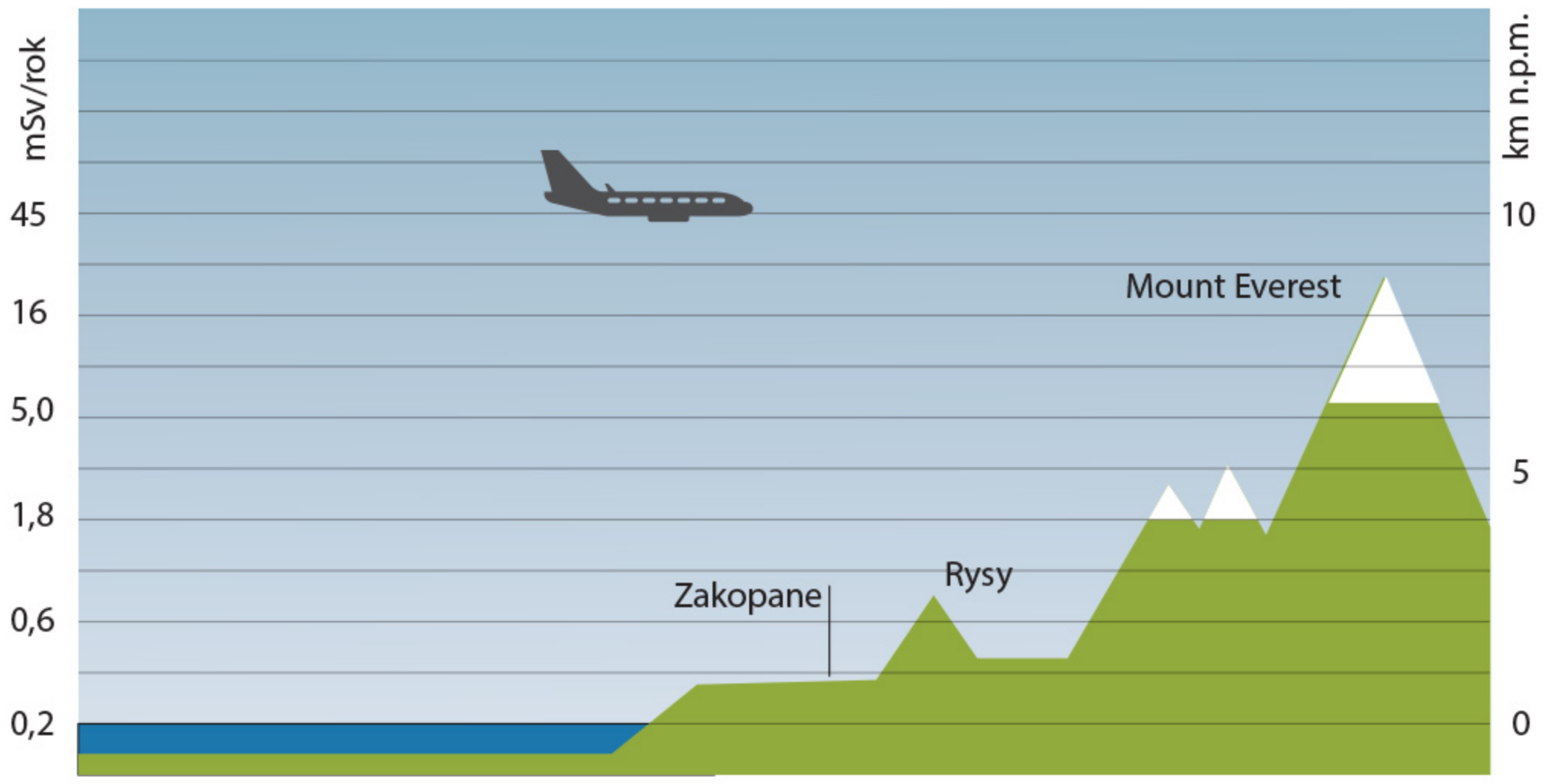
## PYTANIA I ZADANIA

1. Na podstawie ryciny 35.2 oblicz, jaką część rocznej dawki równoważnej przyjętej przez statystycznego Polaka stanowi promieniowanie pochłaniane przez organizm podczas badań medycznych.

2. Który z rodzajów izotopów promieniotwórczych – emitujący promieniowanie $\alpha$, $\beta$ czy $\gamma$ – jest najbardziej niebezpieczny, gdy dostanie się do organizmu człowieka? Zakładamy, że liczba rozpadów w jednostce czasu w każdym przypadku jest jednakowa.

3. W 2011 roku w wyniku fali tsunami uszkodzeniu uległa obudowa reaktora elektrowni jądrowej w Fukushimie. Do usuwania skutków awarii skierowano ochotników wyposażonych w dozymetry, czyli mierniki dawki równoważnej. Pracownicy byli usuwani z miejsca awarii, gdy ich dozymetry wskazywały 200 mSv. Czy pochłonięcie takiej dawki zagrażało ich życiu? Uzasadnij odpowiedź na podstawie tekstu rozdziału.

4. Dawka równoważna pochodząca z promieniowania kosmicznego zależy od wysokości n.p.m. (ryc.). Oszacuj, na jaką dawkę promieniowania kosmicznego narażony jest pasażer samolotu lecącego na wysokości 10 km przez 8 godzin lotu. Załóż, że kadłub samolotu nie stanowi izolacji dla promieniowania kosmicznego.




5. W wyniku awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu tereny Polski zostały skażone promieniotwórczym izotopem jodu $^{131}\mathrm{I}$. Każdy metr kwadratowy powierzchni ziemi emitował wówczas w ciągu sekundy średnio ok. 2000 elektronów o energii 0,8 MeV i 2000 fotonów $\gamma$ o energii 0,3 MeV.
   Oblicz, jaką dawkę równoważną przyjął w ciągu roku mieszkaniec Polski o masie 60 kg. Można założyć, że był on wystawiony na promieniowanie emitowane z 1 $m^2$ powierzchni ziemi. Otrzymany wynik porównaj z tłem promieniowania.

# 36. Zastosowanie izotopów promieniotwórczych

- Datowanie radioizotopowe
- Izotopy promieniotwórcze w medycynie
- Zastosowanie radioizotopów w gospodarce

F

F → **Przypomnij sobie** właściwości promieniowania jądrowego i wiadomości o czasie połowicznego rozpadu.

Radioizotopy, czyli izotopy promieniotwórcze, wykorzystuje się w nauce, medycynie, przemyśle, a nawet w rolnictwie. Zastosowania różnych rodzajów promieniowania jądrowego wynikają z ich właściwości.

## Datowanie radioizotopowe

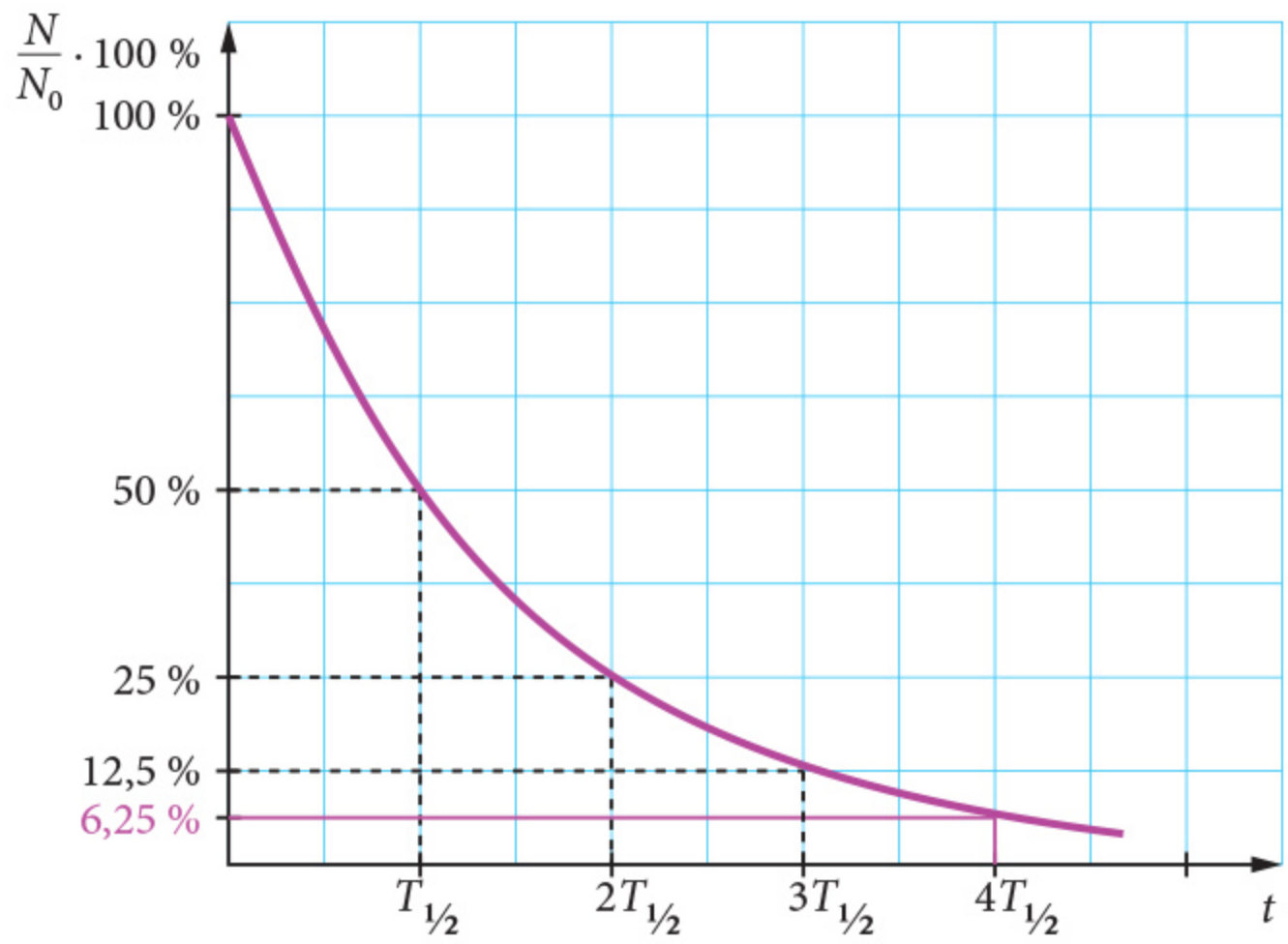
Zawartość izotopu promieniotwórczego w próbce zmniejsza się z upływem czasu zgodnie
s. 348
z prawem rozpadu promieniotwórczego. Dzięki temu, jeśli znamy okres połowicznego rozpadu danego izotopu oraz jego początkową zawartość w danej próbce, możemy wyznaczyć czas, który upłynął od powstania próbki do czasu pomiaru zawartości tego izotopu. W ten sposób można określić wiek próbki zawierającej izotop promieniotwórczy, o ile znamy jego początkową zawartość.

Do datowania szczątków materii pochodzenia organicznego wykorzystuje się promieniotwórczy izotop węgla $^{14}C$ o czasie połowicznego rozpadu wynoszącym 5730 lat. Metoda datowania radiowęglowego opiera się na tym, że węgiel $^{14}C$ występuje powszechnie w niewielkich stężeniach we wszystkich organizmach. Izotop ten powstaje w górnych warstwach atmosfery i w postaci $CO_2$ przyswajany jest przez rośliny, a potem przez zwierzęta i ludzi. W czasie życia organizmu ze względu na obieg materii stężenie izotopu $^{14}C$ w stosunku do najpowszechniej występującego izotopu $^{12}C$ utrzymuje się w organizmie na stałym poziomie. Po śmierci, gdy ustaje wymiana materii, stężenie $^{14}C$ maleje. Gdy podczas wykopalisk znajdowane są np. przedmioty skórzane, stężenie izotopu $^{14}C$ w znalezisku porównuje się ze stężeniem, które jest w organizmach żyjących zwierząt (to stężenie traktujemy jako początkowe). W ten sposób określa się wiek znaleziska. Dokładność tej metody pozwala datować próbki nie starsze niż mające 70 tysięcy lat.

**PRZYKŁAD 1.**

W Muzeum Przyrodniczym PAN w Krakowie znajduje się jedyny na świecie zachowany w całości okaz nosorożca włochatego z epoki plejstocenu. W jednej z próbek materiału pobranego do datowania radiowęglowego stężenie izotopu $^{14}C$ było na poziomie 6,2 % stężenia, jakie występuje w żyjących obecnie gatunkach pokrewnych. Jaki jest wiek znaleziska?

Skorzystamy z wykresu przedstawiającego zależność procentowej zawartości izotopu promieniotwórczego od czasu. Przyjmujemy, że 100 % to zawartość tego izotopu w obecnie żyjących gatunkach nosorożca.




Odczytujemy z wykresu, że zawartość izotopu promieniotwórczego spada do poziomu 6,2 % po upływie ok. 4 okresów połowicznego rozpadu. W przypadku izotopu $^{14}C$ okres połowicznego rozpadu jest równy 5730 lat, zatem wiek znaleziska wynosi:

$$4 \cdot 5730 \text{ lat} \approx 23\,000 \text{ lat}$$

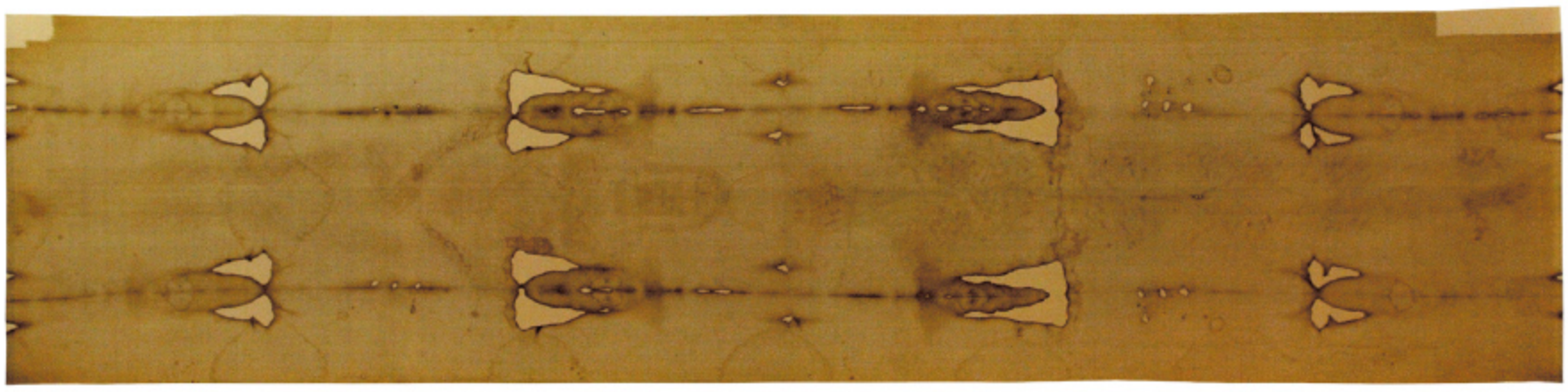
F W geologii do określania wieku skał wykorzystuje się izotopy o długim czasie połowicznego rozpadu, np. potas $^{40}K$, dla którego $T_{1/2} = 1{,}25$ miliarda lat. W wyniku rozpadu promieniotwórczego tego izotopu powstaje argon $^{40}Ar$. Takie atomy są uwięzione w skale, której wiek można obliczyć dzięki wyznaczeniu stosunku stężeń $^{40}Ar$ do $^{40}K$. Tą metodą ustalono np. wiek Układu Słonecznego – badano meteoryty docierające do Ziemi.

## WARTO WIEDZIEĆ

### Ötzi i Całun Turyński

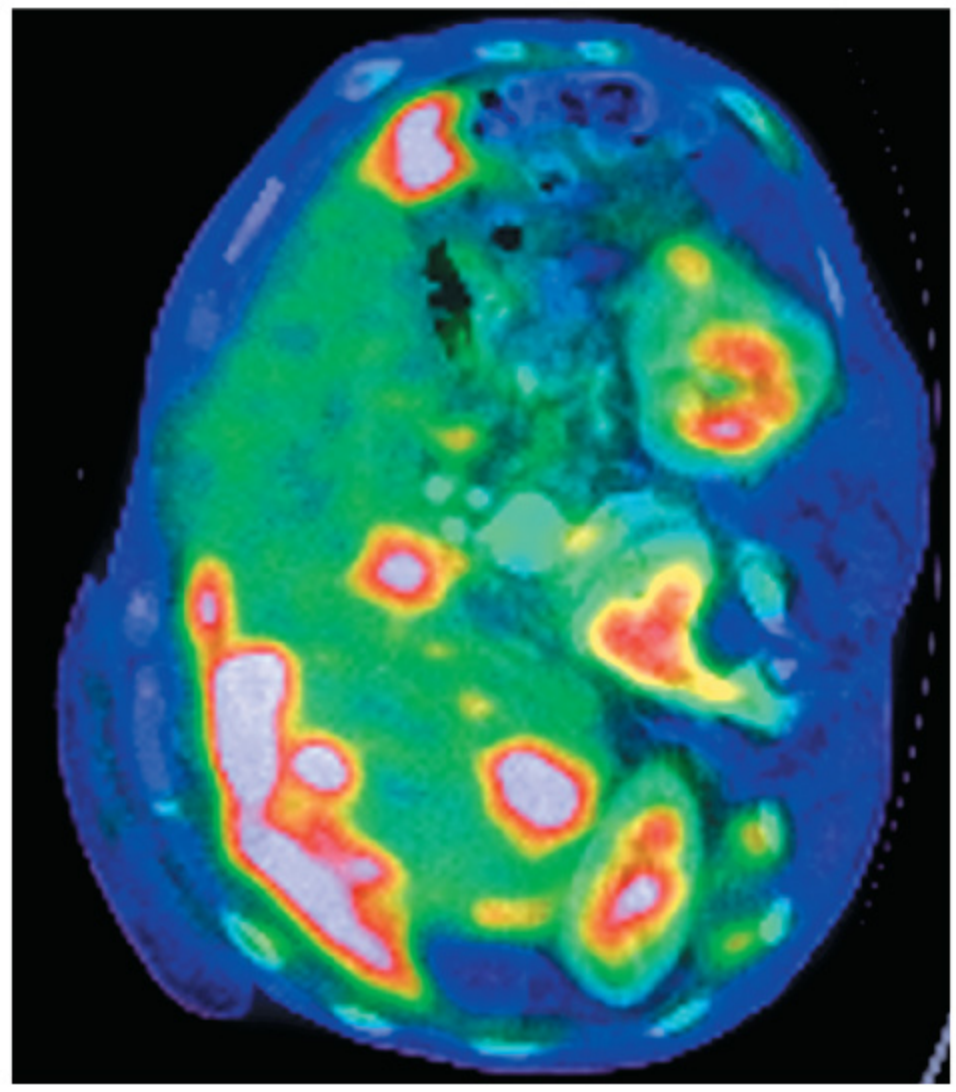
W 1991 roku dwoje turystów dostrzegło wystające z cofającego się alpejskiego lodowca zwłoki ludzkie (fot.). Najpierw podejrzewano, że to zaginiony turysta. Po badaniach metodą radiowęglową ustalono, że ten człowiek umarł… ponad 5000 lat temu! Nazwano go Ötzi. Świetnie zachowana mumia została wszechstronnie zbadana. Można ją oglądać w muzeum w Bolzano we Włoszech.

Metodą węgla $^{14}C$ badano też wiek tzw. Całunu Turyńskiego, słynnego płótna z wizerunkiem postaci ludzkiej (fot.). Całun, po raz pierwszy wzmiankowany w dokumentach z XIV wieku, od początku wzbudzał dużo emocji, ponieważ wiele osób uważa, że to cudownie utrwalony wizerunek Chrystusa. Z tego względu jest on jednym z najczęściej badanych artefaktów, a badania metodą radiowęglową przeprowadziły niezależnie od siebie aż trzy renomowane laboratoria. Wynik tych badań był zgodny i jednoznaczny: płótno powstało między 1260 a 1390 rokiem. Oczywiście tą metodą nie można ustalić, kiedy utkano płótno – wskazuje ona jedynie czas ścięcia użytych do niego roślin.



## Izotopy promieniotwórcze w medycynie

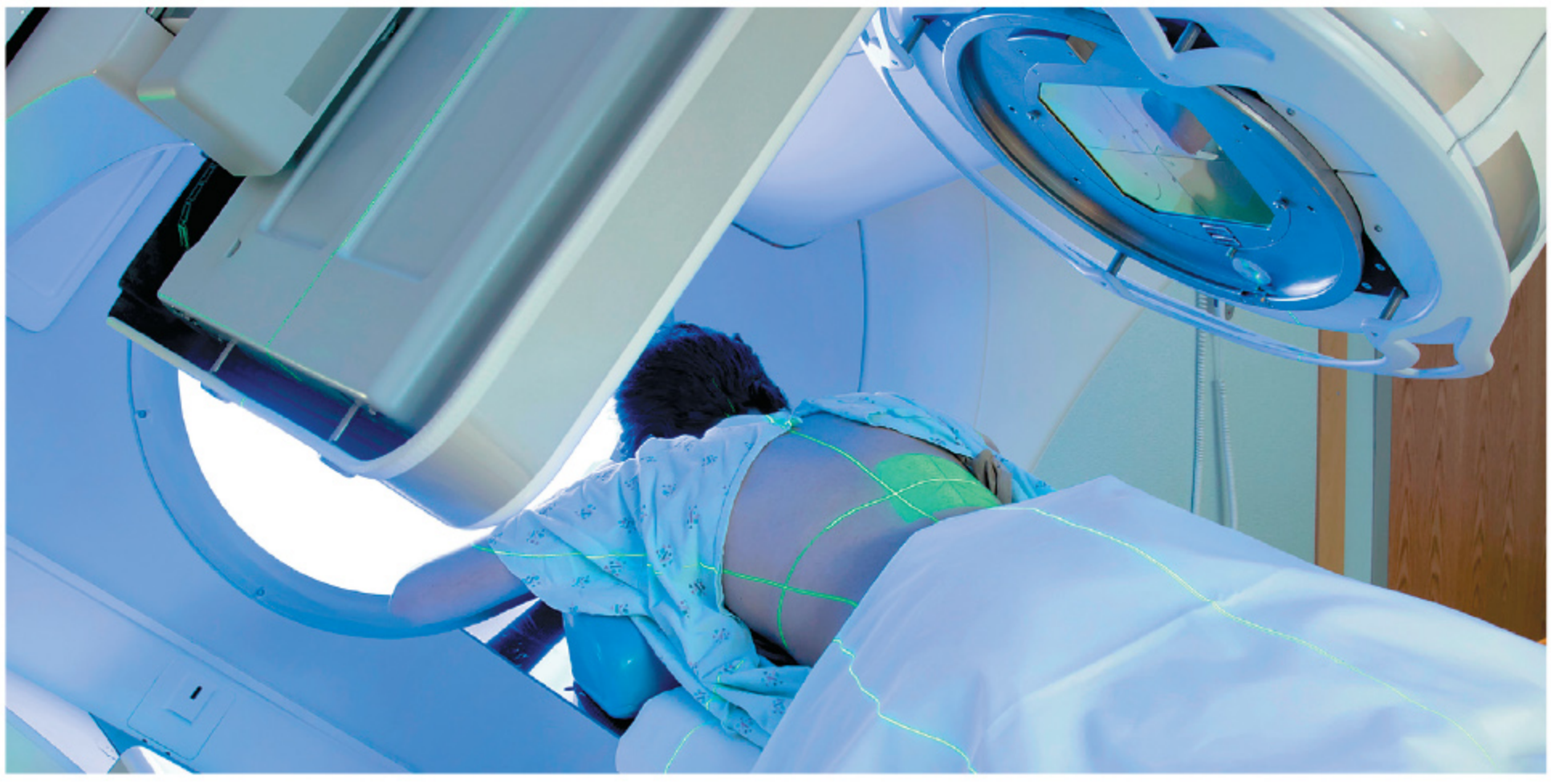
Izotopy o krótkim czasie połowicznego rozpadu stosowane są w medycynie w znacznikach promieniotwórczych. Taki znacznik to związek chemiczny zawierający izotop promieniotwórczy w niewielkim stężeniu. Po wprowadzeniu go do organizmu można śledzić jego drogę lub miejsca gromadzenia się dzięki emitowanemu promieniowaniu. To często ułatwia postawienie diagnozy (infografika na s. 276–277). Znacznik podany pacjentowi do krwi koncentruje się w miejscach ze stanem zapalnym (ryc. 36.1). Dzięki tej metodzie można wykrywać nowotwory na bardzo wczesnym etapie rozwoju.



**Ryc. 36.1.** Zdjęcie wykonane podczas badania PET (pozytonowa tomografia emisyjna) obrazuje stan zapalny narządu wewnętrznego

Silne źródła promieniowania $\gamma$ (o mocy nawet 10 kW), np. $^{60}Co$, stosuje się w radioterapii przy leczeniu nowotworów. Wykorzystuje się tu szkodliwe działanie promieniowania na organizmy. Oczywiście, podczas zabiegu pacjent jest odpowiednio osłonięty, tak aby naświetlone były niemal wyłącznie tkanki zmienione chorobowo (ryc. 36.2).

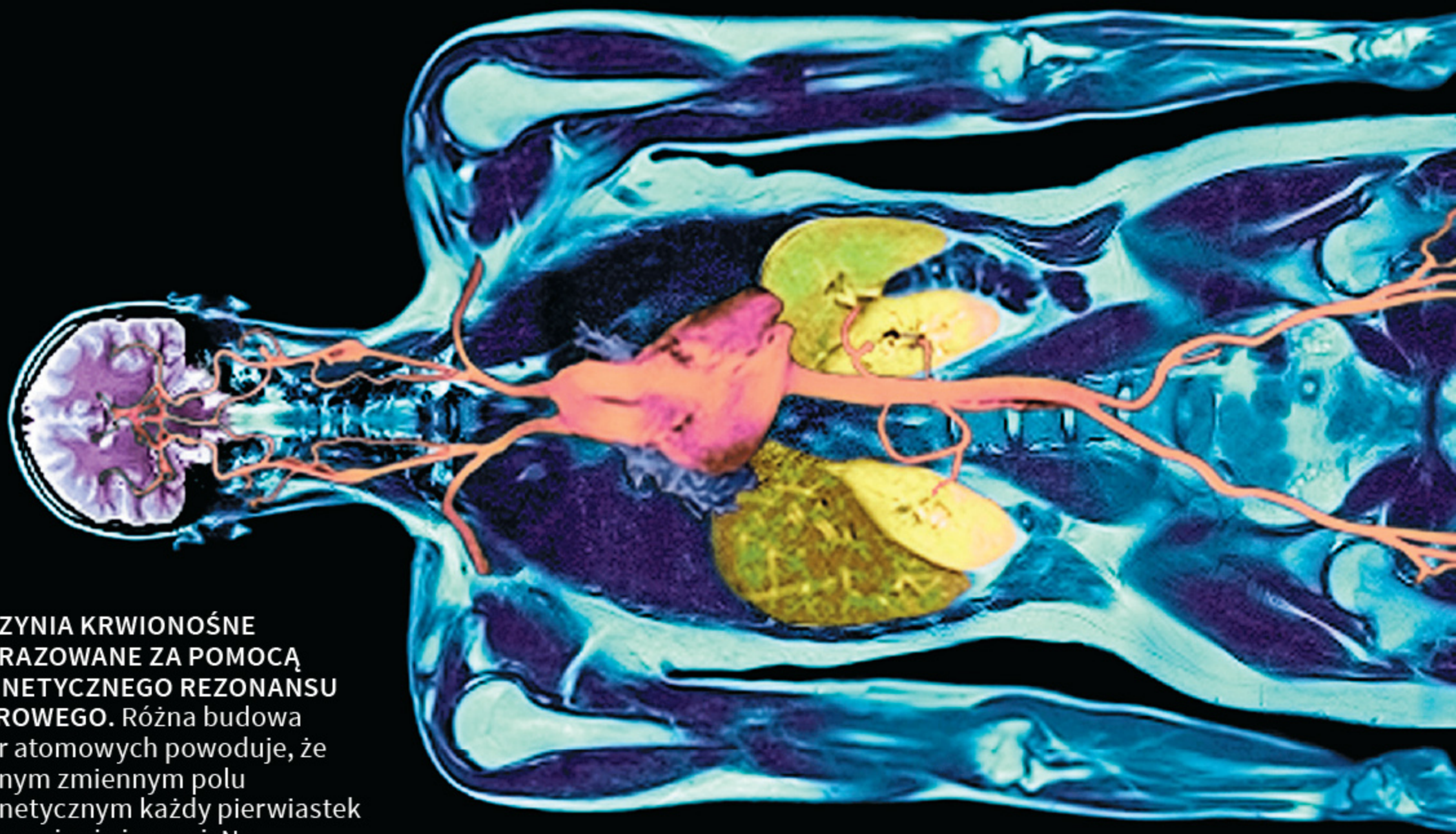
W onkologii stosuje się również słabe źródła promieniowania, choćby tzw. igły radowe. Są one implantowane w chorych tkankach, gdzie przez długi czas oddziałują na komórki nowotworowe i powodują ich obumarcie.



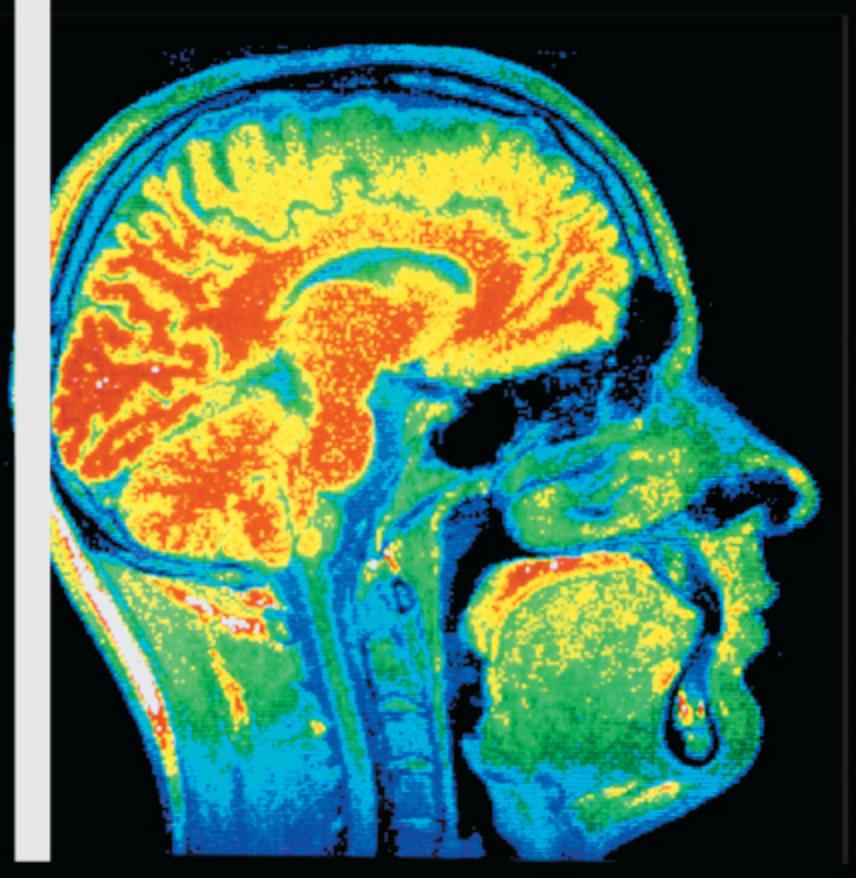
**Ryc. 36.2.** Przygotowanie pacjenta do radioterapii. Stosowana w leczeniu nowotworów tzw. bomba kobaltowa (coraz częściej zastępowana przez akceleratory medyczne) jest silnym źródłem promieniowania $\gamma$

# Diagnostyka obrazowa

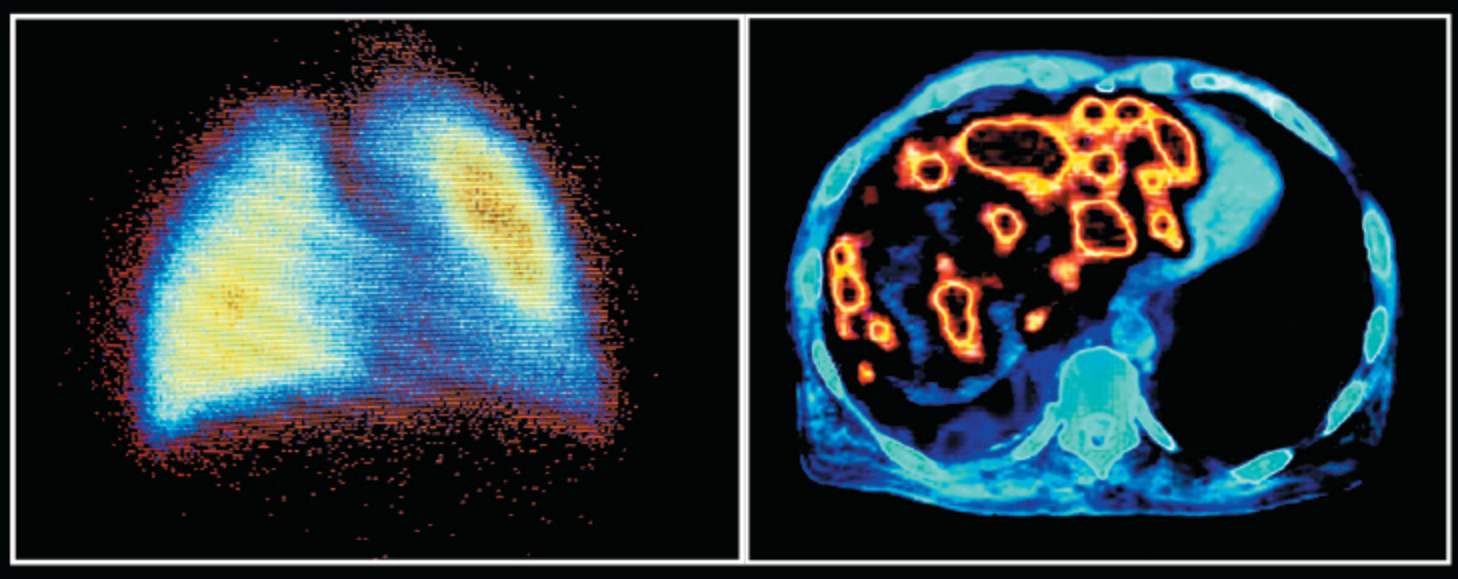
W 1895 roku Wilhelm Roentgen odkrył niewidzialne promieniowanie, które umożliwia fotografowanie wnętrza ciała ludzkiego, a także wnętrza różnych przedmiotów. Obecnie do wynalazku Roentgena dołączyły techniki wykorzystujące właściwości jąder atomowych. Są nimi: magnetyczny rezonans jądrowy (NMR), pozytonowa tomografia emisyjna (PET) i scyntygrafia. Poza doskonałymi zdjęciami wnętrza organizmu metody jądrowe dają obraz czynnościowy danego narządu, tzn. pokazują, czy dany narząd poprawnie funkcjonuje.



**NACZYNIA KRWIONOŚNE ZOBRAZOWANE ZA POMOCĄ MAGNETYCZNEGO REZONANSU JĄDROWEGO.** Różna budowa jąder atomowych powoduje, że w silnym zmiennym polu magnetycznym każdy pierwiastek zachowuje się inaczej. Na podstawie sygnału pochodzącego od poszczególnych atomów komputer, wyposażony w odpowiednie oprogramowanie, buduje kolorowy obraz.



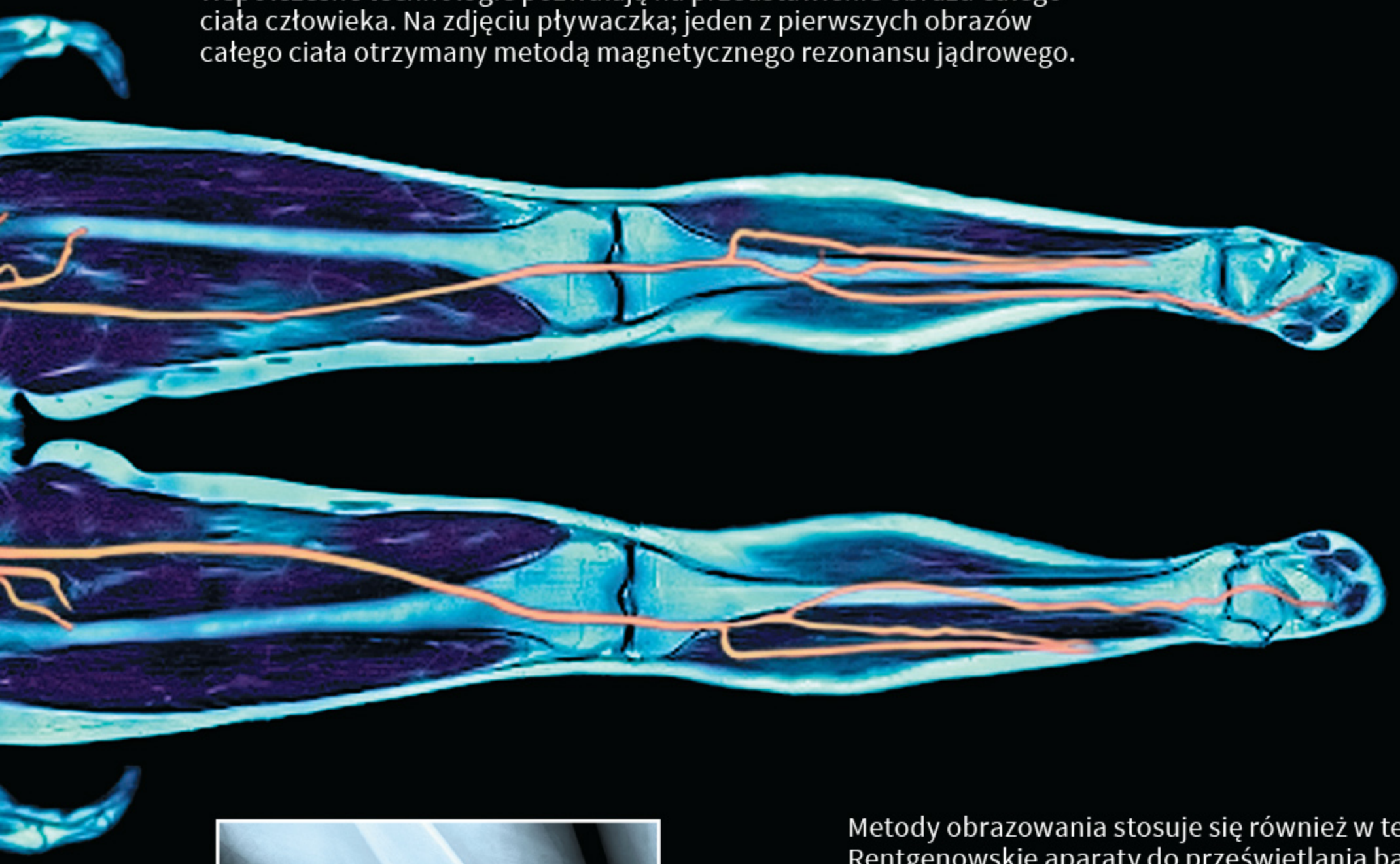
**SCYNTYGRAM PŁUC WSKAZUJĄCY NA ZATOR PŁUCNY.** Obraz otrzymano dzięki zarejestrowaniu przez czujniki promieniowania emitowanego przez metastabilny izotop technetu $^{99}Tc$, który został podany pacjentowi.



**TO ZDJĘCIE PET WSKAZUJE NA RAKA WĄTROBY.** Odpowiednie czujniki precyzyjnie lokalizują miejsce gromadzenia się znacznika na podstawie promieniowania emitowanego przez izotop promieniotwórczy.

Z zewnątrz wszystkie nowoczesne urządzenia do diagnostyki obrazowej wyglądają podobnie – bramka, przez którą powoli przesuwany jest pacjent.

Współczesne technologie pozwalają na przedstawienie obrazu całego ciała człowieka. Na zdjęciu pływaczka; jeden z pierwszych obrazów całego ciała otrzymany metodą magnetycznego rezonansu jądrowego.



**TRADYCYJNE ZDJĘCIE RENTGENOWSKIE NA KLISZY.** Do dzisiaj jest to bardzo często stosowana metoda, pomocna w stawianiu diagnozy lekarskiej. O jej popularności decydują: zadowalająca jakość zdjęć, niskie koszty i powszechna dostępność.

Metody obrazowania stosuje się również w technice. Rentgenowskie aparaty do prześwietlania bagażu są standardowym wyposażeniem lotnisk, w laboratoriach przemysłowych za ich pomocą bada się budowę i pracę różnych urządzeń.

**PRZEŚWIETLANIE BAGAŻY NA LOTNISKU.** W promieniowaniu rentgenowskim doskonale widać metalowe przedmioty.

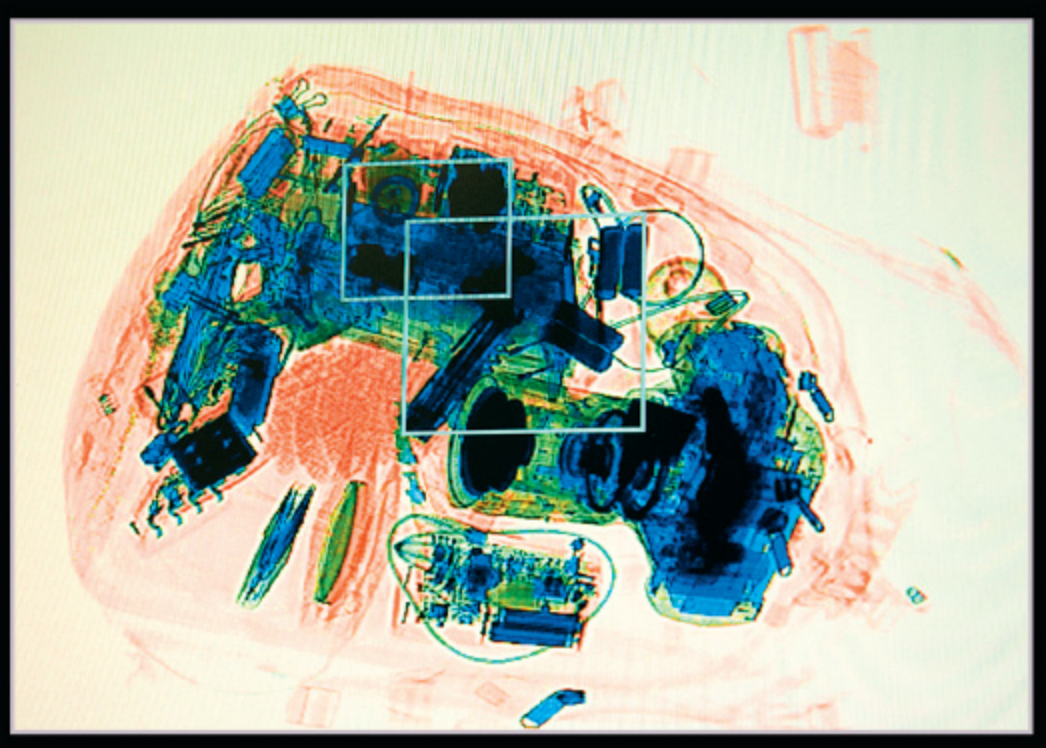


**Tabela 2.** Niektóre radioizotopy i ich zastosowanie w medycynie

| Izotop promieniotwórczy | Zastosowanie |
|---|---|
| chrom $^{51}Cr$ | badania krwi |
| fluor $^{18}F$ | diagnostyka i lokalizacja zmian nowotworowych |
| fosfor $^{32}P$ | biologia molekularna, badania krwi |
| jod $^{123}I$ | diagnostyka chorób tarczycy |
| kobalt $^{60}Co$ | bomba kobaltowa do naświetlań komórek nowotworowych, sterylizacja sprzętu medycznego |
| rad $^{226}Ra$ | radioterapia z zastosowaniem igieł radowych |
| technet $^{99}Tc$ | diagnostyka, radioizotop najpowszechniej stosowany w medycynie |
| tryt $^{3}H$ | badania metabolizmu |
| wapń $^{47}Ca$ | wykrywanie nowotworów kości |

## Zastosowanie radioizotopów w gospodarce

Jonizujące właściwości promieniowania jądrowego wykorzystuje się podczas produkcji i przetwarzania żywności. Warto pamiętać, że **żywność poddana promieniowaniu jądrowemu wcale nie staje się promieniotwórcza**. Różnorodność zastosowań izotopów promieniotwórczych w gospodarce żywnościowej ilustruje tabela 3.

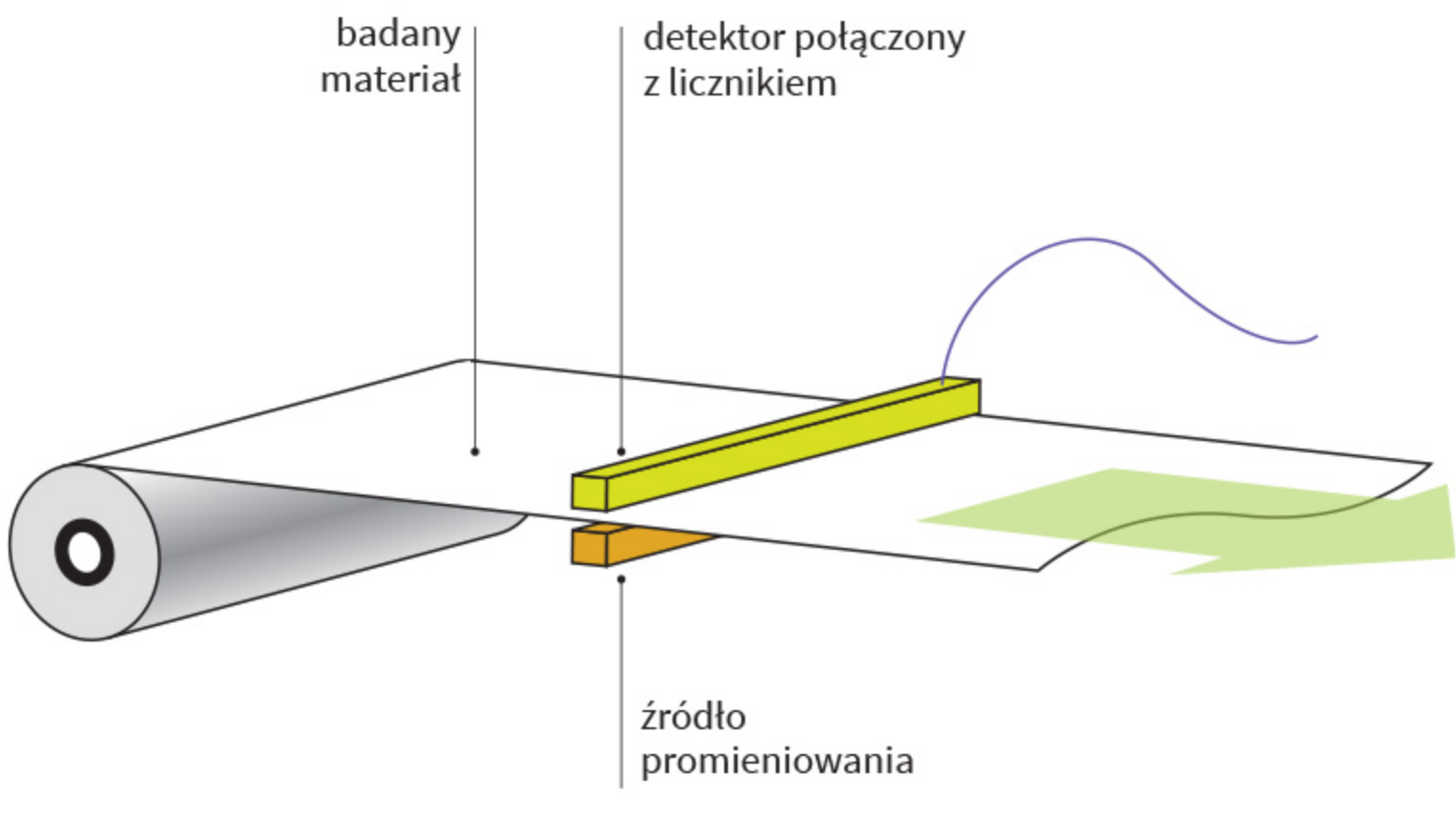
**Tabela 3.** Przykłady zastosowania promieniowania jądrowego w produkcji żywności

| Produkt | Dawka pochłoniętego promieniowania (kGy) | Skutek napromieniowania |
|---|---|---|
| zioła, glukoza, kazeina, guma arabska, żelatyna, przyprawy, substancje enzymatyczne | 2,0–10,0 | spadek zawartości mikroorganizmów |
| pasza dla zwierząt, mrożonki morskie, drób, mięso | 1,0–7,0 | eliminacja drobnoustrojów patogennych, powodujących psucie się produktów |
| ryby, pieczarki, truskawki | 1,0–3,0 | przedłużanie trwałości produktu |
| warzywa oraz owoce | 0,5–1,0 | zahamowanie dojrzewania |
| zboże, suszone owoce, warzywa strączkowe | 0,15–0,5 | eliminacja pasożytów, dezynfekcja |
| ziemniaki, cebula | 0,05–0,15 | zahamowanie kiełkowania |

**Ryc. 36.3.** Dwa ziemniaki po długim okresie przechowywania w tych samych warunkach. Po prawej stronie ziemniak napromieniowany dawką 200 Gy

Izotopy promieniotwórcze wprowadzone w niewielkich ilościach do materii rozprzestrzeniającej się w danym układzie pozwalają śledzić ruch określonych substancji. W sposób naturalny rozprzestrzeniają się one w atmosferze czy zbiornikach wodnych, ale wykorzystuje się je także w procesach produkcyjnych. Dodanie tych izotopów do cieczy lub gazów wypełniających układy mechaniczne umożliwia analizę zużycia mechanicznego pracujących części (np. w silnikach samochodowych). Dzięki promieniowaniu wysyłanemu przez izotopy można śledzić cyrkulację płynów wypełniających układ i lokalizować miejsca ich nadmiernego gromadzenia się lub niedoboru.

Promieniowanie przechodzące przez materię jest przez nią częściowo pochłaniane. Im grubsza warstwa substancji, tym większa część promieniowania jest pochłaniana. Zależność tę wykorzystuje się przy kontroli grubości blach, papieru itp. już na etapie produkcji (ryc. 36.4). Do takich badań najczęściej stosuje się izotop talu $^{204}Tl$.




**Ryc. 36.4.** Detektor promieniowania pozwala na pomiar grubości materiału bez zatrzymywania taśmy

Współczesne detektory promieniowania mają bardzo wysoką czułość, dzięki czemu izotopy promieniotwórcze stosowane w różnych dziedzinach gospodarki można aplikować w bardzo małych dawkach. Promieniowanie emitowane przez tak małe ilości radioizotopów jest dla ludzi zupełnie nieszkodliwe.

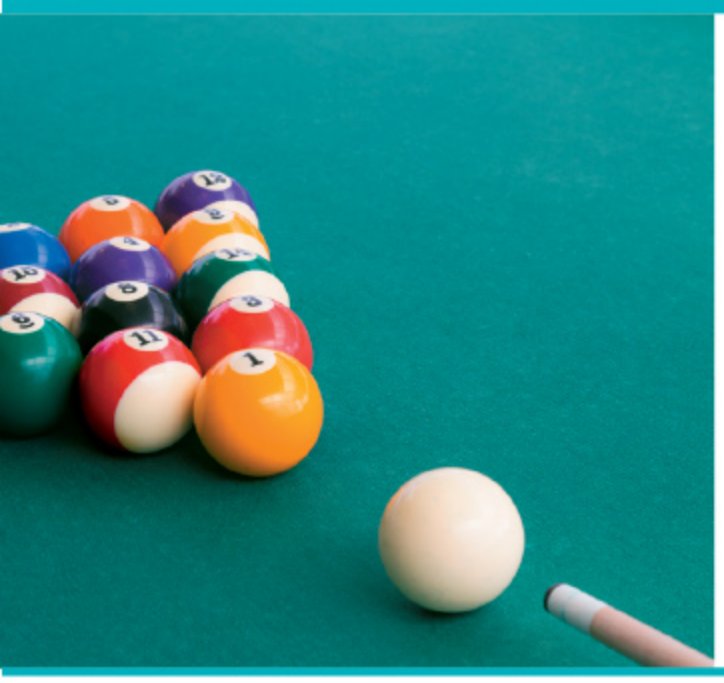
F

## PODSUMOWANIE

- **Datowanie radioizotopowe** to określanie wieku próbek z wykorzystaniem rozpadu promieniotwórczego.
- **Znaczniki** to związki chemiczne zawierające izotop promieniotwórczy, wykorzystywane w medycynie, technice i badaniach środowiska.
- **Szkodliwość promieniowania jądrowego** wykorzystuje się w onkologii do niszczenia komórek nowotworowych oraz do sterylizacji materiałów medycznych i żywności.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Dlaczego do datowania wieku skał używa się izotopów o bardzo długim czasie połowicznego rozpadu?
2. Jakiego rodzaju promieniowania jądrowego – $\alpha, \beta$ czy $\gamma$ – należałoby użyć do pomiaru grubości blachy na puszki do napojów, a jakiego do bardzo cienkiej folii do żywności (sytuacja przedstawiona na rycinie 36.4)? Uzasadnij odpowiedź.
3. Torf powstaje z obumarłych roślin, jest najmłodszą formą węgla kopalnego. W torfie pochodzącym z rezerwatu przyrody Torfowisko pod Zieleńcem w Górach Bystrzyckich stwierdzono zawartość węgla $^{14}C$ na poziomie około 40 % początkowej zawartości. Oszacuj wiek torfowiska.
4. Dlaczego w leczeniu nowotworów narządów wewnętrznych do naświetlań nie używa się promieniowania $\alpha$?
5. Jednym ze specjalistycznych zastosowań izotopów promieniotwórczych jest wykorzystanie plutonu $^{238}Pu$ jako źródła energii w sondach kosmicznych (patrz ramka *Warto wiedzieć* w rozdziale 34). Bryłka plutonu – dzięki energii emitowanych cząstek $\alpha$ – jest bez przerwy gorąca.
   Oszacuj, ile cząstek na sekundę emituje próbka plutonu wykorzystana jako źródło o mocy 3000 W. Energia cząstki $\alpha$ wyemitowanej z tego izotopu to 5,6 MeV.



# 37. Energia wiązania

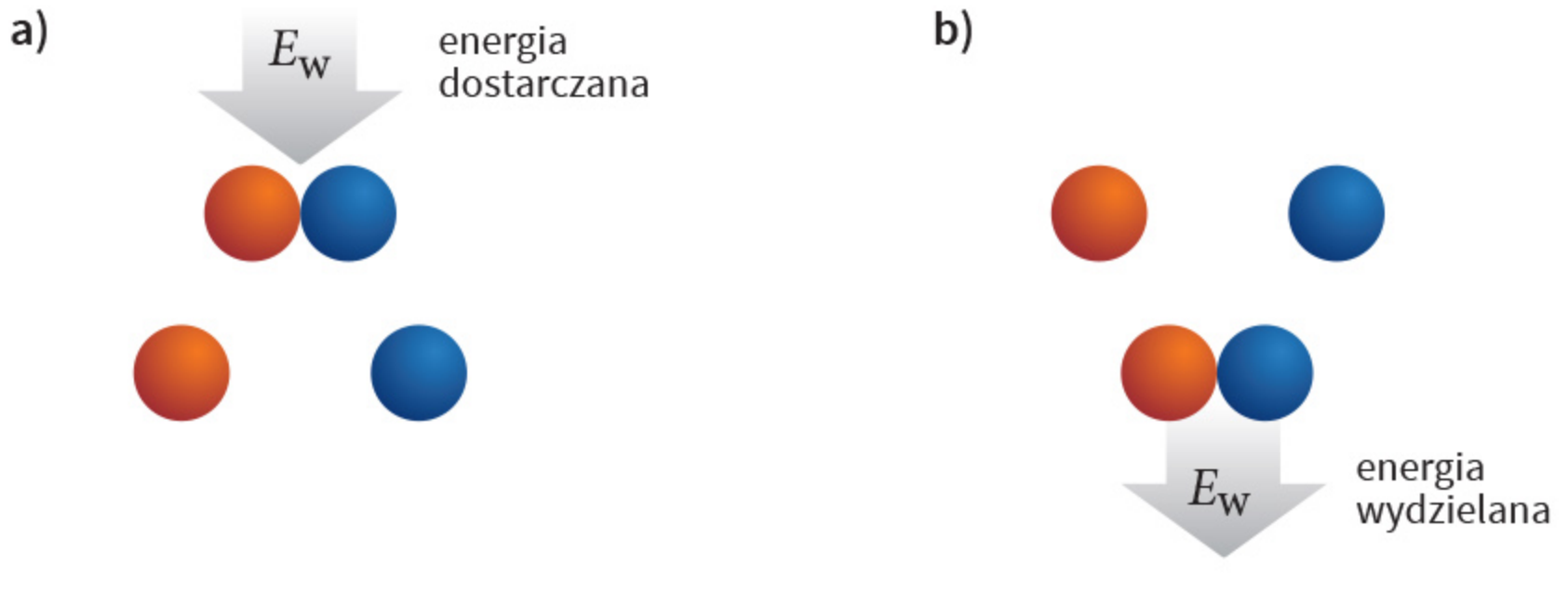
- Energia wiązania jądra
- Energia wiązania na jeden nukleon
- Energia w reakcjach jądrowych

➔ **Przypomnij sobie** budowę jąder atomowych i właściwości sił jądrowych.

Nukleony są silnie związane w jądrze atomowym. Jakiej potrzeba energii, by „wyciągnąć" nukleon z jądra? A jakiej, żeby rozbić jądro na nukleony składowe? Zrozumienie tych zagadnień było ważnym krokiem prowadzącym do praktycznego wykorzystywania energii jądrowej, czyli energii oddziaływań jądrowych.

## Energia wiązania jądra

Aby rozdzielić jądro atomowe na poszczególne nukleony, należy podziałać na te nukleony siłą większą od sił przyciągających je do siebie. W doświadczeniach przeprowadzanych w laboratoriach fizycznych nie analizuje się sił działających na wybrane nukleony, lecz mierzy się ich energie. Z tego powodu w fizyce jądrowej mówimy nie o siłach, lecz o energii. Rozbicie jądra atomowego na poszczególne nukleony zachodzi w wyniku zderzenia z cząstką, która przekazuje jądru odpowiednią energię (ryc. 37.1a). Energię potrzebną do tego celu nazywamy **energią wiązania jądra** i oznaczamy jako $E_w$. Na przykład energia wiązania jądra deuteru (izotop wodoru) wynosi ok. 2,2 MeV.




**Ryc. 37.1. a)** Jądro deuteru otrzymuje energię, więc proton i neutron zostają rozdzielone. **b)** Podczas powstawania deuteru energia się wydziela

**Energia wiązania jądra** to energia potrzebna do rozbicia jądra na poszczególne nukleony.

Łączenie się nukleonów w jądro atomowe jest procesem odwrotnym. Energia jądra jest mniejsza od energii swobodnych nukleonów, dlatego podczas tworzenia jądra energia jest wydzielana (ryc. 37.1b).

## WARTO WIEDZIEĆ

**Energia wiązania poza fizyką jądrową**

O energii wiązania można mówić w przypadku każdego układu związanego. Na przykład w celu rozbicia atomu wodoru (czyli wybicia z niego elektronu) trzeba przekazać mu energię co najmniej 13,6 eV. Jest to energia wiązania atomu wodoru, nazywana w fizyce atomowej **energią jonizacji**. Energia ta jest zdecydowanie mniejsza od energii wiązania jądra deuteru, a to oznacza, że nukleony w jądrach są związane dużo silniej niż elektrony w atomach.

W chemii funkcjonuje pojęcie **energii wiązania chemicznego**, czyli najmniejszej energii koniecznej do rozerwania danego wiązania chemicznego. Na przykład energia wiązania silnie trującego tlenku węgla (CO) wynosi 11,2 eV, zaś chlorowodoru (HCl) 4,5 eV.

Gdy chcemy porąbać drewniany pieniek na szczapy drewna, musimy mu dostarczyć energię co najmniej równą tej koniecznej do oderwania szczap do siebie. Gdy energia wiązania szczap jest duża, potrzebny jest odpowiednio duży wysiłek.

## Energia wiązania na jeden nukleon

Im większe jądro, tym większa jest jego energia wiązania, czyli tym trudniej rozdzielić je na poszczególne nukleony. Jeśli podzielimy energię wiązania jądra przez liczbę nukleonów, czyli przez liczbę masową $A$, otrzymamy tzw. energię wiązania przypadającą na jeden nukleon $\frac{E_\mathrm{w}}{A}$. Zależność tej energii od liczby nukleonów przedstawia rycina 37.2. Na podstawie tego wykresu możemy obliczyć energię wiązania każdego jądra – odczytaną z wykresu energię wiązania na nukleon należy pomnożyć przez liczbę masową.

**PRZYKŁAD 1.**

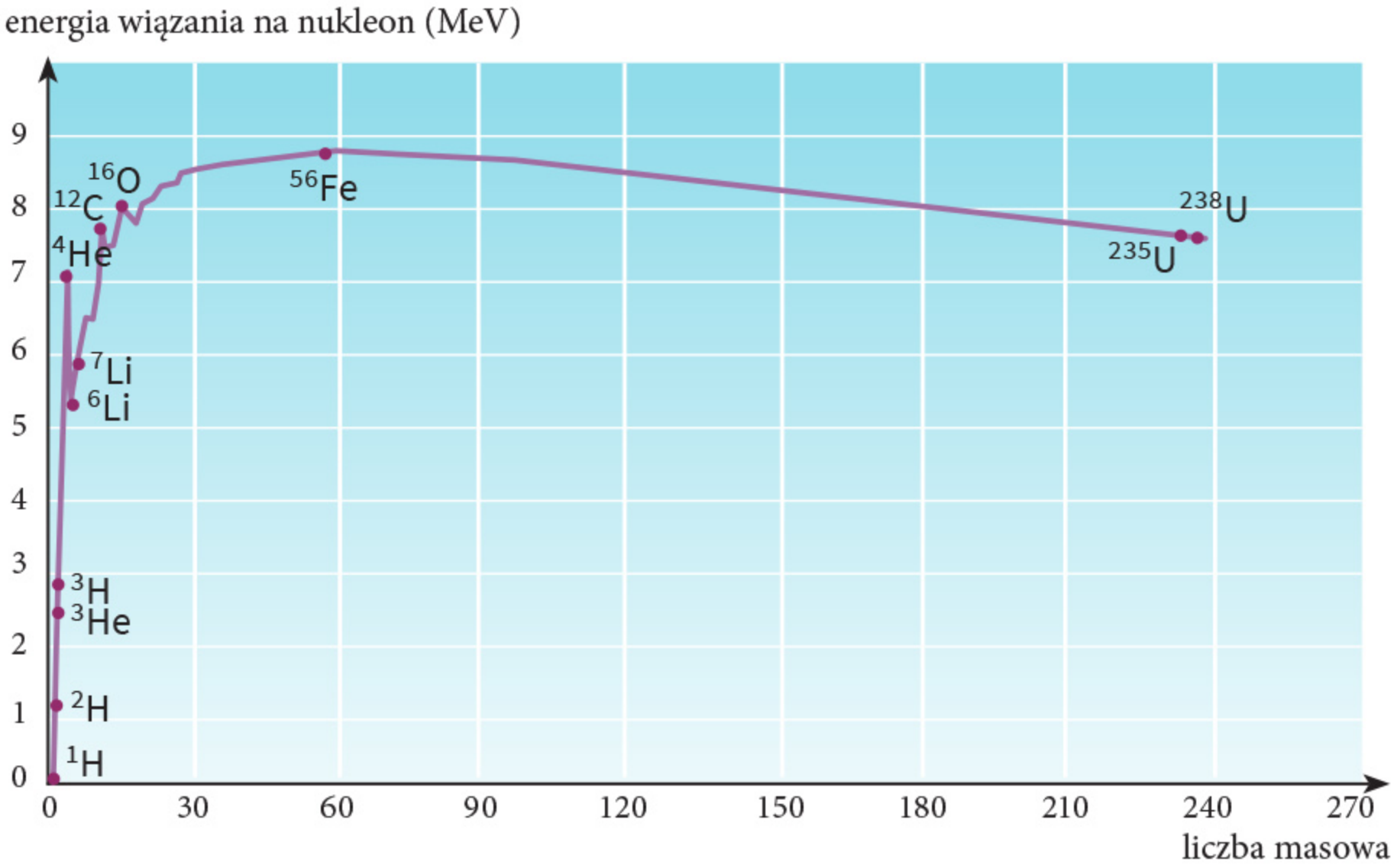
Obliczmy na podstawie wykresu z ryciny 37.2 energię wiązania jądra tlenu $^{16}_{8}\mathrm{O}$.

Z wykresu odczytujemy, że energia wiązania na nukleon dla tego jądra wynosi ok. 8 MeV. W jądrze tlenu $^{16}_{8}\mathrm{O}$ jest 16 nukleonów, więc energię wiązania całego jądra otrzymamy po pomnożeniu energii wiązania na nukleon przez 16:

$$E_\mathrm{w} \approx 16 \cdot 8\ \mathrm{MeV} = 128\ \mathrm{MeV}$$

Energia wiązania jądra tlenu to 128 MeV. Tyle potrzeba energii, by rozbić jądro na poszczególne nukleony.

Dla ciężkich jąder energia wiązania na nukleon może być w przybliżeniu traktowana jako energia potrzebna do wybicia z jądra jednego nukleonu. Na wykresie z ryciny 37.2 widać, jak zmienia się energia wiązania na jeden nukleon wraz ze wzrostem liczby nukleonów. Jądro wodoru $^{1}_{1}\mathrm{H}$ nie ma energii wiązania, bo składa się tylko z jednego protonu. Dla niedużych jąder w miarę dołączania kolejnych nukleonów energia wiązania na nukleon rośnie, gdyż każdy z nukleonów ma coraz więcej „sąsiadów", którzy go przyciągają. W odpowiednio dużych jądrach wybrany nukleon nie oddziałuje już ze wszystkimi pozostałymi nukleonami, tylko z sąsiadującymi – wówczas energia wiązania na nukleon przestaje rosnąć wraz z liczbą masową.




**Ryc. 37.2.** Zależność energii wiązania na nukleon od liczby masowej

Najmocniej związane są jądra o liczbie masowej około 60. Dla cięższych jąder wraz ze wzrostem liczby masowej energia wiązania na nukleon powoli maleje. Podstawową tego przyczyną jest większy wpływ odpychania elektrycznego między protonami. Siły jądrowe działają tylko między sąsiednimi nukleonami, natomiast każdy proton jest odpychany elektrycznie przez wszystkie pozostałe protony w jądrze. Wobec tego im więcej protonów w dużym jądrze, tym słabiej jest ono związane. Na przykład do wybicia nukleonu z jądra żelaza zawierającego 26 protonów potrzeba średnio energii o 1 MeV większej niż do wybicia nukleonu z jądra uranu mającego aż 92 protony.

## Energia w reakcjach jądrowych

Gdy znamy energię wiązania, możemy ustalić, czy w danej reakcji energia się wydzieli, czy też trzeba jej dostarczyć, by reakcja w ogóle zaszła. Każdą reakcję jądrową możemy wyobrazić sobie jako rozbicie składników wyjściowych na poszczególne nukleony, a potem złożenie z nich produktów reakcji. Rozbicie jąder wymaga dostarczenia energii równej ich energii wiązania. Natomiast gdy swobodne nukleony łączą się w jądra atomowe, wyzwala się przy tym energia równa energii wiązania produktów reakcji. **Gdy energia wiązania produktów reakcji jest większa od energii wiązania jąder wchodzących w reakcję, wydziela się różnica tych energii.** Wydzieloną energię unosi najczęściej promieniowanie lub same produkty reakcji w postaci energii kinetycznej. Przykładem jest rozpad promieniotwórczy – zachodzi on bez dostarczania energii z zewnątrz, a emitowane cząstki unoszą energię równą różnicy energii wiązania produktów reakcji i jądra ulegającego rozpadowi. Odwrotnie jest w przypadku reakcji jądrowych wymagających energii z zewnątrz. Gdy znamy energię wiązania jąder wchodzących w reakcję oraz produktów reakcji, możemy obliczyć energię potrzebną do zajścia takiej reakcji.

**PRZYKŁAD 2.**

Podczas rozpadu promieniotwórczego jądra radu:

$$^{223}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{219}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

wydziela się 6 MeV energii. Oszacujmy różnicę energii wiązania dla jąder radu $^{223}_{88}\mathrm{Ra}$ oraz radonu $^{219}_{86}\mathrm{Rn}$.

Energia wiązania po rozpadzie zwiększyła się o 6 MeV, gdyż taka energia się wydzieliła. To znaczy, że suma energii wiązania dla jąder radonu $^{219}_{86}\mathrm{Rn}$ oraz helu $^{4}_{2}\mathrm{He}$ jest większa o 6 MeV od energii wiązania dla jądra radu $^{223}_{88}\mathrm{Ra}$.

$$E_{\mathrm{wRa}} + 6\ \mathrm{MeV} = E_{\mathrm{wRn}} + E_{\mathrm{wHe}}$$

Z wykresu z ryciny 37.2 możemy wyznaczyć energię wiązania dla jądra helu:

$$E_{\mathrm{wHe}} \approx 4 \cdot 7{,}1\ \mathrm{MeV} = 28{,}4\ \mathrm{MeV}$$

Podstawiamy tę wartość do równania i obliczamy różnicę energii wiązania dla jąder radu oraz radonu:

$$E_{\mathrm{wRa}} + 6\ \mathrm{MeV} = E_{\mathrm{wRn}} + 28{,}4\ \mathrm{MeV}$$

$$E_{\mathrm{wRa}} - E_{\mathrm{wRn}} = 22{,}4\ \mathrm{MeV}$$

Energia wiązania dla jądra radu $^{223}_{88}\mathrm{Ra}$ jest zatem o 22,4 MeV większa od energii wiązania dla jądra radonu $^{219}_{86}\mathrm{Rn}$.

## PODSUMOWANIE

- **Energia wiązania** to energia potrzebna do rozbicia jądra na poszczególne nukleony.
- Dla ciężkich jąder **energia wiązania na nukleon** określa w przybliżeniu energię potrzebną do wybicia z jądra jednego nukleonu.
- Gdy energia wiązania produktów reakcji jest większa od energii wiązania jąder wchodzących w reakcję, wydziela się różnica tych energii.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Na podstawie wykresu z ryciny 37.2 oszacuj energię wiązania jądra uranu $^{238}_{92}\mathrm{U}$.
2. Z którego jądra – żelaza $^{56}\mathrm{Fe}$ czy uranu $^{238}\mathrm{U}$ – łatwiej jest usunąć jeden neutron? Skorzystaj z wykresu na rycinie 37.2 i uzasadnij odpowiedź.
3. Które jądro ma większą energię wiązania: $^{4}\mathrm{He}$ czy $^{6}\mathrm{Li}$? Skorzystaj z wykresu na rycinie 37.2 i uzasadnij odpowiedź.
4. Na podstawie wykresu z ryciny 37.2 sprawdź, czy podczas reakcji jądrowej, w której lit i deuter tworzą hel, wydziela się energia.

$$^{6}_{3}\mathrm{Li} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

5. Energia niezbędna do całkowitej jonizacji helu (czyli do wybicia dwóch elektronów) wynosi 78,7 eV. Ile razy większa jest energia wiązania jądra $^{4}_{2}\mathrm{He}$ od energii wiązania atomu helu?

# 38. Deficyt masy

- Związek masy i energii
- Deficyt masy
- Deficyt masy a energia wiązania

➔ **Przypomnij sobie**, co to jest energia wiązania.

Najsłynniejszy wzór fizyki przedstawia wzajemną zależność energii ciała i jego masy. Zależność ta jest najlepiej widoczna w zjawiskach jądrowych.

## Współzależność energii i masy

W 1905 roku Albert Einstein sformułował swoją fundamentalną szczególną teorię względności, a częścią tej teorii jest wzór wiążący tzw. energię spoczynkową każdego ciała z jego masą:

$$E_0 = m \cdot c^2 \tag{1}$$

gdzie:
$E_0$ – energia spoczynkowa ciała,
$m$ – masa ciała,
$c$ – prędkość światła w próżni.

Energia spoczynkowa to całkowita energia ciała spoczywającego i nieoddziałującego z otoczeniem. Jest to całkowita energia wewnętrzna każdego ciała.

> Energia spoczynkowa każdego ciała jest wprost proporcjonalna do jego masy.

**PRZYKŁAD 1.**
Drewniane biurko ma masę 20 kg. Obliczmy jego energię spoczynkową. Porównajmy tę energię z energią uzyskaną ze spalenia 20 kg drewna, która wynosi ok. $3 \cdot 10^8$ J.

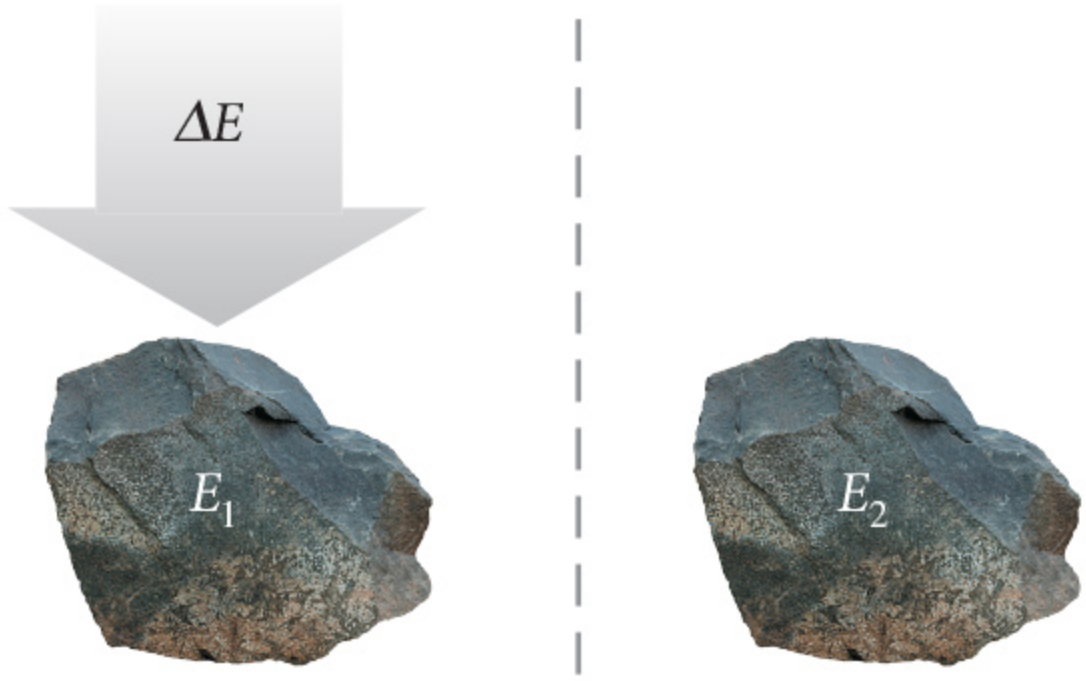
Podstawiamy dane do wzoru (1):

$$E_0 = 20\ \text{kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 20\ \text{kg} \cdot 9 \cdot 10^{16}\ \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 1{,}8 \cdot 10^{18}\ \text{J}$$

Energia spoczynkowa drewna jest 6 miliardów razy większa od energii uzyskanej z jego spalenia.

Energia spoczynkowa biurka z przykładu 1. jest aż trzykrotnie większa od rocznej produkcji energii elektrycznej w Polsce. Niestety, na razie nikt nie wymyślił sposobu przemiany **całej** energii spoczynkowej ciała na użyteczny dla nas rodzaj energii.

Wzór Einsteina (1) nie tylko wskazuje na ogromną energię drzemiącą w każdym ciele, ale można z niego wywnioskować także, że masa otaczających nas przedmiotów nie jest stała. Jeśli zmienia się energia spoczynkowa ciała, musi się również zmienić jego masa. Na przykład gdy do ciała o energii spoczynkowej $E_1$ dostarczymy energię $\Delta E$ (np. w postaci ciepła), która spowoduje wzrost jego energii spoczynkowej do wartości $E_2$ (ryc. 38.1), to masa ciała wzrośnie.




**Ryc. 38.1.** Przekaz energii zmieniający energię spoczynkową ciała

Zgodnie z zasadą zachowania energii możemy napisać:

$$E_1 + \Delta E = E_2$$

Przekształcamy równanie i podstawiamy wzór Einsteina:

$$\Delta E = m_2 c^2 - m_1 c^2$$

a następnie dzielimy stronami równanie przez $c^2$:

$$\frac{\Delta E}{c^2} = m_2 - m_1$$

Widać, że masa ciała zmieniła się o:

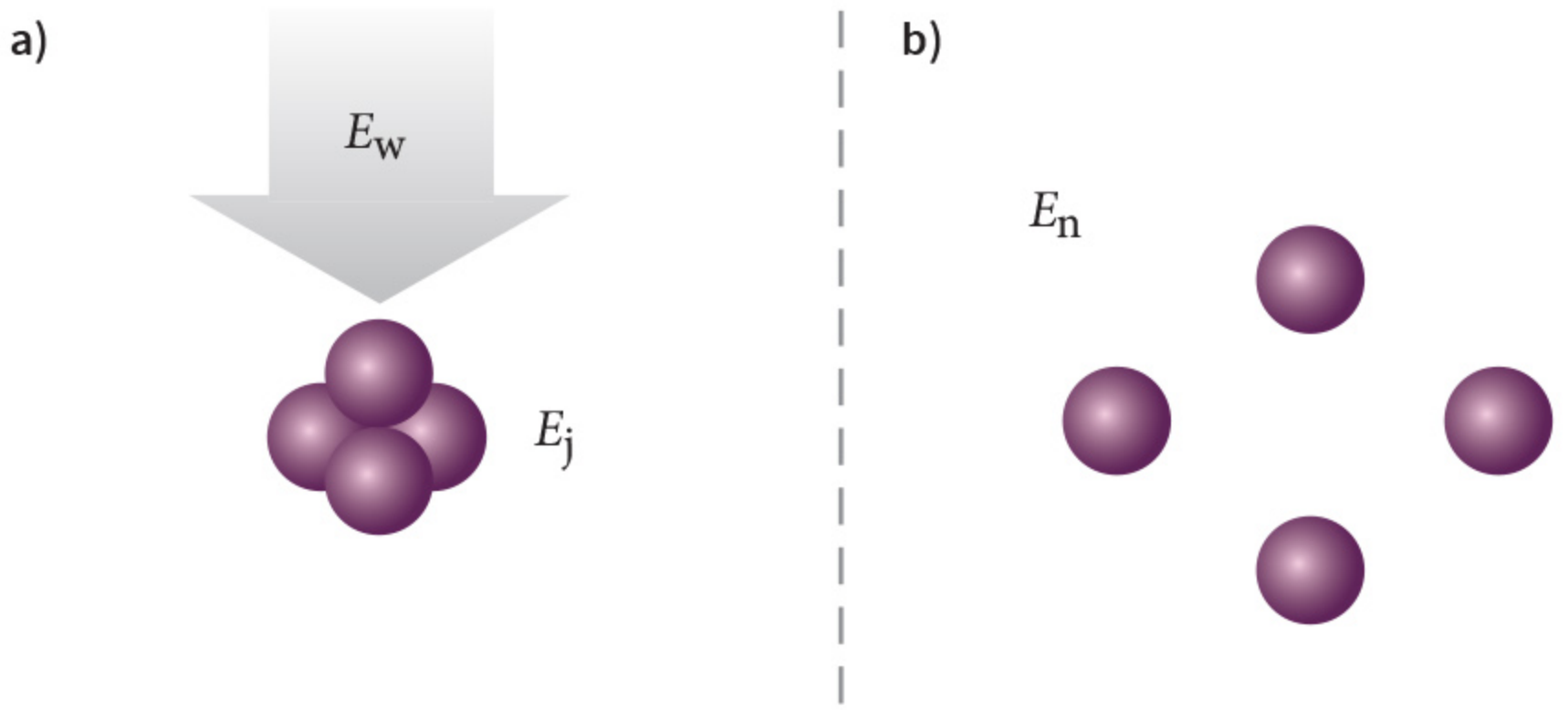
$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \qquad (2)$$

Ze wzoru (2) możemy obliczyć przyrost masy ciała (lub układu ciał), gdy zmienia się jego energia spoczynkowa. Jeśli energia jest dostarczana ciału, przyrost energii $\Delta E$ jest dodatni, a zatem masa ciała się zwiększa. Jeśli ciało oddaje energię, to $\Delta E$ jest ujemne i wtedy masa ciała maleje. Na przykład masa skały nieco wzrośnie, gdy zwiększy się jej temperatura, bo wzrośnie jej energia wewnętrzna. Gdy temperatura skały zmaleje, zmaleje również jej masa. Zmiany masy ciał z naszego otoczenia są jednak **niezauważalnie małe**, ponieważ w mianowniku we wzorze (2) występuje $c^2 = 9 \cdot 10^{16}\ \mathrm{m^2/s^2}$.

## Deficyt masy

Wzór (1) jest uniwersalny, zatem spełniony również w przypadku jąder atomowych. W trakcie procesu rozbicia jądra na nukleony składowe należy dostarczyć mu energię równą energii wiązania (ryc. 38.2). Suma energii spoczynkowych uwolnionych z jądra nukleonów jest większa od energii spoczynkowej jądra atomowego, zatem masa układu swobodnych nukleonów jest większa od masy jądra. Przyrost masy można obliczyć ze wzoru (2).

Masa jądra atomowego jest mniejsza od sumy mas nukleonów swobodnych, składających się na strukturę jądra atomowego. Różnica tych mas nazywana jest **deficytem masy**.




**Ryc. 38.2.** Rozbicie jądra na nukleony składowe dzięki przekazaniu energii. Energia jądra $E_j$ (a) jest mniejsza niż suma energii swobodnych nukleonów $E_n$ (b)

**PRZYKŁAD 2.**

Obliczmy deficyt masy dla jądra manganu $^{55}_{25}\mathrm{Mn}$, którego masa wynosi $91{,}2039 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$. Obliczenia wykonajmy z dokładnością do czterech cyfr znaczących. Jaką część masy jądra stanowi deficyt masy?

Jądro manganu $^{55}_{25}\mathrm{Mn}$ składa się z 25 protonów i 30 neutronów. Znamy masy protonu i neutronu, więc możemy obliczyć sumę mas wszystkich składowych nukleonów tego jądra:

$$m = 25 \cdot 1{,}673 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} + 30 \cdot 1{,}675 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} \approx 92{,}08 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

Deficyt masy to różnica między sumą mas nukleonów swobodnych a masą jądra. Obliczamy:

$$\Delta m = m - m_j = 92{,}08 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} - 91{,}20 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} = 0{,}88 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

Deficyt masy jest bardzo mały, nawet w stosunku do masy jądra.

$$\frac{\Delta m}{m_j} = \frac{0{,}88 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}}{91{,}20 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}} \approx 0{,}01$$

Deficyt masy dla jądra $^{55}_{25}\mathrm{Mn}$ stanowi około 1 % masy tego jądra.

Okazuje się, że dla prawie wszystkich jąder atomowych deficyt masy to ok. 1 % masy jądra. To znaczy, że jądra atomowe są lżejsze mniej więcej o 1 % od sumy mas swoich składników. Dlatego, gdy dodamy do siebie masy składników jądra, to wyznaczymy jego masę z dokładnością do 1 %.

Dla energii wiązania wzór (2) możemy napisać w postaci:

$$\Delta m = \frac{E_w}{c^2} \tag{1}$$

gdzie:
$\Delta m$ – deficyt masy,
$E_w$ – energia wiązania jądra,
$c$ – prędkość światła.

Gdy znamy deficyt masy, możemy obliczyć energię wiązania. I odwrotnie: gdy znamy energię wiązania, możemy obliczyć deficyt masy.

**PRZYKŁAD 3.**

Obliczmy energię wiązania jądra węgla $^{12}C$, jeśli zmierzono, że jego deficyt masy jest równy $0{,}16 \cdot 10^{-27}$ kg.

Energię wiązania obliczamy ze wzoru (3):

$$E_w = 0{,}16 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 1{,}44 \cdot 10^{-11}\ \text{J} = 90\ \text{MeV}$$

**PRZYKŁAD 4.**

Obliczmy deficyt masy jądra $^4_2He$ na podstawie danych z wykresu na rycinie 37.2.

Z wykresu odczytujemy, że dla jądra $^4_2He$ energia wiązania na nukleon wynosi ok. 7 MeV .

Wobec tego:

$$E_w = 4 \cdot 7\ \text{MeV} = 28\ \text{MeV} = 28 \cdot 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 4{,}48 \cdot 10^{-12}\ \text{J}$$

Przekształcamy wzór (3) i obliczamy:

$$\Delta m = \frac{4{,}48 \cdot 10^{-12}\ \text{J}}{\left(3 \cdot 10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} = \frac{4{,}48 \cdot 10^{-12}\ \text{J}}{9 \cdot 10^{16}\ \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} \approx 5 \cdot 10^{-29}\ \text{kg}$$

Wnioski wyciągnięte ze wzoru Einsteina (1) obowiązują nie tylko w fizyce jądrowej. Również w reakcjach chemicznych masa substratów różni się od masy produktów. Jednak poza fizyką jądrową wszystkie te różnice są niezmiernie małe, więc można je spokojnie pominąć. Tylko w zjawiskach jądrowych różnice sięgają 1 %.

## PODSUMOWANIE

- **Energia spoczynkowa** każdego ciała dana jest wzorem:

$$E_0 = m \cdot c^2$$

- Masa ciała zmienia się wraz z jego energią spoczynkową, jednak te zmiany są bardzo małe.
- Masa jądra atomowego jest mniejsza od sumy mas nukleonów swobodnych, składających się na strukturę jądra atomowego. Różnicę tych mas nazywamy **deficytem masy**.
- Związek energii wiązania jądra z deficytem masy jest opisany wzorem:

$$E_\mathrm{w} = \Delta m \cdot c^2$$

## PYTANIA I ZADANIA

**1.** Energia wiązania jądra izotopu wodoru ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ wynosi 8,4 MeV, a jądra izotopu helu ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$ jest równa 7,8 MeV. Dla którego z tych jąder deficyt masy jest większy?

**2.** Oszacuj deficyt masy dla jądra uranu ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$. Skorzystaj z wykresu na rycinie 37.2.

**3.** **a)** Wykorzystując w obliczeniach masę protonu i neutronu oraz masę atomu, oblicz deficyt masy dla jądra fluoru ${}^{19}_{9}\mathrm{F}$. Masę atomu odczytaj z układu okresowego dołączonego do podręcznika. Obliczenia wykonaj z dokładnością do czterech cyfr znaczących. Wskazówka: zdecyduj, czy można pominąć masę elektronów, jeśli wiadomo, że masa elektronu jest prawie 2000 razy mniejsza od masy nukleonu.

**b)** Oblicz energię wiązania jądra fluoru ${}^{19}_{9}\mathrm{F}$.

**4.** Czy z punktu widzenia zasady zachowania energii swobodny neutron może się rozpaść na proton i elektron: $\mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e}$? A czy możliwy jest rozpad protonu na neutron i pozyton $(\mathrm{p} \rightarrow \mathrm{n} + \mathrm{e}^{+})$ bez oddziaływania z zewnątrz (pozyton ma masę taką jak elektron)? Uzasadnij odpowiedzi. Wskazówka: porównaj masy cząstek.

**5.** W pewnych warunkach jądro plutonu ${}^{239}\mathrm{Pu}$ dzieli się na jądro baru ${}^{144}\mathrm{Ba}$ oraz jądro strontu ${}^{94}\mathrm{Sr}$. Dla którego z tych trzech jąder deficyt masy jest największy? Uzasadnij odpowiedź.

# 39. Rozszczepienie jąder ciężkich

- Reakcja rozszczepienia
- Łańcuchowa reakcja rozszczepienia
- Materiały rozszczepialne

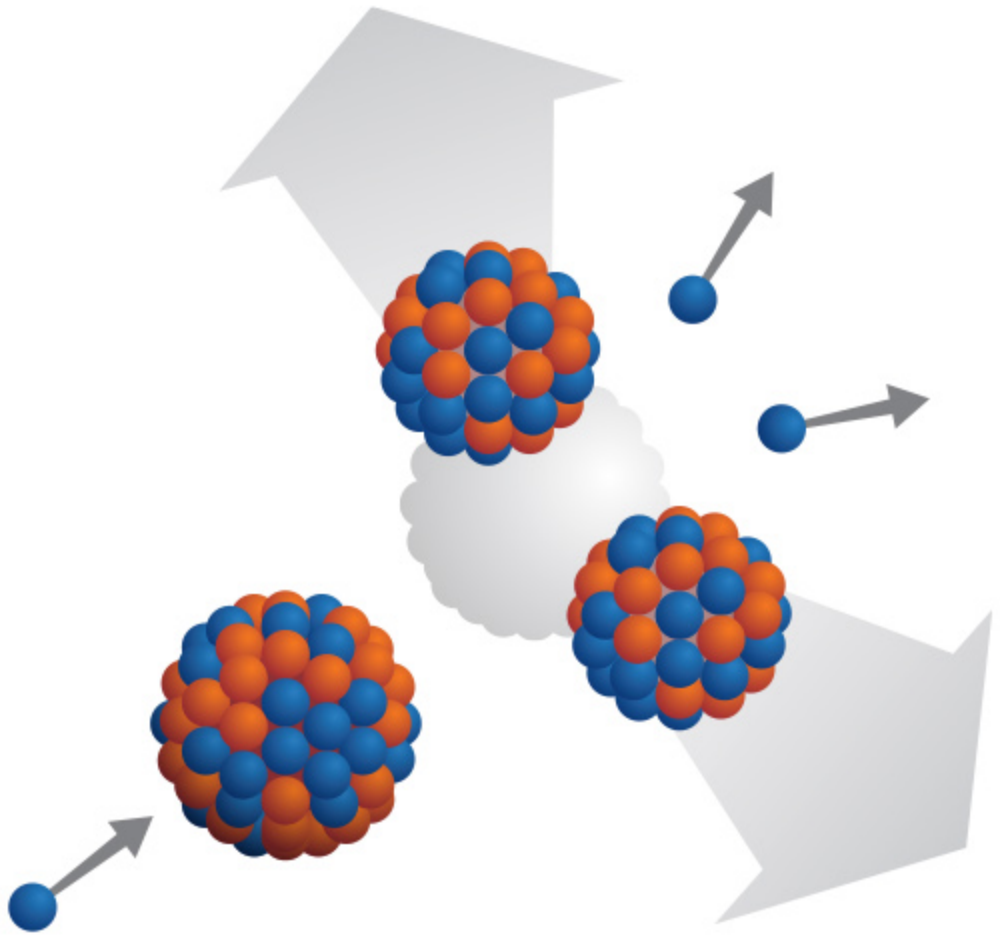
➔ **Przypomnij sobie** budowę jądra atomowego oraz wiadomości o energii wiązania przypadającej na nukleon.

W wyniku reakcji jądrowych z jednostki masy paliwa można uzyskać miliony razy więcej energii niż w reakcjach chemicznych. Rozszczepienie uranu jest reakcją wykorzystywaną na świecie jako źródło energii.

## Reakcja rozszczepienia

Niektóre ciężkie jądra atomowe po wchłonięciu neutronu dzielą się na dwa jądra o porównywalnych masach (rzadziej na więcej jąder). Taką reakcję nazywamy **rozszczepieniem jądra**. Gdy reakcja zachodzi, emitowane są również dwa lub trzy neutrony. Stosunkowo łatwo rozszczepieniu ulega jądro uranu $^{235}U$ (ryc. 39.1).

**Rozszczepienie** to rozpad jądra atomowego na lżejsze jądra o porównywalnych masach.



**Ryc. 39.1.** Rozszczepienie jądra atomowego po wchłonięciu neutronu. Wszystkie produkty rozszczepienia uzyskują dużą energię kinetyczną

Rozszczepienie jądra uranu może zajść na wiele sposobów. Poniżej przedstawiamy dwa przykłady. Oczywiście nie są to jedyne możliwe schematy przebiegu reakcji, gdyż mogą powstać również inne izotopy.

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow ^{101}_{43}\mathrm{Tc} + ^{132}_{49}\mathrm{In} + 3^{1}_{0}\mathrm{n}$$

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow ^{59}_{25}\mathrm{Mn} + ^{94}_{36}\mathrm{Kr} + ^{81}_{31}\mathrm{Ga} + 2^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Jądro uranu $^{235}\mathrm{U}$ pochłania neutron o odpowiedniej energii i przekształca się w jądro uranu $^{236}\mathrm{U}$, które jest w stanie wzbudzonym i prawie natychmiast rozszczepia się na lżejsze jądra.

W każdej reakcji jądrowej obowiązują zasady zachowania energii, ładunku elektrycznego i liczby nukleonów. Oznacza to, że zarówno suma liczb atomowych (czyli zapisanych w indeksie dolnym), jak i suma liczb masowych (zapisanych w indeksie górnym) po reakcji musi być taka sama jak przed reakcją.

Podczas rozszczepienia jest wyzwalana energia, gdyż suma energii wiązania produktów reakcji jest większa niż energia wiązania uranu. Z wykresu na rycinie 37.2 wynika, że energia wiązania na nukleon jest dla uranu mniej więcej o 1 MeV mniejsza niż dla jąder powstałych podczas rozszczepienia (ich liczby masowe są mniej więcej dwukrotnie mniejsze od liczby masowej uranu). W reakcji uczestniczy ponad 200 nukleonów, zatem łatwo oszacować, że w jej wyniku energia wiązania zwiększy się mniej więcej o 200 MeV. Tyle energii wyzwoli się w reakcji głównie w postaci energii kinetycznej produktów rozszczepienia.

**PRZYKŁAD 1.**

Oszacujmy energię, która uwalnia się podczas następującej reakcji rozszczepienia:

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow ^{95}_{38}\mathrm{Sr} + ^{139}_{54}\mathrm{Xe} + 2^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Uwalniana energia jest równa różnicy energii wiązania fragmentów rozszczepienia i jądra uranu (z neutronem łącznie). Dla uranu energia wiązania na nukleon wynosi ok. 7,6 MeV (odczytujemy to z wykresu na rycinie 37.2), zatem energia wiązania całego jądra $^{236}\mathrm{U}$ wynosi:

$$236 \cdot 7{,}6\ \mathrm{MeV} \approx 1794\ \mathrm{MeV}$$

Dla jąder powstałych w wyniku rozszczepienia energia wiązania na nukleon jest większa: dla $^{95}_{38}\mathrm{Sr}$ to ok. 8,7 MeV, a dla $^{139}_{54}\mathrm{Xe}$ – 8,4 MeV. Wobec tego energia wiązania powstałych jąder w sumie wynosi:

$$95 \cdot 8{,}7\ \mathrm{MeV} + 139 \cdot 8{,}4\ \mathrm{MeV} \approx 1994\ \mathrm{MeV}$$

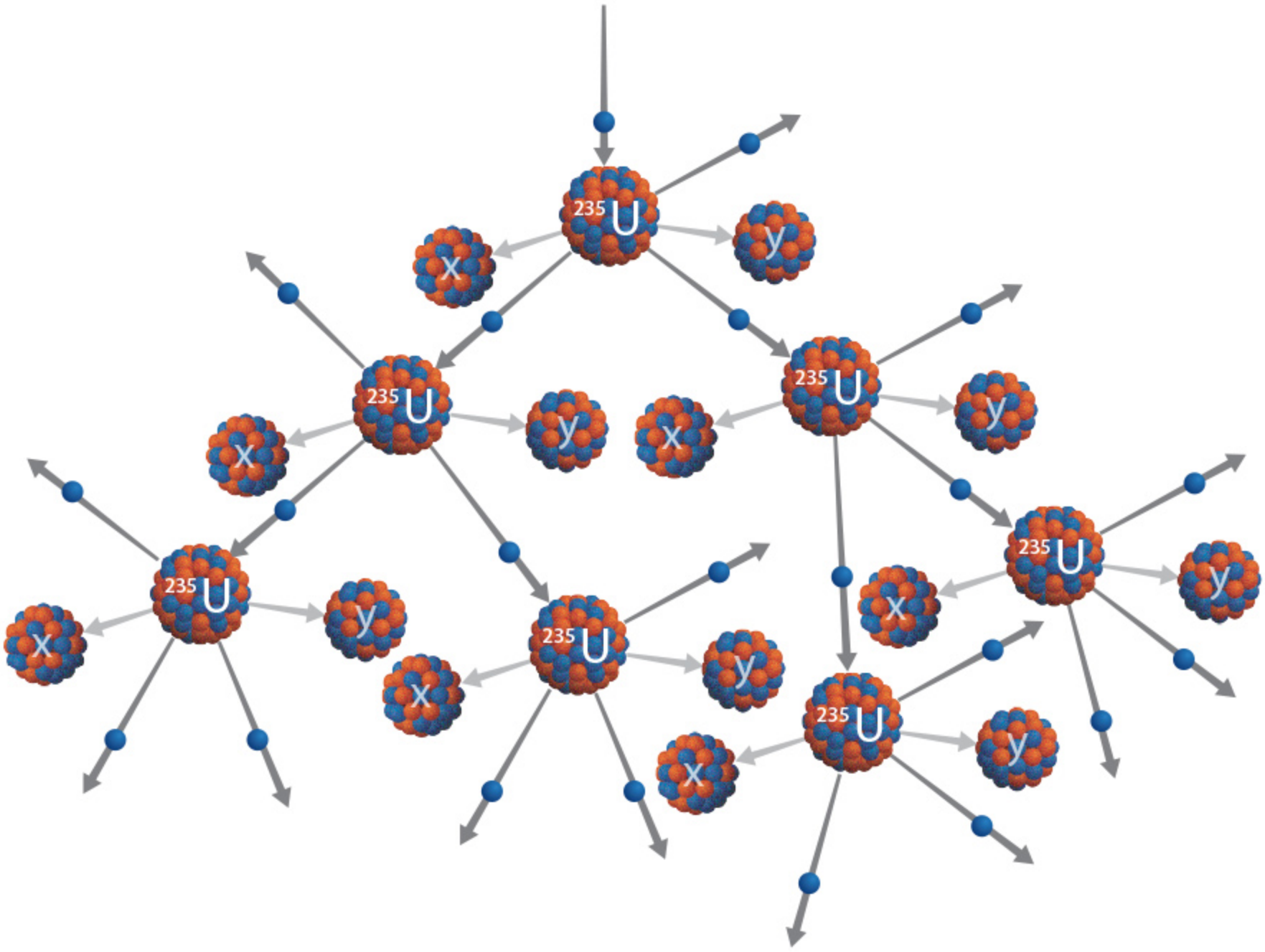
Obliczamy różnicę otrzymanych energii:

$$1994\ \mathrm{MeV} - 1794\ \mathrm{MeV} = 200\ \mathrm{MeV}$$

W reakcji wydzieli się ok. 200 MeV energii.

## Reakcja łańcuchowa

Produktami reakcji rozszczepienia oprócz jąder atomowych są również dwa lub trzy neutrony. Jeżeli taka reakcja zostanie zainicjowana w dostatecznie dużej próbce materiału rozszczepialnego, powstałe neutrony spowodują rozszczepienie kolejnych jąder. Znowu pojawią się neutrony, ale będzie ich przynajmniej dwa razy więcej, więc będą mogły rozszczepić znacznie więcej jąder i tak dalej. Raz zainicjowana reakcja będzie mogła się dalej sama podtrzymywać. Taką reakcję nazywamy **reakcją łańcuchową** (ryc. 39.2).




**Ryc. 39.2.** Kaskada rozszczepiających się jąder atomowych

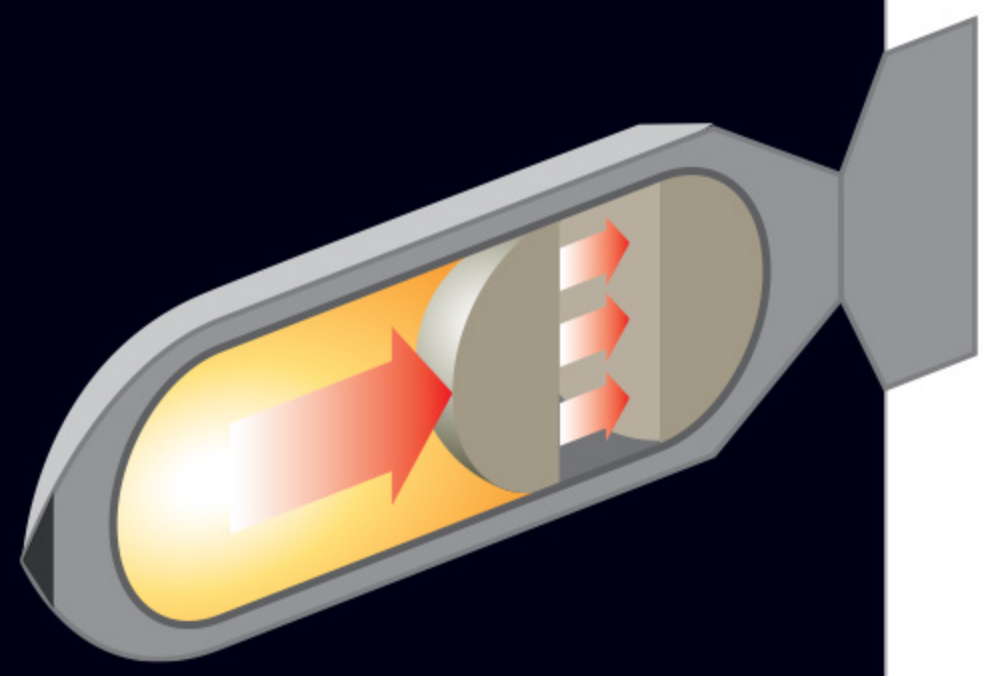
Po kilkudziesięciu etapach rozszczepieniu ulegnie już ogromna liczba jąder, a w każdej takiej reakcji wyzwoli się ok. 200 MeV energii. Każdy z etapów trwa w przybliżeniu $10^{-8}$ s, więc w ułamku sekundy zostanie uwolniona olbrzymia energia. Na tym polega mechanizm wybuchu jądrowego.

Opisany tu scenariusz może zdarzyć się tylko wtedy, gdy powstające neutrony trafią w jądro atomu. Jądra atomowe są bardzo małe, dlatego ilość materiału rozszczepialnego musi być stosunkowo duża, aby prawdopodobieństwo tego, że neutrony na swej drodze wewnątrz próbki trafią w jądro atomowe, było odpowiednio wysokie. W przeciwnym razie reakcja wygaśnie. **Masa krytyczna** to minimalna masa materiału rozszczepialnego, w której może zajść łańcuchowa reakcja rozszczepienia. Dla uranu $^{235}$U masa krytyczna to ok. 50 kg; taka ilość uranu ma objętość mniejszą niż piłka do siatkówki.

## WARTO WIEDZIEĆ

**Wybuch jądrowy**

Reakcję rozszczepienia jądra atomowego wykorzystano po raz pierwszy w bombie atomowej. Na szczęście pozyskiwanie materiału rozszczepialnego jest procesem bardzo kosztownym i trudnym technologicznie. Duński fizyk Niels Bohr w 1938 roku stwierdził, że „wyprodukowanie bomby wymaga wysiłków całego kraju".



Bomba atomowa zawiera materiał rozszczepialny o masie większej niż krytyczna. Wewnątrz bomby instaluje się dodatkowo źródło neutronów, aby w momencie wybuchu reakcja łańcuchowa szybciej się rozwijała.
Podczas transportu na miejsce detonacji materiał rozszczepialny jest rozdzielony na kilka części o masach mniejszych od krytycznej, by nie doprowadzić do reakcji łańcuchowej. Wybuch inicjuje się przez scalenie tych części w jedną całość za pomocą zwykłego materiału wybuchowego (ryc.).

Ogromna energia, która wyzwala się w momencie eksplozji, podgrzewa powietrze do tysięcy stopni Celsjusza i tworzy gigantyczną kulę ognia. W bezpośrednim sąsiedztwie miejsca wybuchu wysoka temperatura powoduje wyparowanie wszystkich organizmów żywych i zeszklenie gleby. Nagły wzrost ciśnienia spowodowany wybuchem generuje falę uderzeniową, która podczas rozchodzenia się niszczy obiekty na swojej drodze. Przenoszone z wiatrem produkty rozszczepienia powodują skażenie promieniotwórcze dużych obszarów powierzchni Ziemi. W 1996 roku większość państw podpisała traktat o całkowitym zakazie prób z bronią jądrową.

## Materiały rozszczepialne

Uran występuje na naszej planecie w postaci dwóch izotopów: $^{235}U$ i $^{238}U$, z dużą przewagą tego drugiego. Jądra uranu $^{235}U$ rozszczepiają się po przyłączeniu neutronów o różnych prędkościach, dlatego ten izotop ma decydujące znaczenie w reakcji łańcuchowej. Natomiast w przypadku izotopu $^{238}U$ rozszczepienie mogą wywołać tylko neutrony o dużej energii, większej niż ta, którą mają neutrony powstające w tych reakcjach. Neutrony o zbyt małej energii są pochłaniane przez jądra $^{238}U$, ale nie wywołują reakcji rozszczepienia. Właśnie dlatego w naturalnych złożach uranu, a nawet w dużej próbce czystego uranu $^{238}U$ reakcja łańcuchowa nie zachodzi. Eksplozję jądrową może spowodować tylko ładunek zawierający głównie izotop $^{235}U$.

W rudzie uranowej samego uranu jest często mniej niż 1 %, a izotop $^{235}U$ stanowi tylko 0,7 % uranu. Łatwo oszacować, że z jednej tony rudy uranowej otrzymamy zaledwie kilkadziesiąt gramów uranu $^{235}U$. Najtrudniejszym i najbardziej kosztownym procesem jest wydzielenie atomów rozszczepialnego izotopu uranu z ich mieszaniny.

Innym materiałem rozszczepialnym jest pluton $^{239}Pu$, charakteryzujący się stosunkowo małą masą krytyczną (ok. 10 kg). Wytwarzany jest w specjalistycznych reaktorach jądrowych, a powstaje w wyniku bombardowania izotopu uranu $^{238}U$ neutronami.

### PODSUMOWANIE

- **Rozszczepienie** to rozpad jądra atomowego na dwa lub trzy mniejsze jądra o porównywalnej masie. Podczas reakcji wyzwalana jest energia.
- Wśród produktów rozszczepienia są neutrony, które mogą tę reakcję podtrzymywać.
- **Łańcuchowa reakcja rozszczepienia**, czyli powielanie aktów rozszczepienia, może zachodzić tylko w dostatecznie dużej próbce izotopu rozszczepialnego.

### PYTANIA I ZADANIA

1. Napisz reakcję rozszczepienia $^{239}_{94}Pu$ wywołaną wchłonięciem neutronu, w której powstają m.in. $^{143}_{56}Ba$ oraz trzy neutrony.
2. Oszacuj energię, jaka wyzwala się w wyniku reakcji rozszczepienia z zadania 1.
3. Czy suma mas produktów reakcji rozszczepienia uranu jest większa, mniejsza czy równa sumie mas jądra uranu i neutronu? Wskazówka: porównaj energię wiązania z deficytem masy.
4. Bomba atomowa zrzucona na Hiroszimę zawierała 68 kg uranu $^{235}U$, ale podczas eksplozji rozszczepieniu uległo tylko (a może na szczęście) 0,7 kg. Jak to wytłumaczyć?
5. Wyjaśnij, dlaczego nawet w dużej próbce uranu uzyskanego z rud uranowych występujących na Ziemi nie rozwinie się łańcuchowa reakcja rozszczepienia.

# 40. Reaktor jądrowy

- Kontrolowana reakcja rozszczepienia
- Paliwo do reaktorów jądrowych
- Działanie reaktora jądrowego
- Sterowanie reaktorem

➔ **Przypomnij sobie**, wiadomości o materiałach rozszczepialnych i reakcji rozszczepienia.

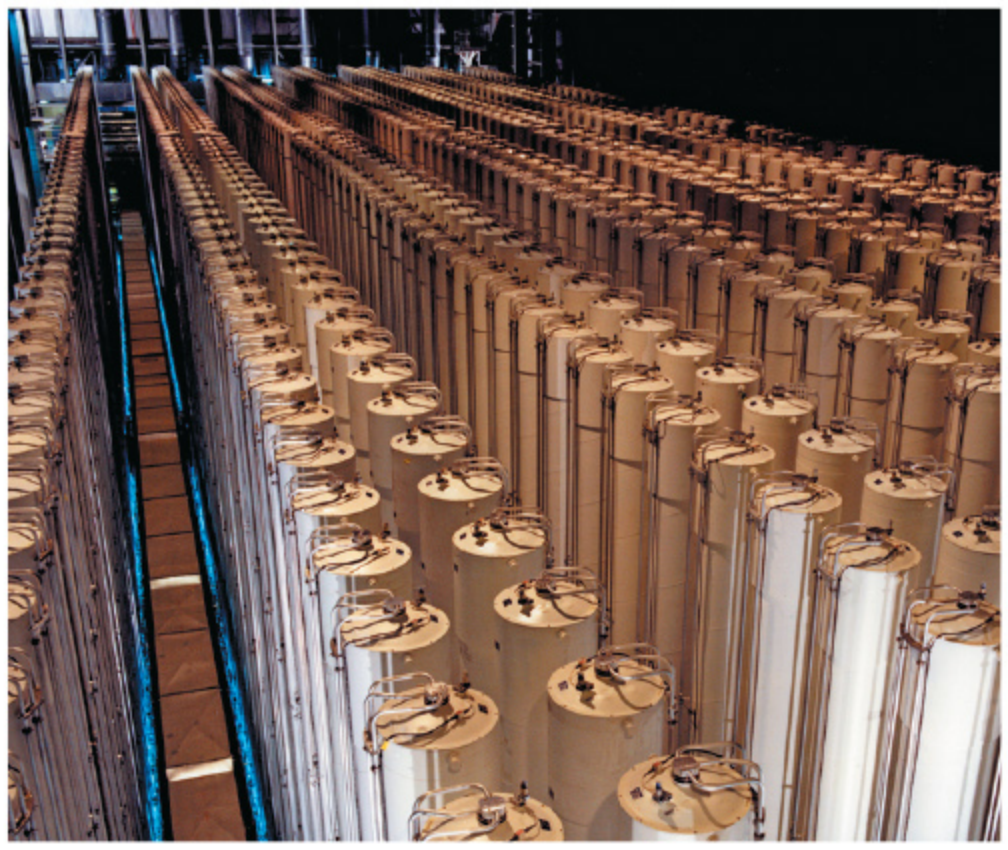
Do połowy XX wieku ludzkość wykorzystywała tylko energię pochodzącą ze Słońca. Paliwa kopalne, takie jak węgiel czy gaz, powstały przecież w wyniku fotosyntezy, a energia mechaniczna wody czy wiatru także powstaje dzięki promieniowaniu Słońca. W latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia powstały pierwsze elektrownie jądrowe, w których źródłem energii było rozszczepienie uranu. Energia jądrowa, czyli uzyskiwana z przemian jądrowych, to jedyny rodzaj energii wykorzystywanej przez ludzi, który nie pochodzi ze Słońca.

## Kontrolowana reakcja rozszczepienia

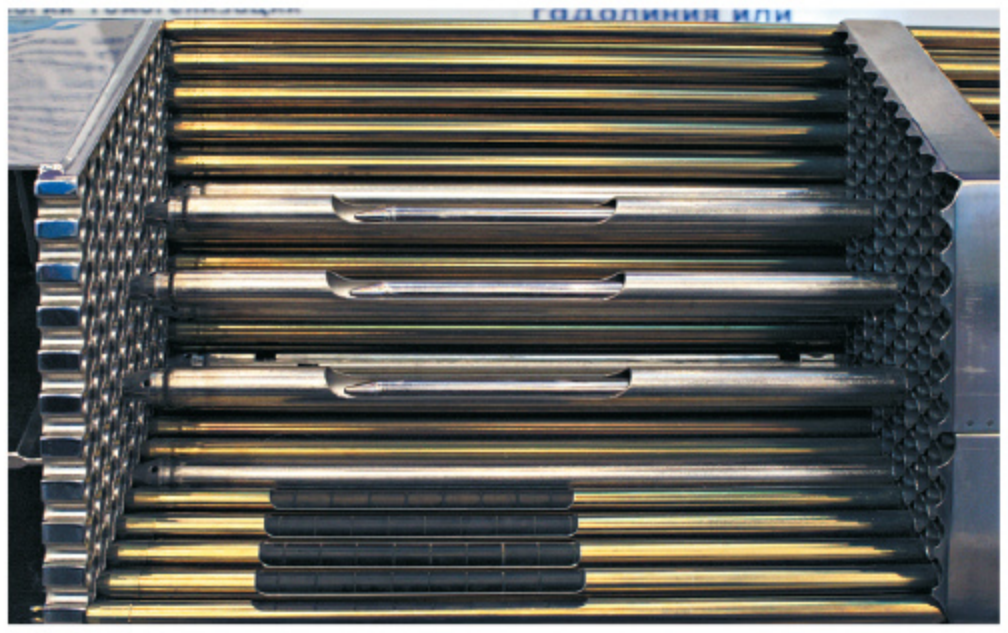
**Reaktor jądrowy** to urządzenie, w którym zachodzi **kontrolowana reakcja rozszczepienia.** Kontrolowana, czyli taka, po której zainicjowaniu ludzie obsługujący reaktor mają cały czas wpływ na szybkość przebiegu reakcji łańcuchowej i mogą doprowadzić do jej wygaszenia. Rozszczepienie uranu w reaktorze powoduje powstawanie wielu promieniotwórczych izotopów, a w tej mieszaninie zachodzi mnóstwo reakcji wzajemnie od siebie zależnych – wszystkie one mają wpływ na pracę reaktora. Do tej pory skonstruowano wiele rodzajów reaktorów jądrowych. Zasadę działania reaktora przedstawimy na najprostszym modelu.

Reakcja rozszczepienia zachodzi w **prętach paliwowych**. Wykonuje się je z tzw. wzbogaconego uranu – tak określa się uran, w którego składzie izotopowym udział rozszczepialnego izotopu $^{235}U$ jest większy niż w tzw. uranie naturalnym, otrzymywanym bezpośrednio z rudy uranowej (w którym jest 99,3 % izotopu $^{238}U$ i 0,7 % izotopu $^{235}U$). W paliwie do reaktorów zawartość izotopu $^{235}U$ jest zwykle zwiększona do kilku procent. Ten izotop uranu bezpośrednio podtrzymuje reakcję łańcuchową.

F



**Ryc. 40.1.** Hala fabryki wzbogacania uranu. Aby otrzymać odpowiednie stężenie uranu 235, proces wirowania należy powtarzać wiele razy



**Ryc. 40.2.** Zestaw prętów paliwowych gotowych do zainstalowania w reaktorze jądrowym

**Ryc. 40.3.** Reaktor wodny. Pręty paliwowe mocuje się w specjalnych stojakach, reaktor napełnia się wodą i szczelnie zamyka

Produkcją paliwa do reaktorów zajmują się fabryki wzbogacania uranu (ryc. 40.1). W takich zakładach wytwarza się sześciofluorek uranu, który w postaci gazowej odwirowuje się w specjalnych bębnach. Dzięki sile odśrodkowej cięższe cząsteczki gromadzą się przy powierzchniach bocznych bębnów, więc pośrodku jest większa koncentracja lżejszego izotopu uranu. Gaz ze środkowej części bębnów się odsysa, zamienia w dwutlenek uranu, który jest ciałem stałym, i formuje do postaci prętów paliwowych (ryc. 40.2).

## Działanie reaktora jądrowego

Jak to możliwe, że w reaktorze zachodzi reakcja rozszczepienia, a nie dochodzi do wybuchu? Otóż wybuch jądrowy wiąże się z uwolnieniem dużej energii w ułamku sekundy, natomiast w reaktorach energia jest uwalniana powoli. Neutrony, które powstają podczas rozszczepienia, mają dużą prędkość i prawdopodobieństwo pochłonięcia ich przez jądra atomowe uranu $^{235}U$ jest niewielkie. Pochłanianie jest znacznie wydajniejsze, gdy energie neutronów są małe, rzędu energii ruchu termicznego cząsteczek. Przy małym stężeniu (kilka procent) izotopu $^{235}U$ duże prawdopodobieństwo pochłonięcia neutronu, a zatem i reakcji rozszczepienia, jest warunkiem ciągłej i stabilnej pracy reaktora. Dlatego aby zainicjować i podtrzymać reakcję łańcuchową w reaktorze, należy neutrony spowolnić. Do tego służą substancje zwane **moderatorami**. Jednym z najczęściej stosowanych moderatorów jest woda i dlatego w niej właśnie są zanurzone pręty paliwowe (ryc. 40.3).

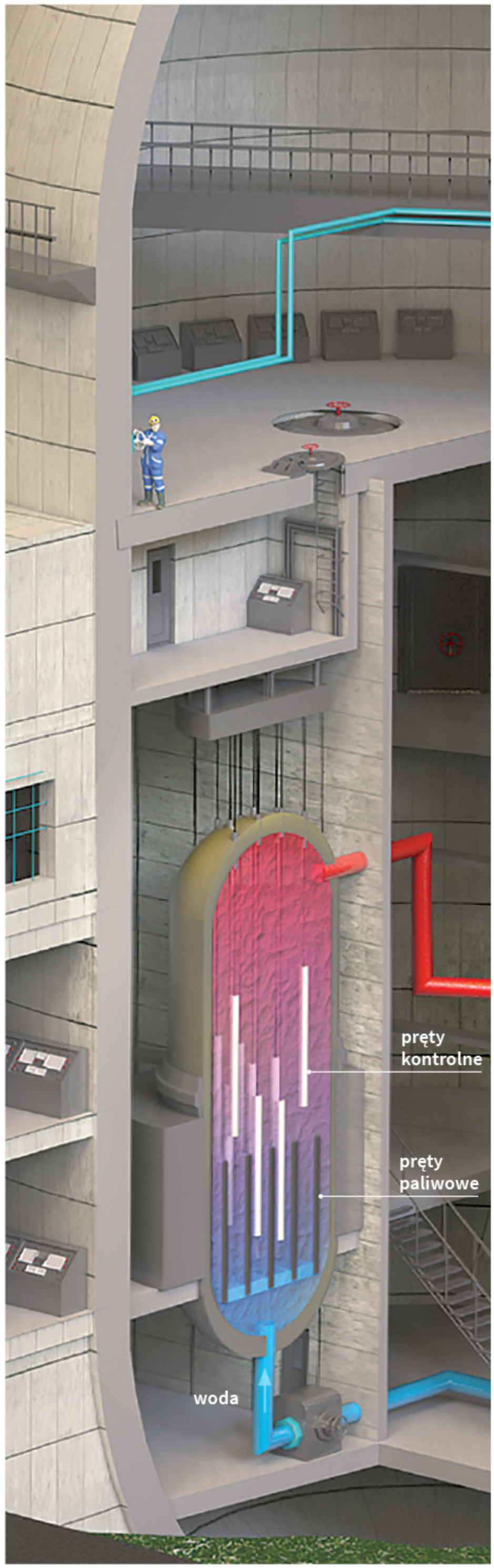
Pręty paliwowe są zazwyczaj wąskie (ok. 2 cm), dlatego neutrony wylatują z nich

i wpadają do wody. Neutrony tysiące razy zderzają się z cząsteczkami moderatora i prętów paliwowych. Dopiero wtedy, gdy dostatecznie wytracą energię, są pochłaniane przez jądra uranu i powodują ich rozszczepienie. Proces spowalniania neutronów jest rozciągnięty w czasie, a więc i energia uwalniana jest stopniowo. Woda, w której zanurzone są pręty paliwowe, odprowadza ciepło powstające w wyniku rozszczepienia.

## Sterowanie reaktorem

Oprócz prętów paliwowych i moderatora ważnym elementem rdzenia reaktora są tzw. **pręty kontrolne**, rozmieszczone pomiędzy prętami paliwowymi (ryc. 40.4). Wykonuje się je z substancji silnie pochłaniających neutrony, np. związków kadmu lub boru. Reaktor uruchamia się dopiero wtedy, gdy pręty kontrolne zostaną częściowo wyjęte spomiędzy prętów paliwowych. Wtedy neutrony mogą swobodnie krążyć po wnętrzu reaktora, są spowalniane i ponownie wnikają do prętów paliwowych, w których wywołują rozszczepienie. W zależności od zapotrzebowania energetycznego pręty kontrolne są mniej lub bardziej wysunięte – w ten sposób zmienia się moc reaktora.

Reaktor zostaje wyłączony po całkowitym wsunięciu prętów kontrolnych między pręty paliwowe – wówczas neutrony są wychwytywane i reakcje rozszczepienia wygasają. Dodatkowo, w celu zapewnienia bezpieczeństwa, stosuje się mechanizmy awaryjnego wyłączenia reaktora bez udziału obsługi. Gdy temperatura w reaktorze wzrośnie powyżej ustalonej wartości, do jego wnętrza wpadają automatycznie (zwykle pod własnym ciężarem) **pręty awaryjne**, czyli dodatkowe pręty pochłaniające neutrony, lub wprowadzana jest do obiegu ciecz o podobnych właściwościach.




**Ryc. 40.4.** Schemat budowy reaktora wodnego

W Polsce jedynym pracującym reaktorem jądrowym jest reaktor badawczy Maria (ryc. 40.5), znajdujący się w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku pod Warszawą. Głównym zadaniem tego reaktora jest wytwarzanie neutronów, którymi bombarduje się różne substancje włożone do jego wnętrza w celu otrzymania izotopów stosowanych w medycynie i przemyśle.

**Ryc. 40.5.** Reaktor Maria

## WARTO WIEDZIEĆ

**Katastrofa reaktora w Czarnobylu**

W nocy z 25 na 26 kwietnia 1986 roku nastąpił silny wybuch jednego z czterech reaktorów Czarnobylskiej Elektrowni Jądrowej. Eksplozja rozerwała ważącą ponad 1000 ton pokrywę ochronną. Reaktor płonął przez dziewięć dni i do atmosfery dostało się kilka ton silnie promieniotwórczego pyłu. Jak mogło dojść do takiej katastrofy?

Tej nocy pracownicy planowali przeprowadzić test bezpieczeństwa, tzn. sprawdzić, jak zachowa się reaktor w niecodziennej sytuacji. Przed testem wyłączono automatyczny system awaryjnego wygaszania reaktora. Nieco później obsługa nieświadomie doprowadziła do jego przegrzania. Gdy próbowano wygasić reaktor, okazało się, że wskutek jego wad konstrukcyjnych nie udało się wprowadzić do środka prętów awaryjnych. Z powodu zbyt wysokiego ciśnienia pary wodnej, jakie powstało w reaktorze, oraz wybuchowego połączenia się wodoru z tlenem nastąpiła silna eksplozja, która zniszczyła obudowę reaktora i spowodowała gwałtowne zapalenie się grafitu znajdującego się w jego wnętrzu. Katastrofa w Czarnobylu wzbudziła na całym świecie falę niechęci wobec energetyki jądrowej, choć liczba ofiar tej katastrofy jest nieporównanie mniejsza od liczby ofiar energetyki opartej na węglu.

## PODSUMOWANIE

- W **reaktorach jądrowych** zachodzi kontrolowana reakcja rozszczepienia. Energia z rozszczepienia jąder atomowych przekształca się w ciepło.
- Paliwem do reaktorów jest **uran wzbogacony w izotop 235**.
- Do spowalniania neutronów w reaktorze stosuje się **moderatory**, np. wodę.
- **Pręty kontrolne** służą do sterowania mocą reaktora podczas jego pracy.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Którego izotopu uranu jest najwięcej w prętach paliwowych?
2. W jakim celu w reaktorach jądrowych stosuje się moderatory?
3. Uran $^{238}U$ zawarty w prętach paliwowych może pochłaniać neutrony, ale się nie rozszczepia. W wyniku rozpadów $\beta$ powstaje z niego natomiast izotop plutonu, który jest rozszczepialny. Napisz reakcje jądrowe, które prowadzą do powstania plutonu z izotopu uranu $^{238}U$.
4. Dlaczego reaktor nie może wybuchnąć tak jak bomba atomowa? Uzasadnij odpowiedź na podstawie wiadomości zawartych w tekście rozdziału.
5. Oszacuj, ile naturalnego uranu potrzeba do wytworzenia 50 ton paliwa do reaktora jądrowego. Przyjmij, że stężenie lżejszego izotopu w paliwie wynosi 5 %.

# 41. Energetyka jądrowa

- Elektrownie jądrowe
- Paliwo jądrowe

F

F → **Przypomnij sobie** budowę reaktora oraz zasadę jego działania.

Reaktory jądrowe znajdują zastosowanie głównie w sektorze energetycznym. Okazuje się, że elektrownie jądrowe w porównaniu z innymi elektrowniami dużej mocy mają najmniej szkodliwy wpływ na środowisko.

## Elektrownia jądrowa

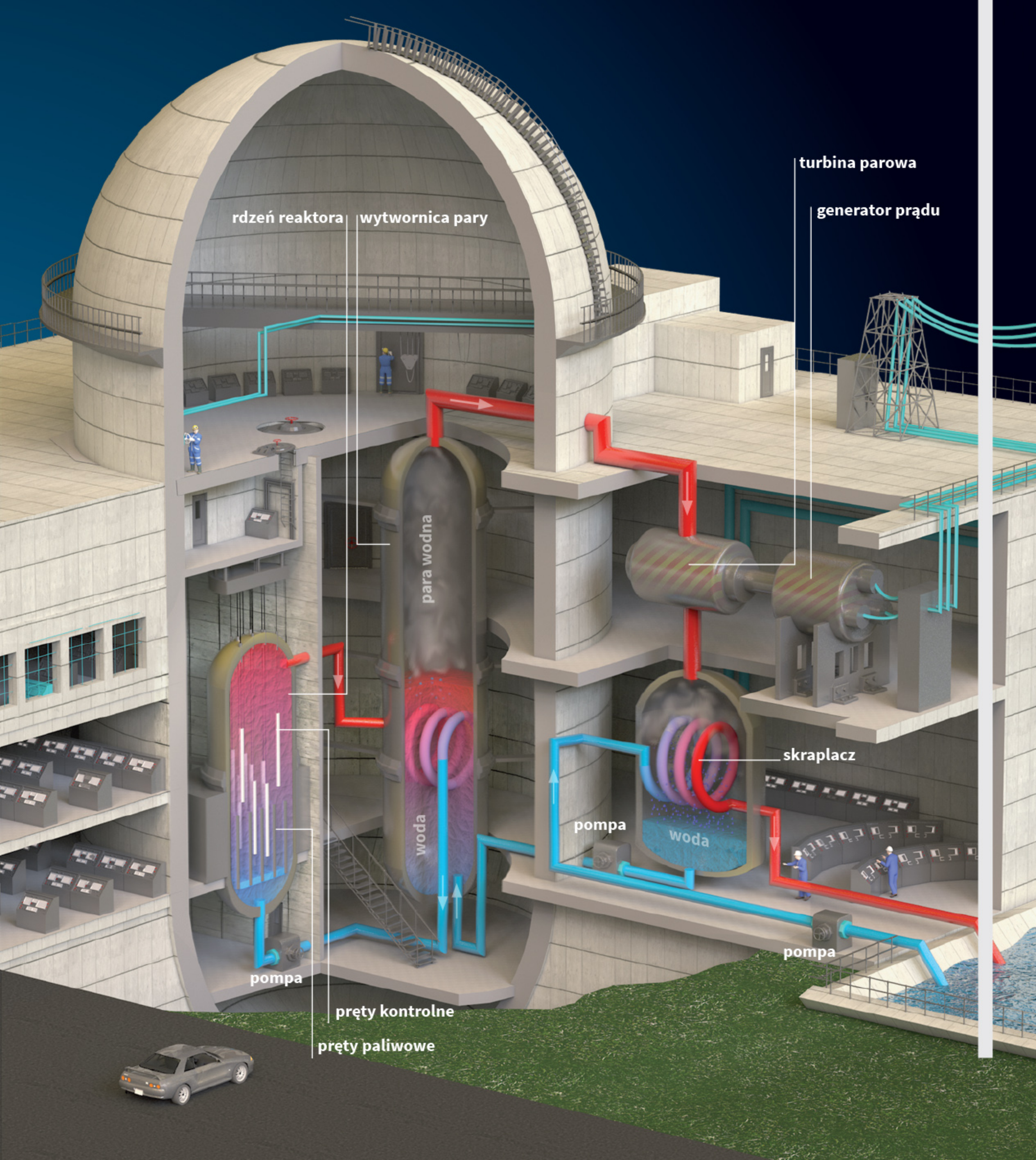
Tym, co odróżnia elektrownię jądrową od innych elektrowni konwencjonalnych, jest źródło ciepła – jest nim gorący rdzeń reaktora, w którym zachodzą reakcje rozszczepienia. Dzięki ciepłu uzyskuje się parę wodną o wysokim ciśnieniu, która napędza turbiny połączone z generatorami prądotwórczymi.

Konstrukcja reaktora zapewnia jego bezpieczną eksploatację (ryc. 41.2). Zbiornik reaktora osłaniają grube, podwójne betonowe ściany, a na wypadek ewentualnej awarii przygotowany jest automatyczny system prętów awaryjnych. Woda, która służy do odbioru ciepła wytworzonego w rdzeniu reaktora, zawiera izotopy promieniotwórcze, dlatego krąży w obiegu zamkniętym. Gorąca woda z rdzenia ogrzewa poprzez ścianki tzw. wymiennika ciepła „czystą" wodę, która po odparowaniu kierowana jest na turbiny napędzające prądnice i po schłodzeniu wraca do wymiennika ciepła.

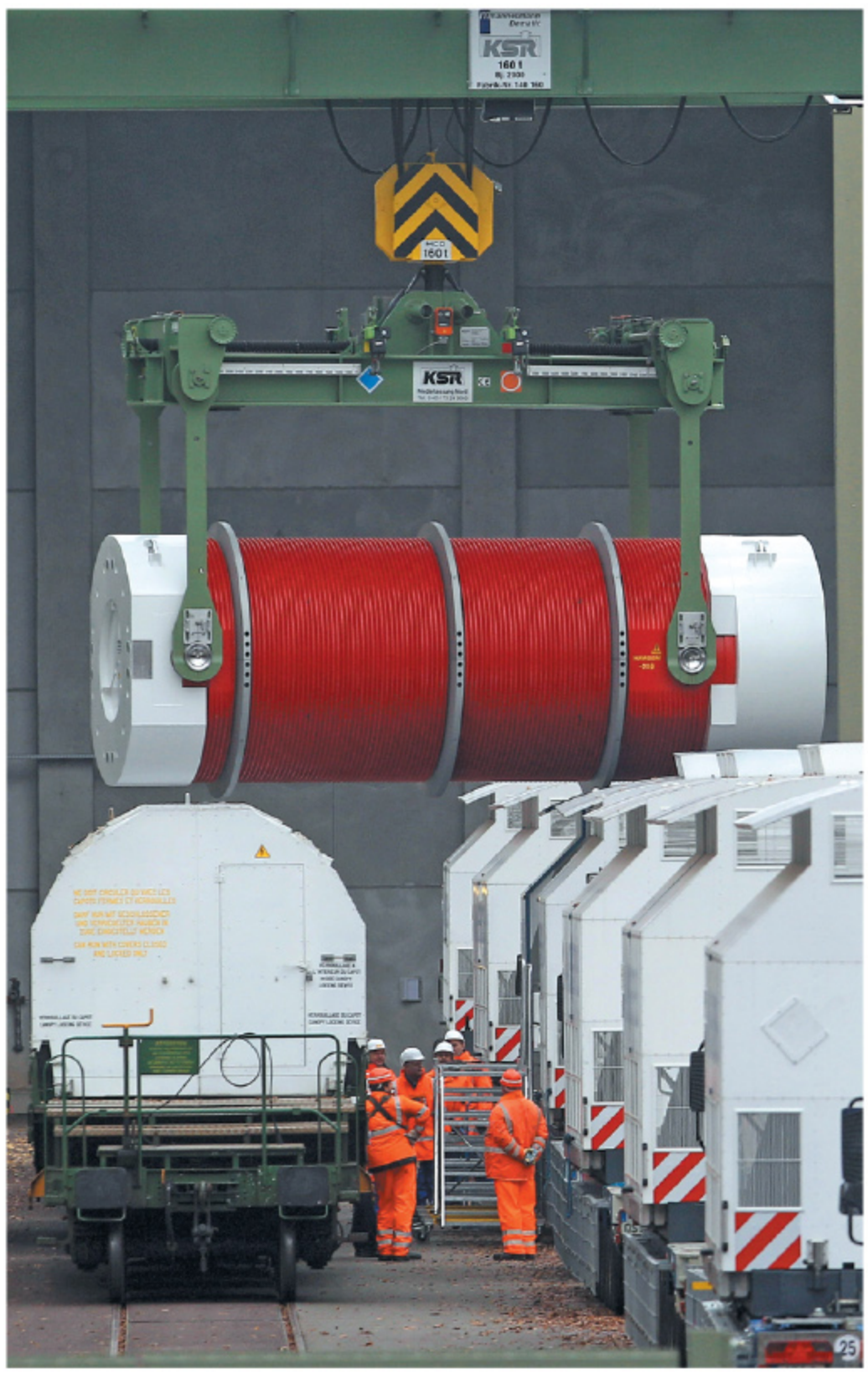
Elektrownie jądrowe charakteryzują się stabilną pracą niezależnie od warunków pogodowych. Ograniczeniami w upowszechnieniu energetyki jądrowej są wysoki koszt budowy takiej elektrowni i niechęć społeczeństwa.

**Ryc. 41.1.** Elektrownie jądrowe, podobnie jak duże elektrownie opalane gazem lub węglem, budowane są w sąsiedztwie zbiorników wodnych. Woda niezbędna jest do chłodzenia pary wodnej napędzającej generatory

**Ryc. 41.2.** Schemat budowy elektrowni jądrowej



**Ryc. 41.3.** Wymiana prętów paliwowych wewnątrz wygaszonego reaktora



**Ryc. 41.4.** Pojemnik z odpadami promieniotwórczymi, gotowy do długotrwałego składowania

## Paliwo jądrowe

Surowcem do produkcji prętów paliwowych jest uran. Jego zawartość w rudzie uranowej wynosi zazwyczaj niewiele ponad 1%. Po otrzymaniu z rudy czystego uranu przewozi się go do fabryki wzbogacania, gdzie powstają gotowe pręty paliwowe. Elektrownia jądrowa o mocy rzędu kilku tysięcy MW wymaga niewiele paliwa – rocznie jest to kilkadziesiąt ton. Mniej więcej po roku pracy reaktora w prętach paliwowych pozostaje jeszcze około 90 % uranu, ale ze względu na to, że produkty rozszczepienia silnie pochłaniają neutrony, takie pręty nie pracują już wystarczająco wydajnie. Wygasza się wówczas reaktor i wymienia pręty paliwowe na nowe (ryc. 41.3).

Coraz częściej zużyte pręty paliwowe ponownie przesyła się do fabryki produkującej paliwo jądrowe, gdzie zostają oczyszczone z produktów rozszczepienia. Następnie formuje się z nich nowe pręty. Produkty rozszczepienia, których po roku pracy elektrowni jest zaledwie kilka ton, są odpadami radioaktywnymi. Są one bardzo niebezpieczne ze względu na silne promieniowanie, dlatego pakuje się je w wielowarstwowe pojemniki (ryc. 41.4) i składuje w specjalistycznych składowiskach głęboko pod ziemią, w obszarach stabilnych geologicznie i bez dostępu do wód podziemnych. Najczęściej są to podziemne wyrobiska nieczynnych kopalni soli. Umieszczenie odpadów w takim miejscu zapewnia wystarczającą osłonę przed ich promieniowaniem, uniemożliwia też dostęp osób niepowołanych.

**W czasie pracy elektrowni jądrowej do otoczenia nie są emitowane żadne substancje** – wszystkie procesy zachodzą

w obiegu zamkniętym. Szerokie kominy widoczne na rycinie 41.1 to chłodnie kominowe służące do chłodzenia wody napędzającej turbiny, a obłoki z nich uchodzące to skroplona para wodna.

**PRZYKŁAD 1.**

Oszacujmy ilość paliwa potrzebnego do pracy dużej elektrowni o mocy 5000 MW, opalanej węglem kamiennym. Przyjmijmy, że z jednego kilograma węgla uzyskuje się ok. $2{,}5 \cdot 10^7$ J energii.

Energia elektryczna wytwarzana w ciągu roku (rok to ok. $3{,}2 \cdot 10^7$ s) przez elektrownię o podanej mocy to:

$$E = Pt = 5 \cdot 10^9 \text{ W} \cdot 3{,}2 \cdot 10^7 \text{ s} = 1{,}6 \cdot 10^{17} \text{ J}$$

Obliczmy teraz ilość węgla, jaką w ciągu roku zużywałaby taka elektrownia:

$$m = \frac{1{,}6 \cdot 10^{17} \text{ J}}{2{,}5 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = 6{,}4 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

Otrzymany wynik to 6,4 mln ton węgla. W rzeczywistości ta ilość byłaby znacznie większa, ponieważ elektrownia cieplna ma sprawność ok. 40 %. To znaczy, że tylko 40 % wytworzonego ciepła jest zamieniane na energię elektryczną. Wobec tego do wyprodukowania obliczonej energii elektrycznej potrzeba:

$$\frac{100\ \%}{40\ \%} \cdot 6{,}4 \cdot 10^6 \text{ ton} = 1{,}6 \cdot 10^7 \text{ ton}$$

Aby przewieźć taką ilość węgla, potrzeba ponad 6500 pociągów złożonych z 40 wagonów, czyli ok. 20 pociągów dziennie! Kilkadziesiąt ton uranu jako paliwa jądrowego potrzebnego na rok pracy elektrowni jądrowej w zestawieniu z powyższymi szacunkami to naprawdę mało.

## Bezpieczeństwo w energetyce jądrowej

Reaktor jądrowy zawiera wiele ton silnie promieniotwórczych substancji, dlatego w energetyce jądrowej obowiązują szczególnie surowe zasady bezpieczeństwa. Oczywiście zawsze istnieje ryzyko awarii, ale reaktory buduje się tak, by to ryzyko zminimalizować. W ciągu kilkudziesięcioletniej historii energetyki jądrowej zdarzyła się tylko jedna katastrofa, która pociągnęła za sobą ofiary śmiertelne – w Czarnobylu w 1986 roku. Według danych Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) i Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) bezpośrednich ofiar było kilkadziesiąt – byli to głównie strażacy gaszący pożar reaktora bez żadnej odzieży ochronnej, którzy otrzymali śmiertelne dawki promieniowania. Nie stwierdzono wzrostu nieprawidłowych urodzeń ani efektów dziedzicznych u osób z terenów napromieniowanych, a mieszkańcy Polski nie odczuli negatywnych konsekwencji zdrowotnych tej awarii. Liczba ofiar związanych z działalnością innych segmentów energetyki jest w skali światowej nieporównywalnie większa.

F Katastrofa w Czarnobylu spowodowała wstrzymanie rozwoju energetyki jądrowej na świecie, jednak od kilku lat notuje się coraz większe zainteresowanie tym sposobem pozyskiwania energii. O ewentualnym rozwoju energetyki jądrowej, również w Polsce, powinny decydować naukowe argumenty, a nie emocje.

## Reaktory jądrowe jako źródła napędu

Po oceanach pływają lodołamacze, lotniskowce czy okręty podwodne z tzw. napędem atomowym. Reaktory jądrowe są źródłem energii do napędu tych jednostek, zasilają również pokładowe elektrownie. W przypadku okrętów podwodnych energia z reaktorów zapewnia utrzymanie warunków odpowiednich do życia załogi poprzez uzdatnianie wody czy utrzymywanie właściwego składu powietrza wewnątrz okrętu. Współczesne okręty podwodne o napędzie atomowym mogą przebywać pod wodą bez przerwy wiele miesięcy i tylko wytrzymałość psychiczna załogi ogranicza czas trwania misji (ryc. 41.5).

**Ryc. 41.5.** Okręt podwodny o napędzie atomowym

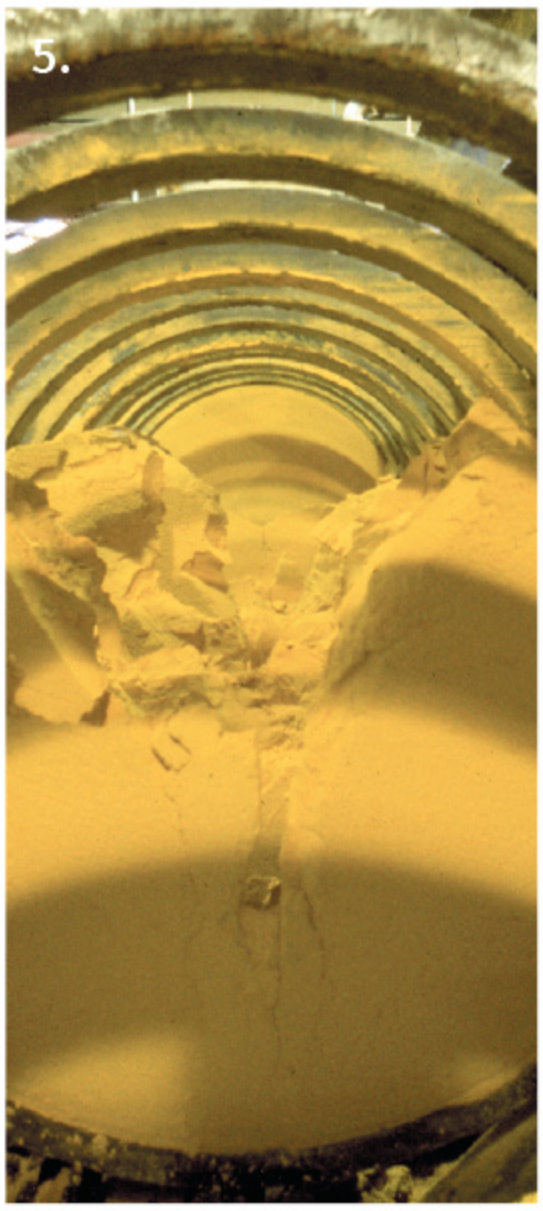
### PODSUMOWANIE

- **Reaktory jądrowe** są źródłem energii w elektrowniach jądrowych.
- Prawidłowa praca reaktora jądrowego **nie wpływa negatywnie** na środowisko.
- Pręty paliwowe podlegają **recyklingowi**.

## PYTANIA I ZADANIA

F

**1.** Fotografie przedstawiają przedsiębiorstwa związane z energetyką jądrową: kopalnię uranu, zakłady przetwarzania rudy uranowej, fabrykę wzbogacania uranu, elektrownię jądrową, składowisko odpadów promieniotwórczych. Przyporządkuj zdjęcia do wymienionych przedsiębiorstw.

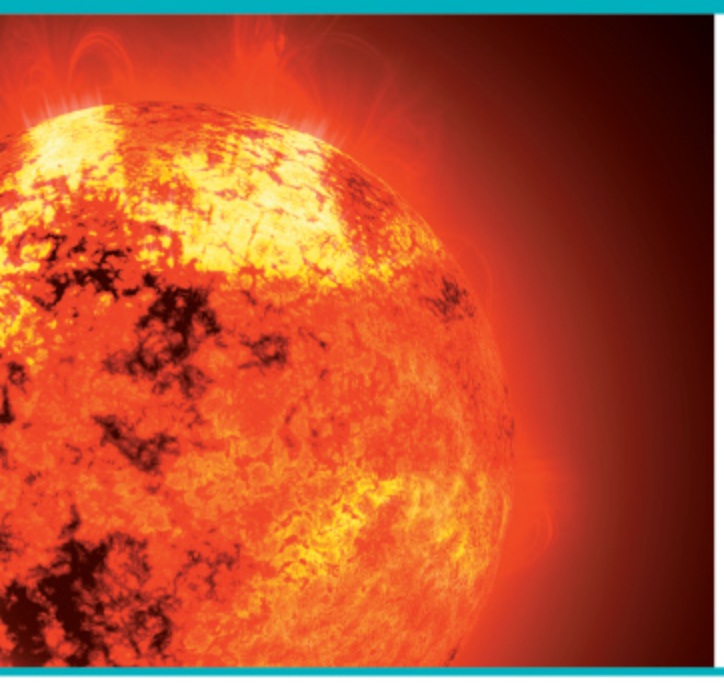



**2.** Pręty paliwowe w reaktorze wymienia się na nowe, gdy pozostaje w nich jeszcze blisko 90 % paliwa uranowego. Napisz na podstawie tekstu rozdziału, co jest tego przyczyną.

**3.** Masa prętów paliwowych w elektrowni jądrowej wynosi 30 ton. Czy zawsze po zużyciu pręty są w całości przekazywane na składowisko odpadów radioaktywnych? Uzasadnij odpowiedź.

**4.** Na świecie jest wiele statków z napędem atomowym. Czy realne jest zbudowanie samochodu osobowego z takim napędem? Uzasadnij odpowiedź.

**5.** Z rozszczepienia jednego jądra uranu $^{235}U$ uzyskuje się energię ok. 200 MeV. Jaka (w przybliżeniu) masa paliwa jądrowego ulega rozszczepieniu w ciągu roku pracy reaktora o mocy 5000 MW?



# 42. Synteza jądrowa

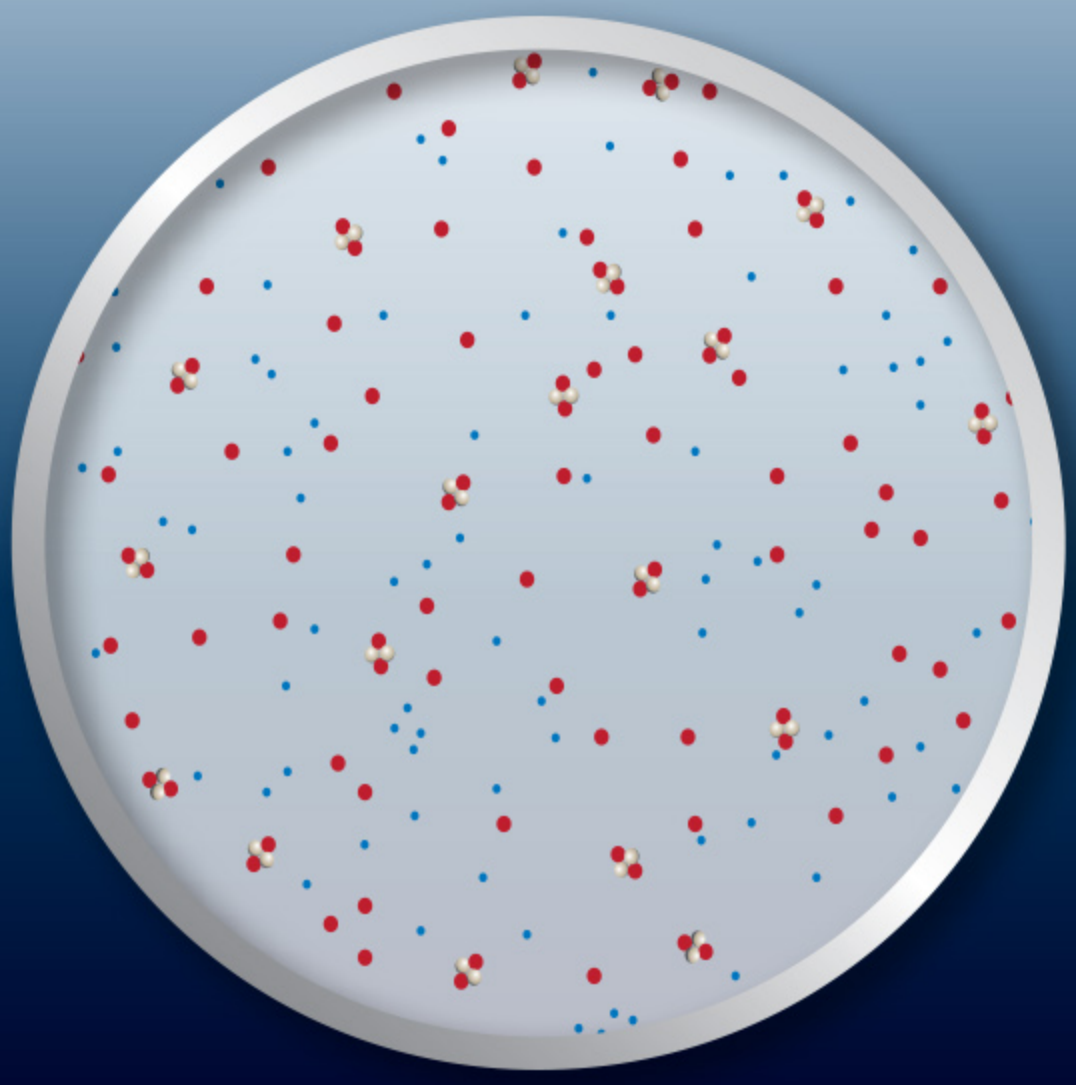
- Reakcja syntezy jądrowej
- Reaktory termojądrowe

➔ **Przypomnij sobie** wiadomości o energii wiązania nukleonu w jądrze oraz o tym, jak zapisuje się reakcje jądrowe.

Dlaczego Słońce świeci? A dlaczego świecą gwiazdy? Te pytania ludzie stawiali sobie już od dawna, ale dopiero fizyka współczesna przyniosła na nie odpowiedzi. Od XIX wieku wiadomo, że gwiazdy są podobne do Słońca, tylko położone bardzo daleko od Ziemi. Przyczyn świecenia tych obiektów szukano w reakcjach spalania węgla lub wodoru, jednak szybko zrozumiano, że gwiazdy muszą mieć znacznie wydajniejsze źródło energii. Dzisiaj wiemy, że są nim procesy jądrowe, w których ze stosunkowo niewielkiej masy substancji można uzyskać bardzo duże ilości energii.

## Synteza jądrowa wodoru w hel

Gwiazdy są zbudowane głównie z wodoru i helu. Ich temperatura jest na tyle wysoka, że w wyniku zderzeń atomy tracą powłoki elektronowe. Wobec tego materia gwiazdowa to jądra wodoru i helu wymieszane z elektronami (ryc. 42.1). Taką zjonizowaną materię nazywamy **plazmą**. W warunkach, jakie panują wewnątrz gwiazd, mogą zachodzić reakcje syntezy jądrowej.



**Ryc. 42.1.** Tak można wyobrazić sobie materię tworzącą gwiazdy: wymieszane ze sobą protony, jądra helu i elektrony. Wszystko w chaotycznym ruchu

**Synteza jądrowa** (nukleosynteza, fuzja jądrowa) to reakcje, w wyniku których z jąder lżejszych powstają jądra cięższe.

W najprostszej reakcji syntezy dwa jądra wodoru tworzą jedno cięższe jądro deuteru:

$$^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{0}_{1}\mathrm{e}^{+} + {}^{0}_{0}\nu$$

Deuter składa się z dwóch nukleonów związanych ze sobą siłami jądrowymi. Podczas jego powstawania wydziela się energia równa 1,44 MeV. Oprócz deuteru w reakcji powstają również pozyton (antyelektron) i neutrino.

Deuter może połączyć się z protonem i utworzyć kolejne cięższe jądro:

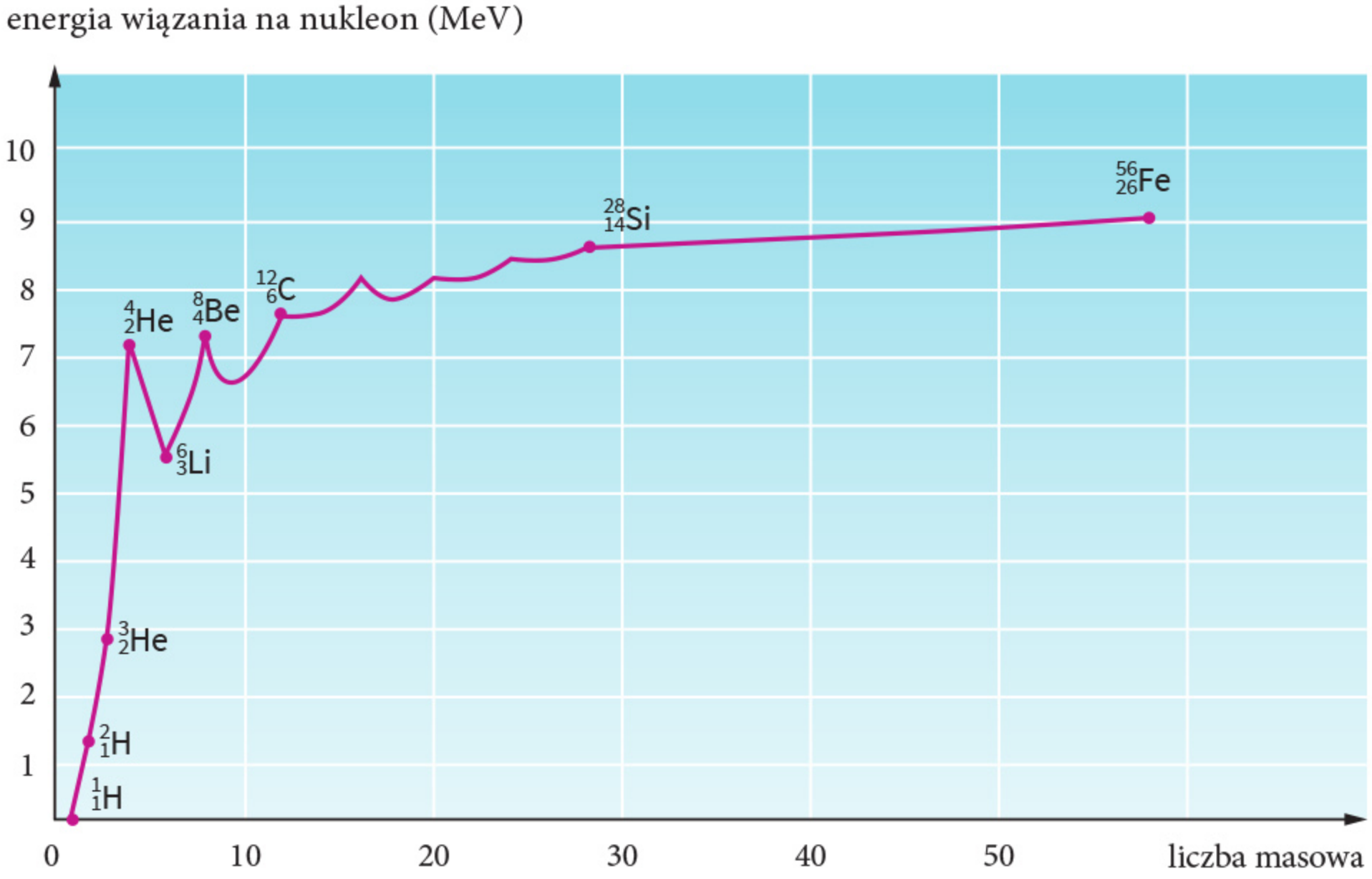
$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He}$$

W wyniku tej reakcji również wyzwala się energia (energia wiązania dla helu jest większa niż dla deuteru – ryc. 42.2).

Z kolei jądra helu $^{3}\mathrm{He}$ mogą utworzyć cięższe jądro $^{4}\mathrm{He}$:

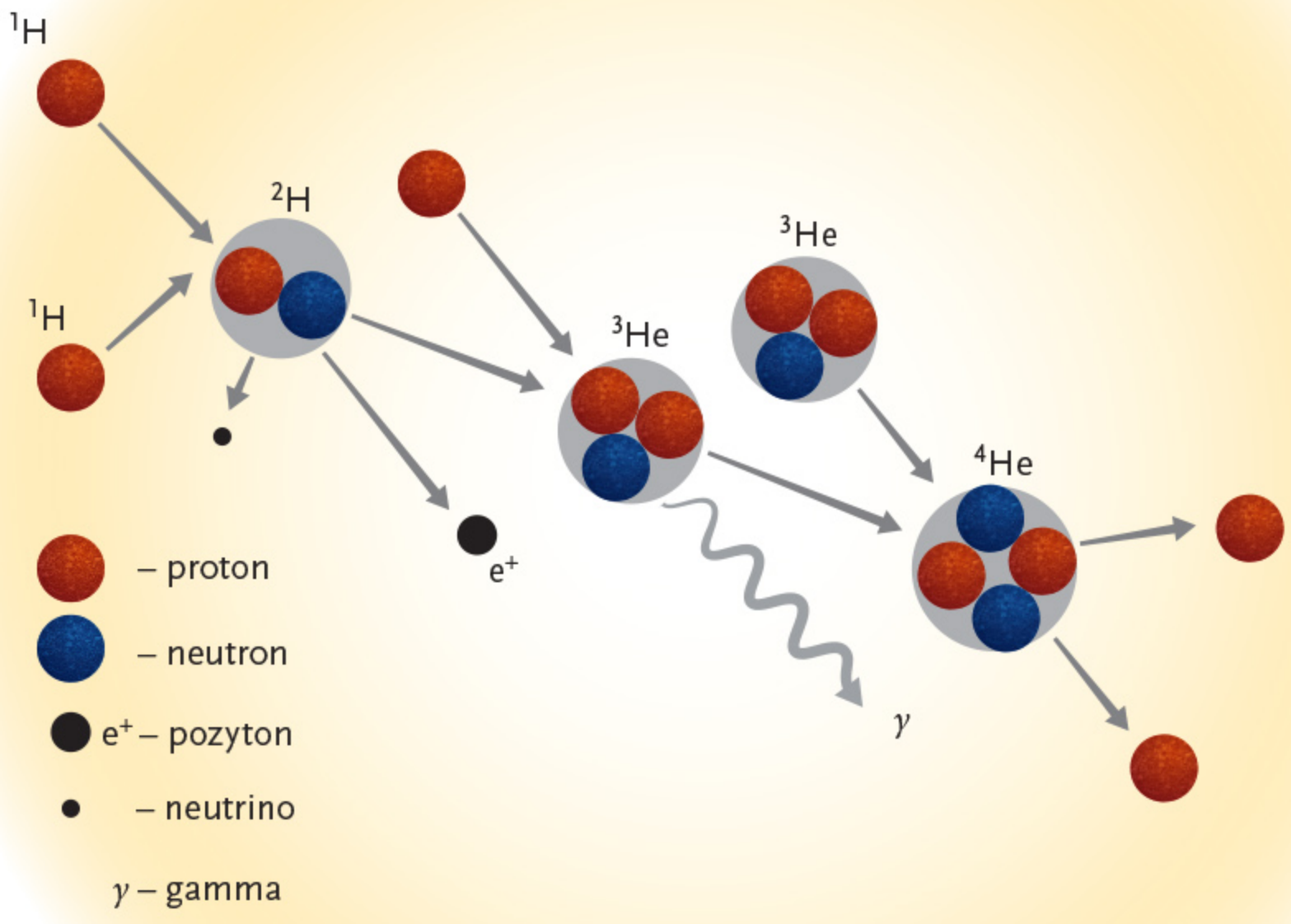
$$^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

W tej reakcji także wydziela się energia.




**Ryc. 42.2.** Zależność energii wiązania na nukleon od liczby masowej dla lekkich jąder

Te trzy reakcje, w wyniku których wodór $^{1}H$ zamienia się w hel $^{4}He$, nazywamy **cyklem protonowym** (ryc. 42.3). Zachodzą one we wnętrzach większości gwiazd. Powstałe w ostatniej reakcji protony również mogą połączyć się w jądro deuteru, gdy wejdą w kolejny cykl przemian.




**Ryc. 42.3.**
Jądrowa synteza wodoru w hel, zachodząca we wnętrzu Słońca

W wyniku reakcji syntezy cztery jądra wodoru tworzą jedno jądro helu. Energia wydzielona w trakcie tej syntezy jest równa energii wiązania jądra $^{4}_{2}He$. Na podstawie wykresu na rycinie 42.2 można obliczyć, że jest ona równa ok. 28 MeV. To wydaje się niewiele w porównaniu z energią rozszczepienia uranu, gdzie w jednej reakcji wydziela się około 200 MeV, jednak należy wziąć pod uwagę, że cztery jądra wodoru mają masę zdecydowanie mniejszą od masy jądra uranu. Okazuje się, że energia wydzielona przy syntezie kilograma wodoru jest dużo większa od tej wydzielonej przy rozszczepieniu kilograma uranu.

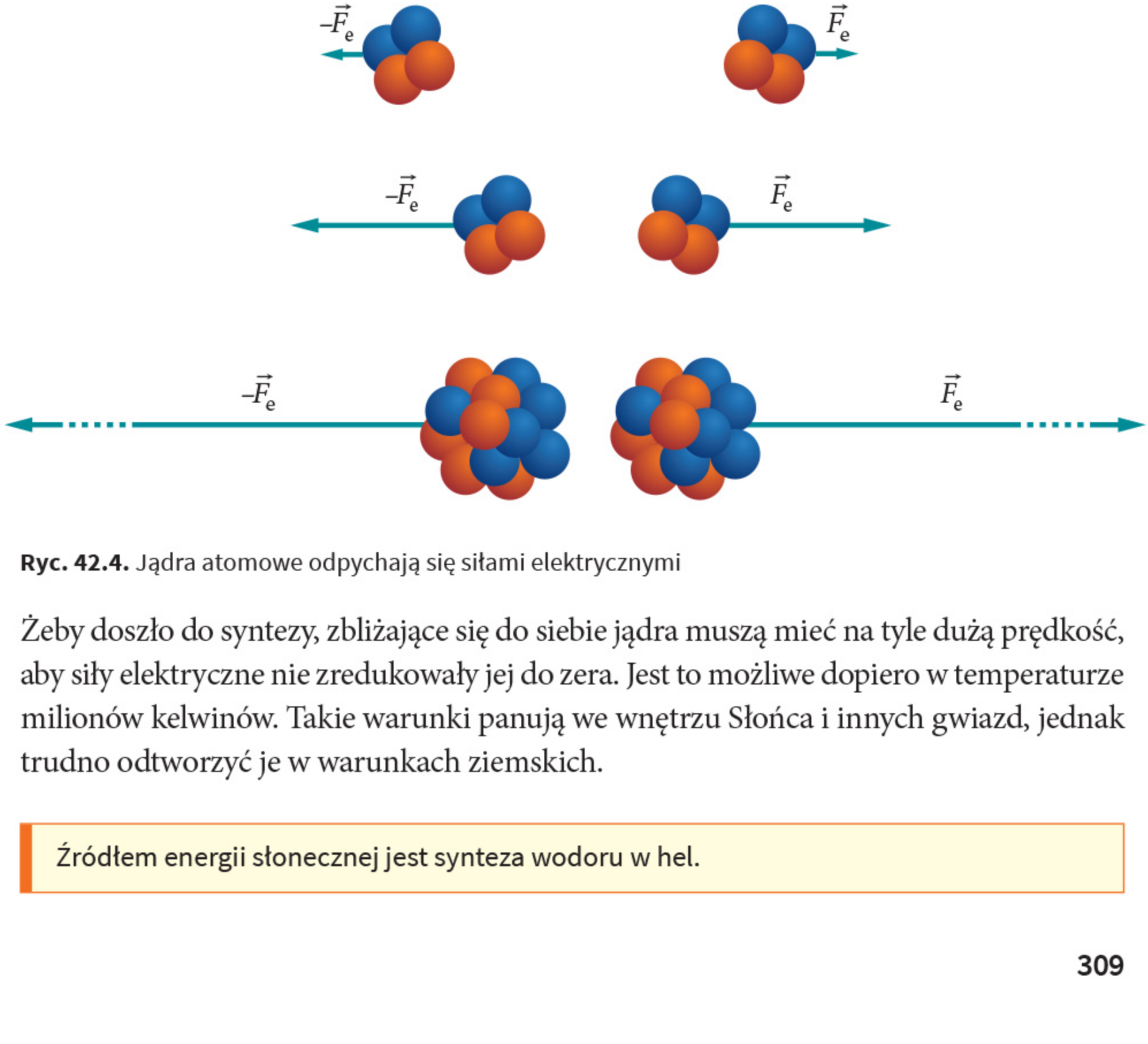
**PRZYKŁAD 1.**

Porównajmy energię wydzieloną podczas syntezy kilograma wodoru w hel z energią wydzieloną podczas rozszczepienia kilograma uranu.

Podczas syntezy wodoru w hel wydziela się ok. 28 MeV energii, zatem na jeden nukleon przypada ok. 7 MeV. Podczas rozszczepienia jądra $^{235}$U wydziela się ok. 200 MeV energii, więc na jeden nukleon przypada mniej niż 1 MeV. W kilogramie wodoru i uranu jest w przybliżeniu jednakowa liczba nukleonów (pomijamy masę elektronów). Wobec tego podczas syntezy wodoru w hel wydziela się mniej więcej siedem razy więcej energii niż przy rozszczepieniu tej samej masy uranu.

Synteza wodoru w hel jest najbardziej efektywnym źródłem energii: paliwem jest wodór powszechnie występujący w wodzie, a produktem gaz szlachetny. Ponadto reaktor, w którym mogłaby następować taka synteza jądrowa, nie byłby źródłem niebezpiecznych izotopów promieniotwórczych. Dlaczego więc nie wykorzystujemy syntezy jądrowej jako źródła energii na dużą skalę?

Aby dwa jądra atomowe złączyły się w jedno większe, muszą zbliżyć się do siebie tak bardzo, żeby się zetknąć. Jest to związane z małym zasięgiem sił jądrowych. Jądra mają ładunek dodatni, zatem odpychają się od siebie. Przy małych odległościach siły odpychania elektrycznego są bardzo duże (ryc. 42.4).




**Ryc. 42.4.** Jądra atomowe odpychają się siłami elektrycznymi

Żeby doszło do syntezy, zbliżające się do siebie jądra muszą mieć na tyle dużą prędkość, aby siły elektryczne nie zredukowały jej do zera. Jest to możliwe dopiero w temperaturze milionów kelwinów. Takie warunki panują we wnętrzu Słońca i innych gwiazd, jednak trudno odtworzyć je w warunkach ziemskich.

Źródłem energii słonecznej jest synteza wodoru w hel.

## Synteza pierwiastków cięższych

Nie tylko jądra wodoru ulegają syntezie. W odpowiednich warunkach mogą się łączyć również jądra cięższych pierwiastków. Z wykresu na rycinie 42.2 można odczytać, że energia wiązania na nukleon w ogólności rośnie wraz ze wzrostem liczby masowej aż do jądra żelaza $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$. Wobec tego synteza jądrowa aż do żelaza jest źródłem energii. Jednak synteza coraz cięższych jąder wymaga coraz wyższej temperatury. Im większy ładunek jąder, tym większe siły odpychania między nimi (ryc. 42.4). We wnętrzu Słońca synteza kończy się w zasadzie na helu, ale istnieją gwiazdy, których wnętrza mają temperaturę kilkudziesięciu milionów kelwinów, czyli znacznie wyższą niż Słońce – i w nich zachodzi synteza pierwiastków aż do powstania żelaza.

**PRZYKŁAD 2.**

Na późnym etapie ewolucji gwiazd podobnych do Słońca w ich wnętrzu zaczyna zachodzić reakcja syntezy helu w węgiel.

Oszacujmy, ile energii wyzwala się przy powstawaniu jednego jądra węgla.

Zapiszmy schematycznie opisaną reakcję:

$$3\ {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C}$$

Z wykresu na rycinie 42.2 odczytujemy, że energia wiązania na nukleon wynosi dla węgla 7,7 MeV, zaś dla helu – ok. 7,1 MeV. Wobec tego różnica energii wiązania produktów reakcji i jąder wchodzących w reakcję wynosi:

$$12 \cdot 7{,}7\ \mathrm{MeV} - 3 \cdot 4 \cdot 7{,}1\ \mathrm{MeV} = 7{,}2\ \mathrm{MeV}$$

W wyniku jednej reakcji syntezy helu w węgiel wyzwala się ok. 7,2 MeV energii.

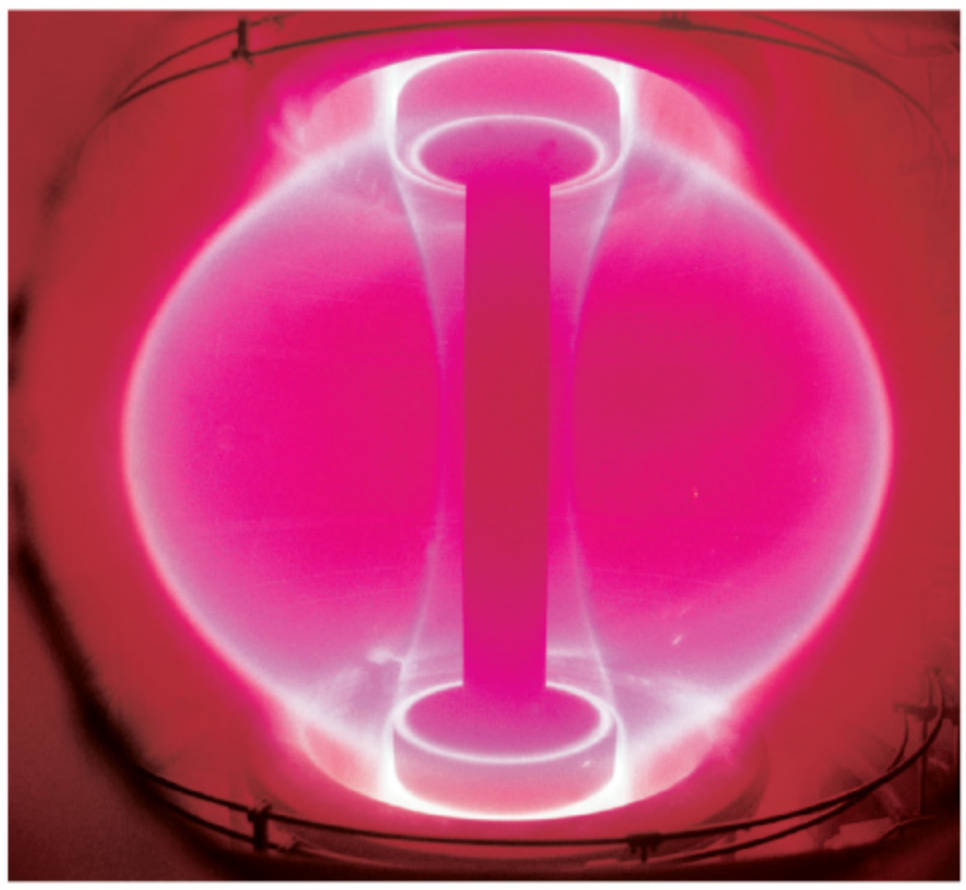
Nukleosynteza jest źródłem energii większości gwiazd. Dzięki niej Wszechświat składa się nie tylko z wodoru i helu, jak na początku swojego istnienia. Wszystkie pierwiastki cięższe od helu powstały we wnętrzach gwiazd dzięki syntezie jądrowej, ale synteza jąder cięższych od żelaza wymaga dostarczenia energii, ponieważ w jej trakcie energia wiązania na nukleon maleje (ryc. 37.2). W niektórych gwiazdach jest to możliwe, gdyż synteza ciężkich jąder zachodzi kosztem energii grawitacji podczas zapadania się gwiazdy.

F

## Reaktory termojądrowe

Prace nad kontrolowaną reakcją syntezy jądrowej prowadzi się mniej więcej od pięćdziesięciu lat. Obecnie udaje się przeprowadzać reakcje syntezy trwające zaledwie kilka sekund. Największym działającym reaktorem termojądrowym jest JET (*Joint European Torus*), położony w pobliżu Oxfordu w Wielkiej Brytanii. Plazma we wnętrzu reaktora osiąga temperaturę ok. 100 mln K, znacznie wyższą niż temperatura we wnętrzu

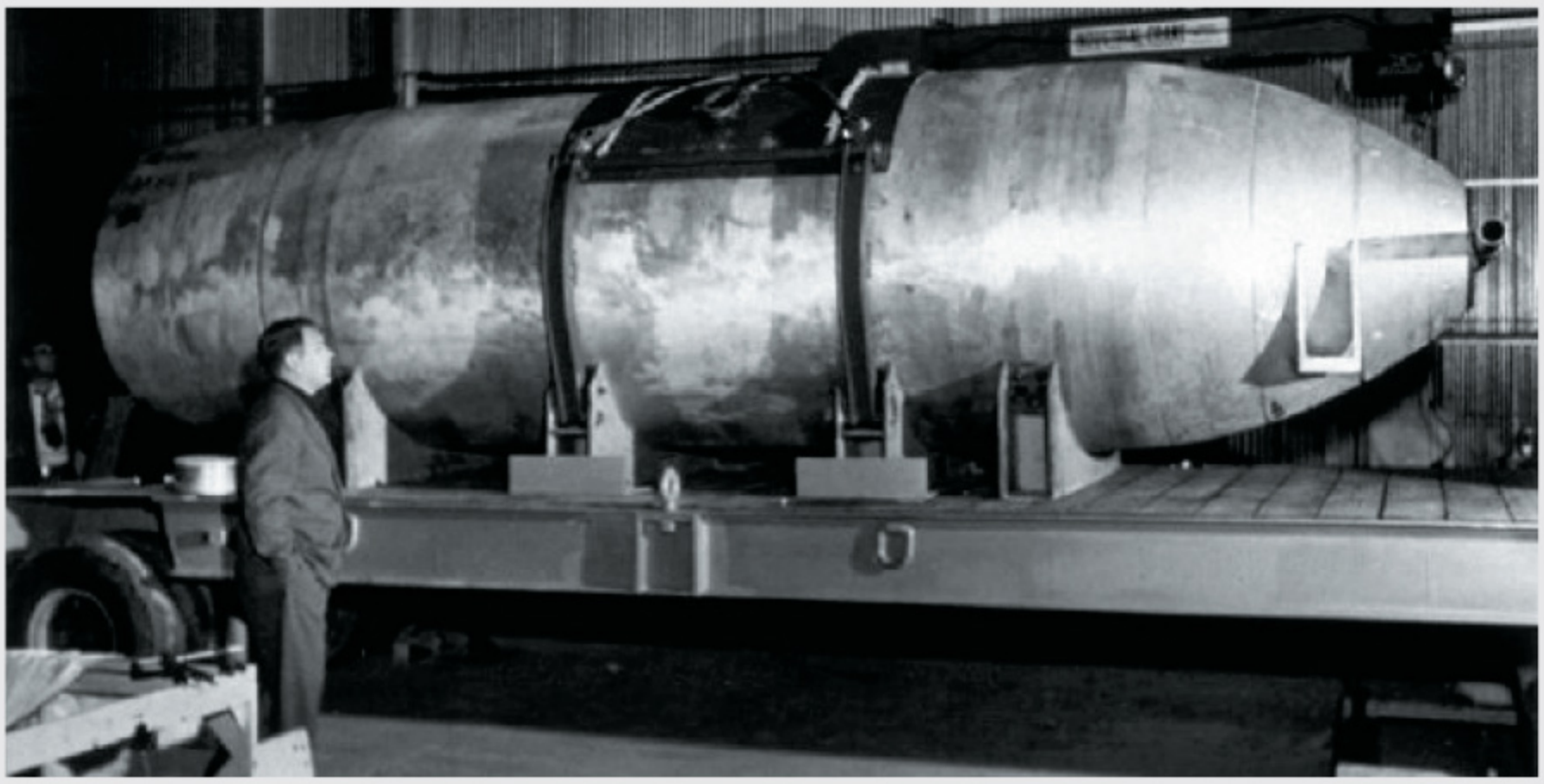
Słońca. Każdy materiał w kontakcie z plazmą o takiej temperaturze natychmiast by wyparował, plazma jest więc utrzymywana w miejscu przez odpowiednio ukształtowane pole magnetyczne.



**Ryc. 42.5.** Gorąca plazma w reaktorze termojądrowym

## WARTO WIEDZIEĆ

### Wybuch termojądrowy



Jedna z pierwszych bomb termojądrowych

Po raz pierwszy reakcję syntezy jądrowej przeprowadzono w 1952 roku. Plazmę o temperaturze milionów kelwinów otrzymano w wyniku detonacji niewielkiego ładunku jądrowego wewnątrz pojemnika wypełnionego deuterem. Pojemnik był tak zaprojektowany, że po wybuchu jądrowym nie pękł od razu, dzięki czemu wyzwolona energia mogła podgrzać jego zawartość do odpowiednio wysokiej temperatury. To zainicjowało niekontrolowaną reakcję syntezy jądrowej, skutkiem czego był wybuch termojądrowy. Największy wybuch termojądrowy nastąpił w 1961 roku, gdy Związek Radziecki zdetonował nad Nową Ziemią bombę nazwaną Car-bomba. Szacuje się, że energia wydzielona podczas tego wybuchu była dziesięć razy większa od sumy energii wydzielonych podczas wybuchów wszystkich bomb użytych w czasie II wojny światowej.

## PODSUMOWANIE

- **Synteza jądrowa** to łączenie się lekkich jąder atomowych w cięższe jądra.
- Synteza jądrowa zachodzi tylko w bardzo wysokich temperaturach.
- Dzięki reakcji syntezy jądrowej Słońce i inne gwiazdy emitują energię.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Temperatura powierzchni Słońca to mniej więcej 6000 K. Czy tuż pod powierzchnią Słońca zachodzi synteza wodoru w hel? Uzasadnij odpowiedź.
2. Podczas łączenia jąder deuteru ${}_{1}^{2}\mathrm{H}$ i trytu ${}_{1}^{3}\mathrm{H}$ powstaje jądro izotopu helu ${}_{2}^{4}\mathrm{He}$. Zapisz tę reakcję.
3. Czy w wyniku połączenia dwóch jąder izotopu litu ${}_{3}^{6}\mathrm{Li}$ może powstać izotop węgla ${}_{6}^{13}\mathrm{C}$? Uzasadnij odpowiedź.
4. Energia wiązania jądra trytu ${}_{1}^{3}\mathrm{H}$ wynosi 8,5 MeV, natomiast jądra deuteru ${}_{1}^{2}\mathrm{H}$ –2,2 MeV. Ile energii wyzwoli się w wyniku syntezy, której schemat zapisano poniżej?

$$ {}_{1}^{2}\mathrm{H} + {}_{1}^{2}\mathrm{H} \rightarrow {}_{1}^{3}\mathrm{H} + {}_{1}^{1}\mathrm{H} $$

5. Podczas spalania kilograma węgla uzyskujemy mniej więcej 25 MJ energii. Podczas syntezy jednego jądra helu z wodoru uzyskuje się ok. 28 MeV energii. Oszacuj masę helu otrzymanego z wodoru, aby uzyskana przy tym energia była równa 25 MJ.

# 43. Ewolucja gwiazd

- Narodziny gwiazd
- Ewolucja Słońca
- Ewolucja gwiazd

➔ **Przypomnij sobie**, czym są reakcje syntezy i w jakich warunkach zachodzą.

We Wszechświecie gwiazd jest więcej niż ziarnek piasku na wszystkich ziemskich plażach. Wszystkie gwiazdy rodzą się w podobny sposób, zmieniają, a w końcu umierają – bardzo różnie.

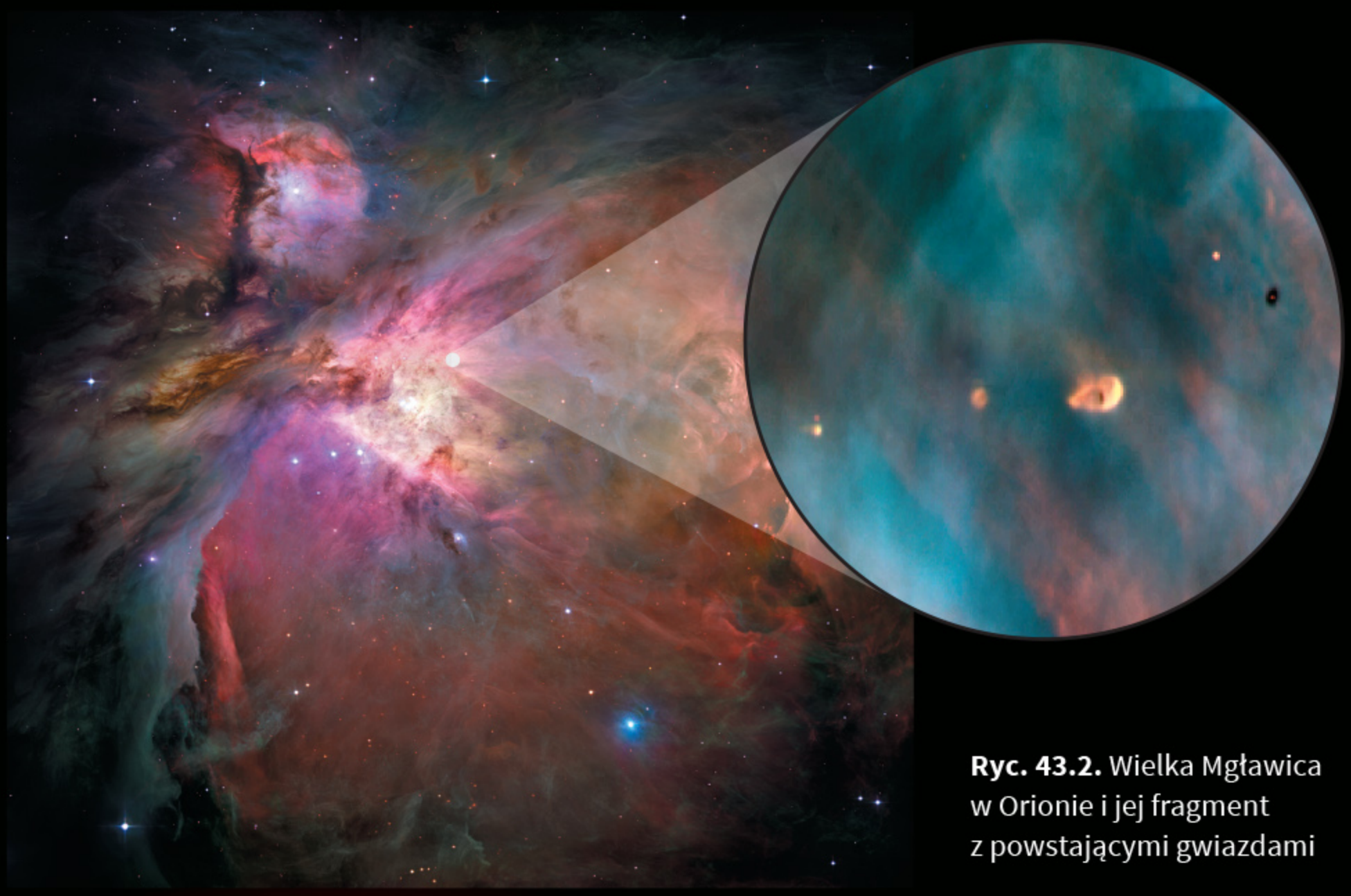
## Narodziny gwiazd

Wszechświat powstał około 14 mld lat temu w tzw. **Wielkim Wybuchu** i od tamtej pory cały czas się rozszerza. Najpierw składał się z jednorodnej, bardzo gęstej materii, a mniej więcej 300 tys. lat po Wielkim Wybuchu powstały atomy. Ustalony w tym czasie skład chemiczny Wszechświata niewiele się potem zmienił: ¾ masy materii Wszechświata to wodór, a prawie ¼ to hel. Pozostałe pierwiastki powstały później i stanowią niecały 1 % widzialnej materii.

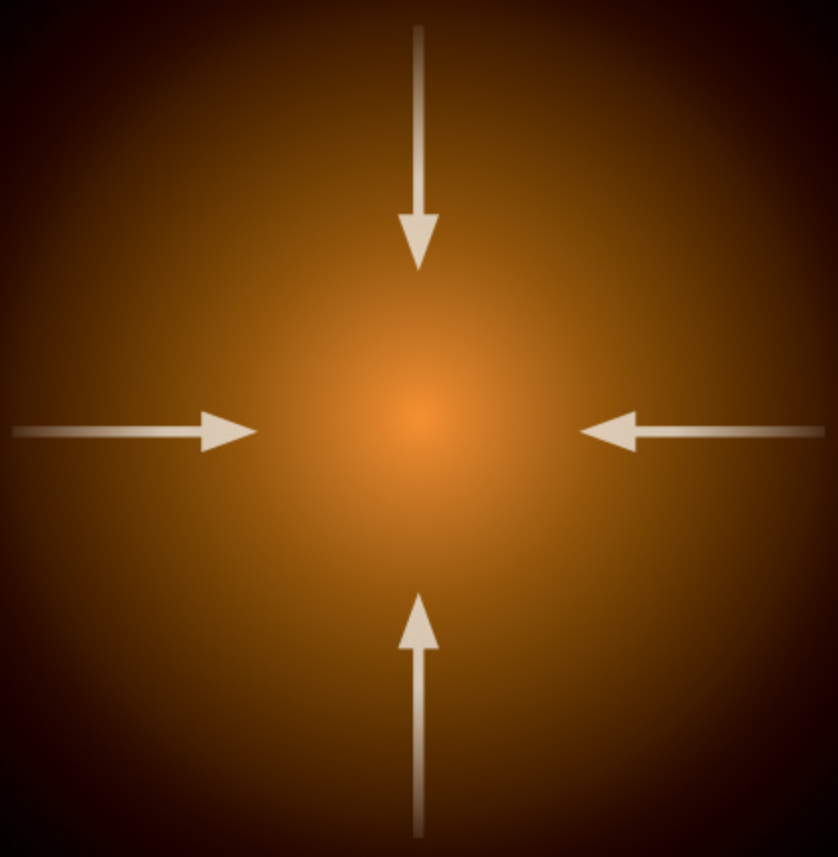
Na początku nie było ani gwiazd, ani galaktyk. Niewielkie lokalne zgęszczenia materii przyciągały grawitacyjnie przyległe porcje gazu i w ten sposób zgęszczenia narastały, aż w końcu utworzyły gwiazdy i galaktyki. Gwiazdy tworzą się także w dzisiejszym Wszechświecie, w gigantycznych obłokach wodorowo-helowych nazywanych **mgławicami** (ryc. 43.1). Obecnie wiele gwiazd powstaje np. w Wielkiej Mgławicy w Orionie (M42) (ryc. 43.2).

Jak powstają gwiazdy? Gdy masa zgęszczenia materii w mgławicy staje się coraz większa, siły grawitacji zaczynają ściskać jego środkową część, co powoduje wzrost energii wewnętrznej i temperatury gazu (ryc. 43.3). Jeśli temperatura osiągnie kilkanaście milionów kelwinów, w środku zgęszczenia rozpocznie się jądrowa synteza wodoru w hel. Oznacza to, że narodziła się **gwiazda**, czyli obiekt mający długotrwałe źródło energii, dzięki któremu może emitować promieniowanie. Aby powstała gwiazda, zgęszczenie musi mieć pewną minimalną masę. Obiekty zbyt lekkie mają za słabą grawitację, by rozgrzać gaz do temperatury potrzebnej do rozpoczęcia syntezy wodoru w hel. Minimalna masa gwiazdy to 0,08 masy Słońca, natomiast górna granica masy nie jest znana – najbardziej masywne gwiazdy przekraczają 200 mas Słońca.

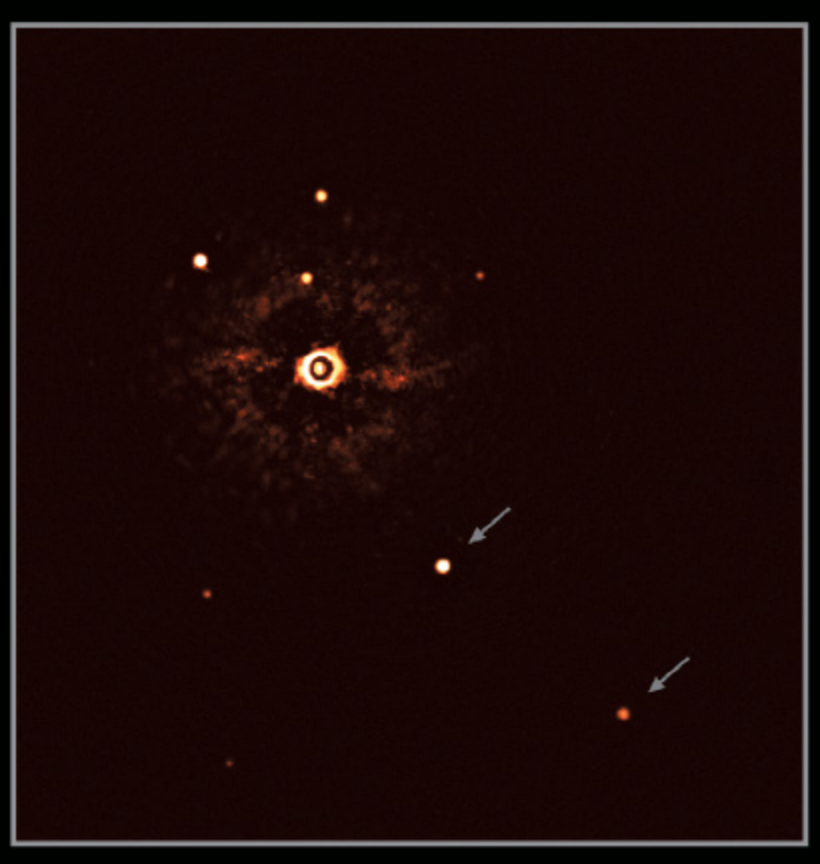
**Ryc. 43.1.** Mgławice to ogromne obłoki gazu i pyłu



**Ryc. 43.2.** Wielka Mgławica w Orionie i jej fragment z powstającymi gwiazdami



**Ryc. 43.3.** Siły grawitacji sprężają zgęszczenie materii



**Ryc. 43.4.** Zdjęcie gwiazdy TYC 8998-760-1 z dwiema planetami

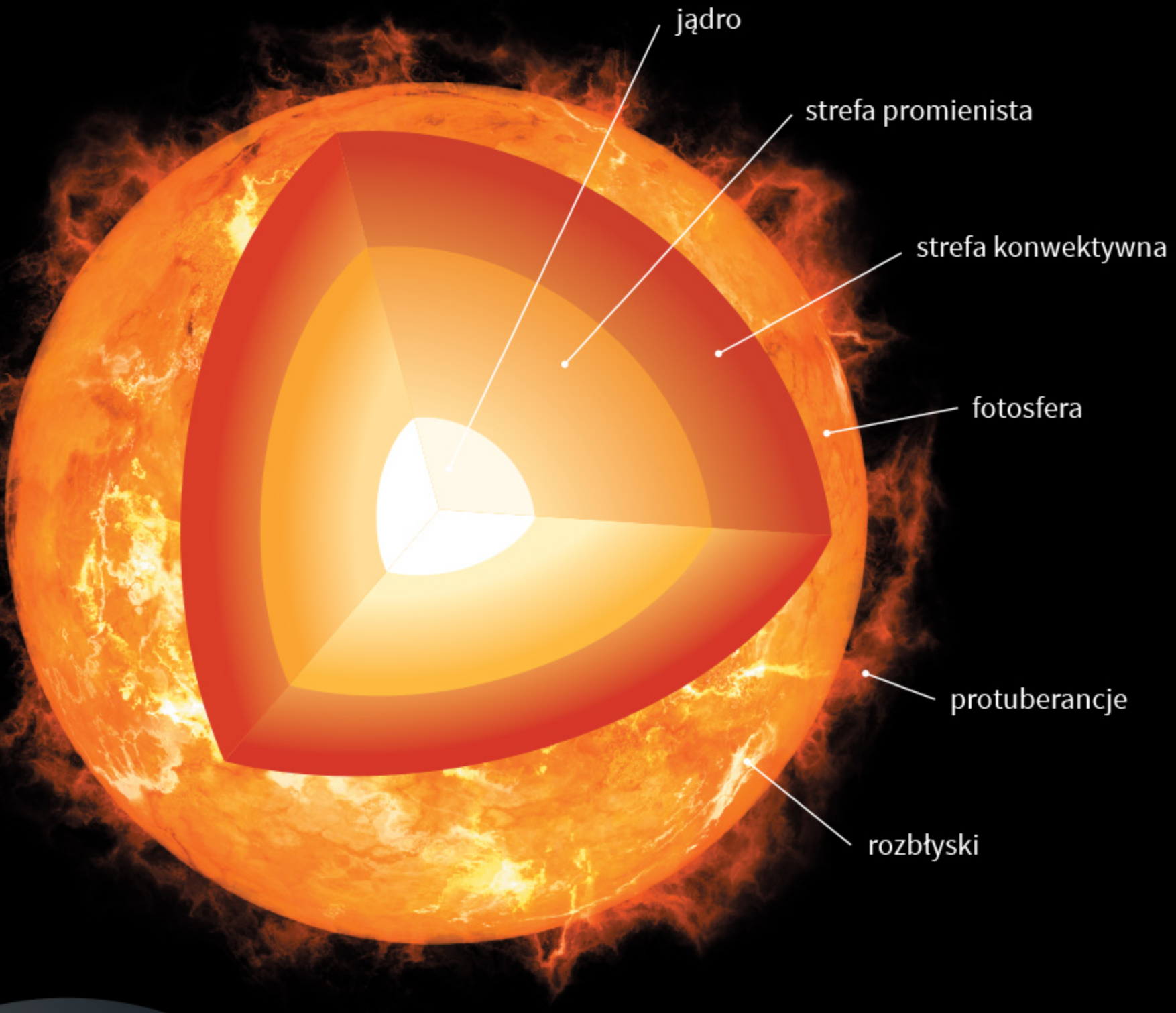
Z materii wirującej wokół gwiazdy mogą powstać planety. Znamy już tysiące planet obiegających różne gwiazdy (ryc. 43.4) i wciąż odkrywane są nowe.

**Gwiazdy powstają z obłoków wodoru i helu. W młodych gwiazdach zachodzi synteza wodoru w hel.**

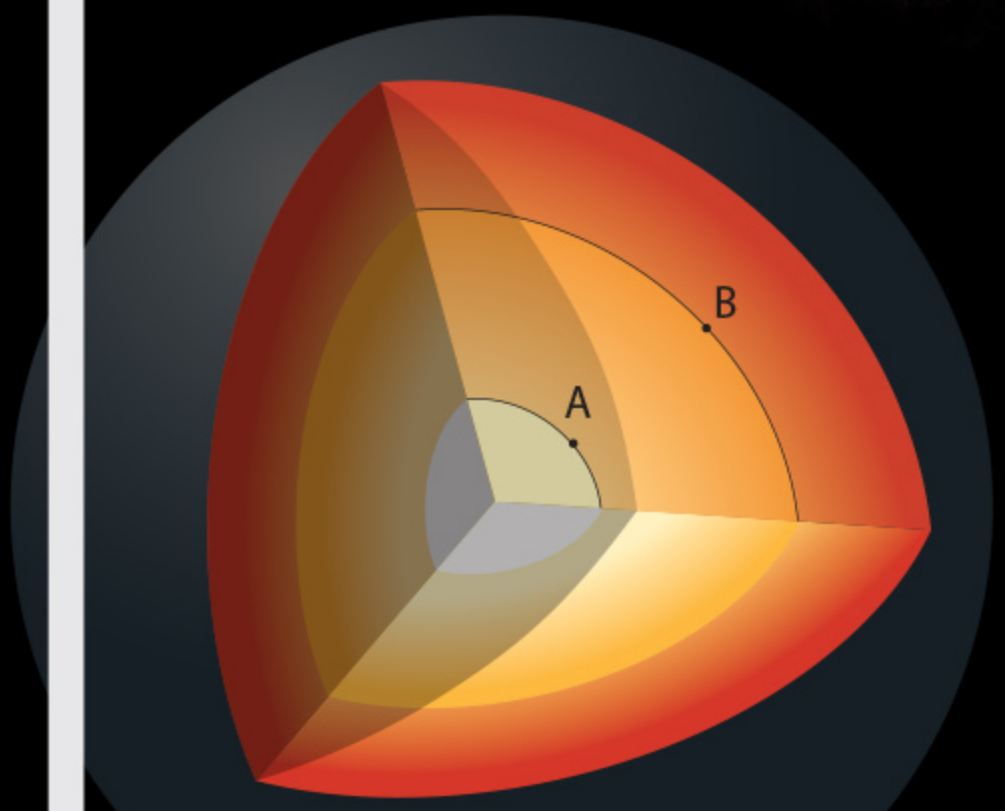
F

## Ewolucja Słońca

Słońce istnieje prawie 4,6 mld lat i jest bardzo typową gwiazdą. To wodorowo-helowa kula zjonizowanego gazu o masie $2 \cdot 10^{30}$ kg i promieniu ok. 700 tys. km.




**Ryc. 43.5.** Budowa Słońca




**Ryc. 43.6.** Ciśnienie na powierzchni B musi zrównoważyć ciężar jednej warstwy (czerwonej), a ciśnienie na powierzchni A musi zrównoważyć ciężar dwóch warstw (czerwonej i pomarańczowej)

Powierzchnię Słońca stanowi tzw. fotosfera o temperaturze ok. 6000 K. To fotosfera emituje docierające do nas światło słoneczne. W miarę zbliżania się do środka Słońca rosną gęstość materii słonecznej, jej ciśnienie i temperatura. Ten wzrost ciśnienia gwarantuje stabilność gwiazdy, bo każda warstwa musi zrównoważyć ciężar wszystkich warstw leżących wyżej od niej (ryc. 43.6).

W najgęstszej i najgorętszej części Słońca, czyli w jądrze słonecznym (ryc. 43.5), temperatura osiąga 15 mln K. Tylko tutaj zachodzi nieustannie synteza wodoru w hel. Energia, która wyzwala się w tych reakcjach, jest przenoszona ku powierzchni Słońca. Początkowo, w strefie promienistej, transport ten odbywa się przez fotony. W strefie konwektywnej energia z wewnętrznych warstw przenoszona jest na powierzchnię głównie dzięki ruchom konwekcyjnym gazu.

Gwiazdy podobne do Słońca, tzn. czerpiące energię z syntezy wodoru w hel, to **gwiazdy ciągu głównego**. Ten etap życia w przypadku Słońca trwa mniej więcej 10 mld lat. W tym czasie w wyniku reakcji syntezy w jądrze takiej gwiazdy przybywa helu, a ubywa wodoru. Zmniejsza się też liczba cząstek, gdyż z czterech jąder wodoru tworzy się jedno jądro helu, a to powoduje spadek ciśnienia w jądrze gwiazdy. Wskutek tego grawitacja gwiazdy ściska jądro, co powoduje wzrost temperatury. To z kolei przyspiesza tempo reakcji syntezy i moc gwiazdy powoli rośnie. Na przykład Słońce od początku swego istnienia zwiększyło swoją jasność o 40 % i nadal będzie ją zwiększać.

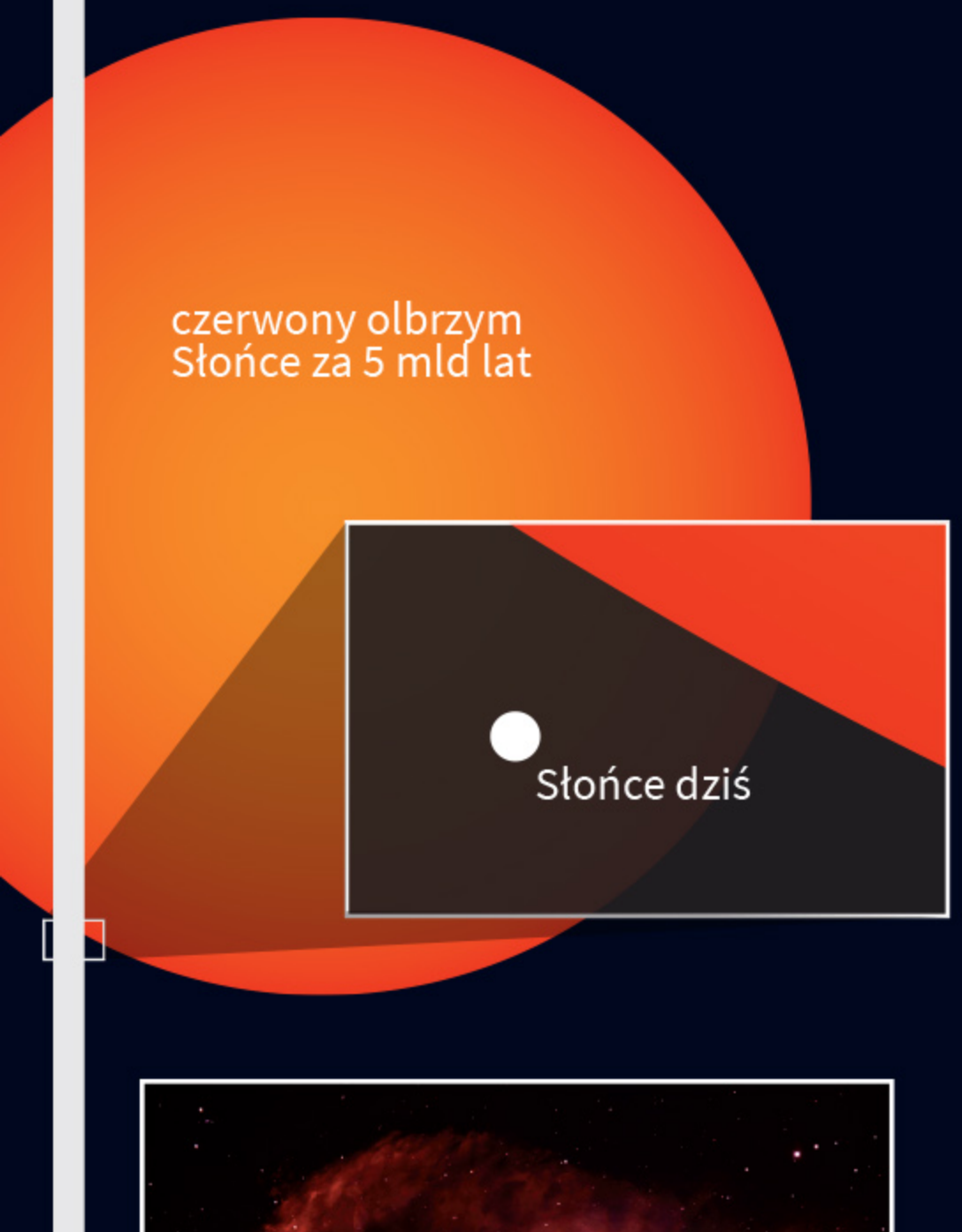
Wyczerpanie wodoru spowoduje zasadnicze zmiany w życiu Słońca. W jądrze po ustaniu nukleosyntezy ciśnienie gwałtownie spadnie, co doprowadzi do jego ściśnięcia, czyli kolapsu. Podczas grawitacyjnego ściskania temperatura silnie wzrośnie. Gdy osiągnie 100 mln K, jądra helu zaczną się łączyć w jądra węgla lub tlenu. Liczba reakcji zachodzących w jednostce czasu będzie dużo większa niż w poprzednim cyklu wodorowo-helowym, co sprawi, że moc Słońca jeszcze wzrośnie. Stanie się ono **czerwonym olbrzymem**. Zwiększy się bardzo jego jasność, a promień wzrośnie mniej więcej 200 razy. Faza czerwonego olbrzyma będzie trwała około miliarda lat. W miarę upływu czasu Słońce będzie coraz mniej stabilne, co w końcu doprowadzi do odrzucenia znacznej części jego materii w przestrzeń. Powstanie wówczas mgławica planetarna, a w jej środku będzie tkwić ściśnięte węglowo-tlenowe jądro, w którym nie będą już zachodzić reakcje jądrowe. Taka stygnąca gwiazda nazywana jest **białym karłem**. Białe karły mają masę zbliżoną do masy Słońca, a rozmiar wielkości Ziemi. Zbudowane są z materii o gęstości rzędu kilku ton/cm$^3$. Przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni białego karła jest tak ogromne, że zwykła kostka cukru miałaby ciężar taki, jak na Ziemi ciało ważące tysiące ton.

## Ewolucja gwiazd

Wszystkie powstające gwiazdy mają praktycznie ten sam skład chemiczny, różnią się jednak masą i to ona decyduje o ich ewolucji (patrz infografika na s. 318–319). Gwiazdy zaczynają swoje życie od syntezy wodoru w hel. Im mniej masywna gwiazda, tym mniejsza siła grawitacji ściskająca jej materię, a w konsekwencji mniejsze ciśnienie i temperatura w jej jądrze. Te czynniki decydują o tempie zachodzenia reakcji jądrowych. Mało masywne gwiazdy zużywają wodór bardzo powoli, więc żyją długo. Gwiazdy kilka razy lżejsze od Słońca będą żyły w fazie reakcji syntez jądrowych przez czas znacznie dłuższy niż ten, który upłynął od początku Wszechświata do dziś.

# Ewolucja gwiazd

Właściwości gwiazdy określają przede wszystkim dwie wielkości: jej masa i skład chemiczny. Gwiazdy rodzą się w obłokach wodorowo-helowych, zatem rozpoczynają swe życie od stanu, w którym ich głównymi składnikami są właśnie wodór i hel. Najlżejsze gwiazdy mają masę mniejszą niż jedna dziesiąta masy Słońca, najcięższe – większą niż sto mas Słońca. Im lżejsza gwiazda, tym dłużej żyje. Gwiazdy bardzo masywne żyją krótko i umierają gwałtownie. Wśród różnych możliwych schematów ewolucji gwiazd, zależnych od ich mas, szczególnie interesująca jest ewolucja gwiazd podobnych do Słońca i ewolucja gwiazd bardzo masywnych, przekraczających dziewięć mas Słońca.






mgławica planetarna NGC 7293

mgławica

obszar gwiazdotwórczy LH 95
w Wielkim Obłoku Magellana

błękitny nadolbrzym

F

błękitny nadolbrzym

materia tworzy nową mgławicę

ewolucja gwiazd znacznie masywniejszych od Słońca

*miliony lat (czas życia zależy od masy gwiazdy)*

czerwony nadolbrzym

pozostałość po supernowej

supernowa

czarna dziura – wizualizacja

gwiazda neutronowa

gwiazda neutronowa

biały karzeł

porównanie wielkości Ziemi i gwiazd

czarna dziura

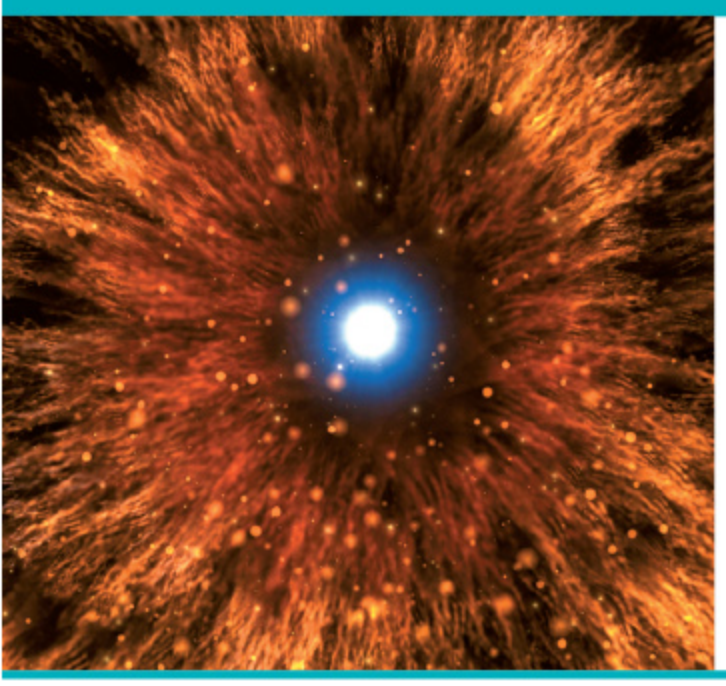
F Z kolei gwiazdy kilka razy cięższe od Słońca przechodzą przez podobne do niego etapy rozwoju, ale żyją znacznie krócej. Na przykład gwiazda dziesięciokrotnie bardziej masywna niż Słońce żyje tylko 30 mln lat, tzn. w ciągu tego czasu zużywa całe paliwo jądrowe. Im większa masa gwiazdy, tym wyższa temperatura w jej jądrze, a zatem większa energia kinetyczna znajdujących się w nim jąder atomowych, które mogą pokonać elektryczne odpychanie i łączyć się w jeszcze cięższe jądra. W bardzo masywnych gwiazdach węgiel i tlen powstałe w wyniku syntezy helu tworzą jądra jeszcze cięższych pierwiastków, aż do żelaza. Jądra atomów żelaza mają największą energię wiązania na nukleon, dlatego zachodzące do tego momentu reakcje syntezy są źródłem energii gwiazdy. Gdy w jądrze gwiazdy zaczyna przeważać żelazo, wyczerpuje się źródło jej energii. Gwiazda się zapada i na krótki czas staje się jednym z najjaśniejszych obiektów w kosmosie.

## PODSUMOWANIE

- Gwiazdy powstają w mgławicach wskutek grawitacyjnego kurczenia się gazu.
- W gwiazdach podobnych do Słońca zachodzą reakcje **syntezy wodoru w hel**.
- Gwiazdy podobne do Słońca po wyczerpaniu wodoru stają się **czerwonymi olbrzymami**, w których z helu tworzą się cięższe jądra.
- Końcową fazą ewolucji gwiazd podobnych do Słońca jest **biały karzeł** – niezwykle gęsta kula materii, w której nie zachodzą już reakcje jądrowe.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Wymień kolejne etapy życia Słońca.
2. Odległość Ziemia–Słońce wynosi 150 mln km. Czy Ziemia znajdzie się pod powierzchnią Słońca, gdy stanie się ono czerwonym olbrzymem? Uzasadnij odpowiedź na podstawie danych z treści rozdziału.
3. Czy wielkość Słońca by się zmieniła, gdyby nagle wygasły w nim reakcje jądrowe? Uzasadnij odpowiedź.
4. Oszacuj średnią gęstość białego karła o masie $2{,}5 \cdot 10^{30}$ kg i promieniu 3500 km.
5. Jaki byłby ciężar astronauty ważącego 80 kg, który wylądowałby na powierzchni białego karła o masie $1{,}6 \cdot 10^{30}$ kg i promieniu 7000 km? Ile razy cięższy byłby ten astronauta na powierzchni tej gwiazdy niż na powierzchni Ziemi? Wskazówka: oblicz przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni białego karła.



# 44. Supernowe i czarne dziury

- Supernowe
- Czarne dziury

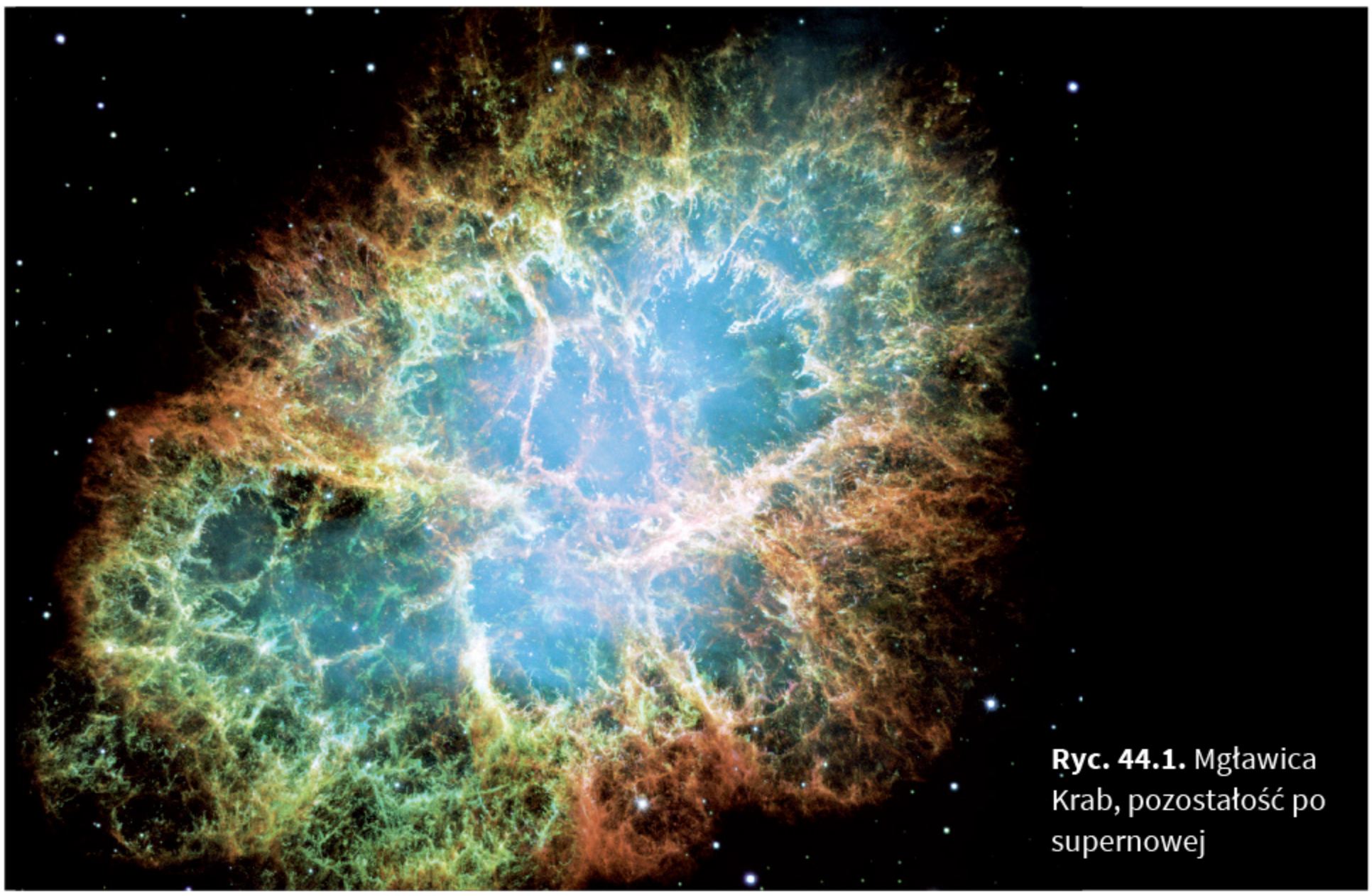
F

➔ **Przypomnij sobie** wiadomości o ewolucji gwiazd.

We Wszechświecie zdarzają się gigantyczne eksplozje ogromnych gwiazd, zwane supernowymi. Istnieją też obiekty o właściwościach niepojętych dla naszego „zdrowego rozsądku". To czarne dziury.

## Supernowe

W chińskich i arabskich kronikach z 1054 roku jest zapis o pojawieniu się na niebie zupełnie nowej i niezwykle jasnej gwiazdy. Można ją było zobaczyć nawet w dzień, ale stopniowo stawała się coraz mniej widoczna i po kilku miesiącach zupełnie zniknęła. Gdy współcześni astronomowie skierowali teleskopy w opisywane w dawnych kronikach miejsce na niebie, zobaczyli dziwny obiekt, nazywany obecnie Mgławicą Krab (ryc. 44.1). To pozostałość po ogromnej gwieździe, której eksplozję zaobserwowano w 1054 roku. Jak może dojść do takiego kosmicznego wybuchu?



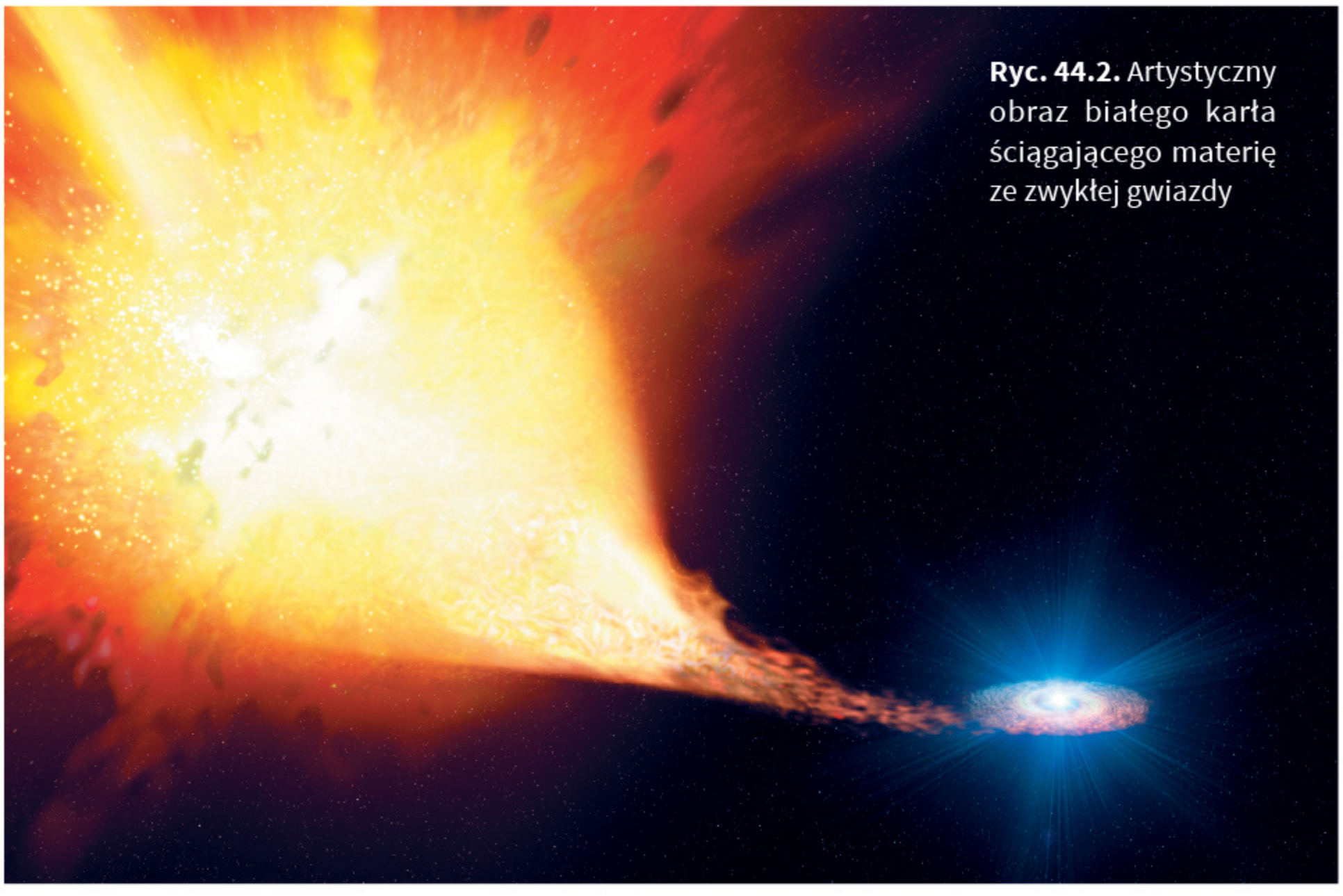
**Ryc. 44.1.** Mgławica Krab, pozostałość po supernowej

F Gwiazdy o masie co najmniej dziewięć razy większej od masy Słońca kończą życie jako czerwone olbrzymy z żelaznym jądrem. Jest ono – jak i cała gwiazda – zjonizowanym gazem. W tej fazie ewolucji gwiazda traci źródło energii, a ciśnienie w jądrze się obniża, więc siły grawitacji je ściskają. Proces ten jest dodatkowo przyspieszony poprzez łączenie się elektronów i protonów w neutrony – gwałtownie maleje wówczas liczba cząstek i w czasie zaledwie kilku sekund następuje kolaps (zapadnięcie się) jądra. Powstaje z niego **gwiazda neutronowa**, złożona głównie z neutronów, upakowanych gęściej niż w jądrze atomowym. Od jej powierzchni odbijają się opadające pozostałe warstwy gwiazdy. Opisane procesy prowadzą do widocznej eksplozji.

**Supernowa** to wybuch gwiazdy.

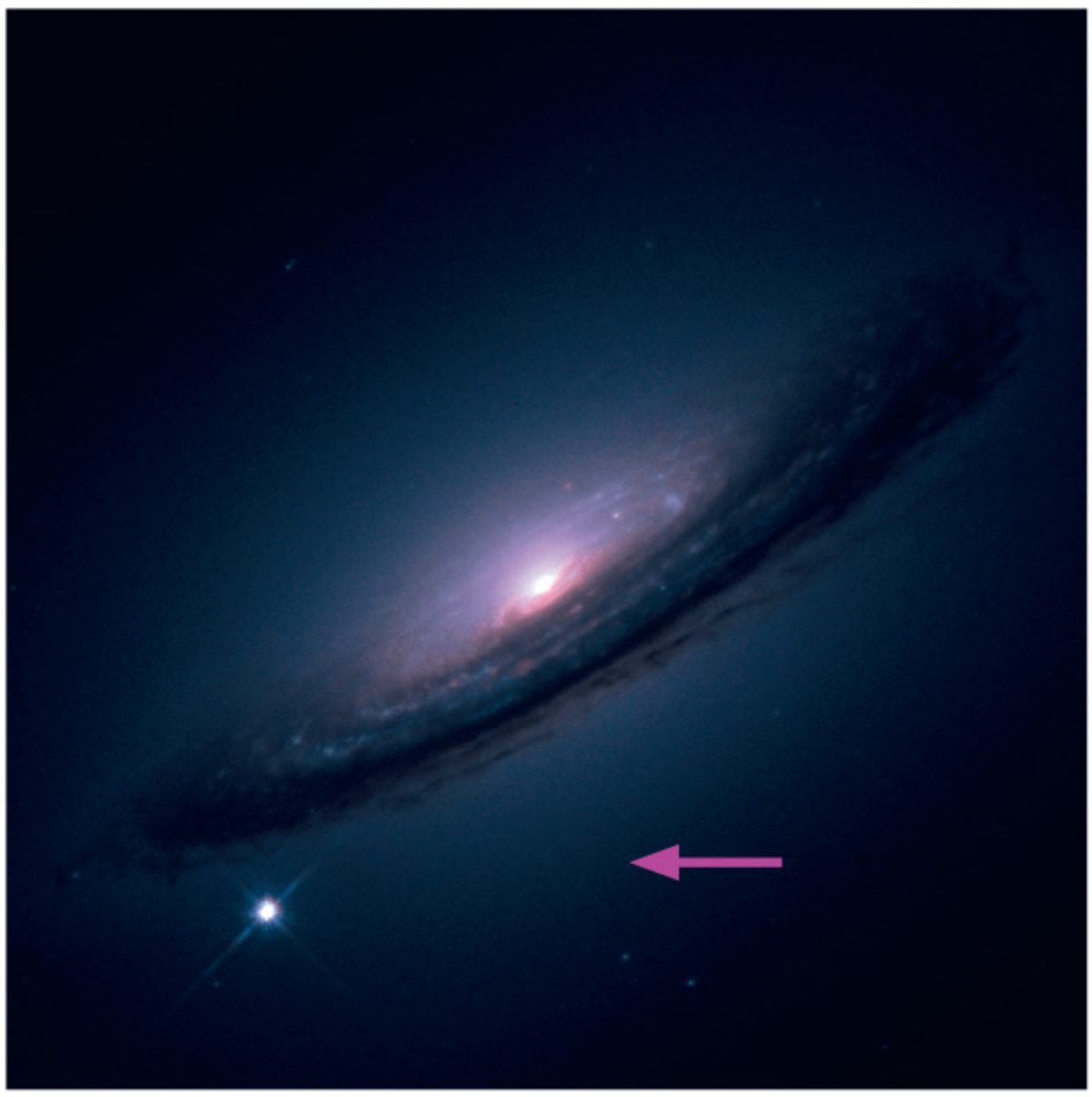
Na rycinie 44.1 widoczna jest materia byłej gwiazdy, a w jej wnętrzu ukrywa się gwiazda neutronowa. Gwiazdy neutronowe mają masy mniej więcej dwa razy większe od masy Słońca i promień rzędu kilkudziesięciu kilometrów, zatem zbudowane są z materii o olbrzymiej gęstości. Właściwości tej materii nie są jeszcze dobrze poznane. Grawitacja na powierzchni gwiazdy neutronowej również jest ekstremalna, jednak dalsze ściskanie jest powstrzymywane przez oddziaływanie jądrowe neutronów.

Supernowe mogą mieć inne przyczyny niż zapadnięcie się czerwonego olbrzyma. Czasem biały karzeł mający za sąsiada inną gwiazdę ściąga z niej materię, rosną więc jego masa i temperatura (ryc. 44.2). Może to doprowadzić do gwałtownego zainicjowania syntezy jądrowej i eksplozji gwiazdy.

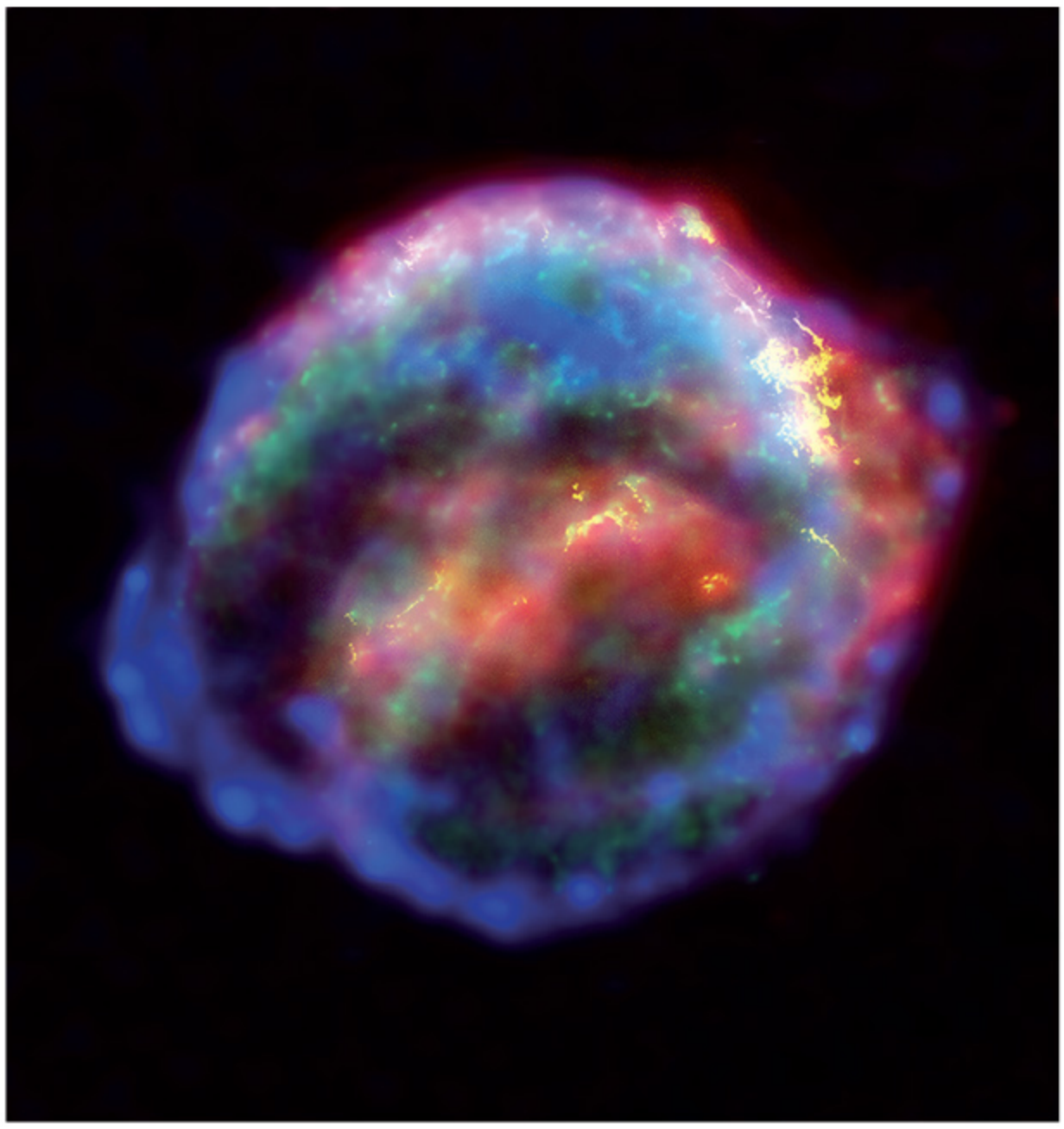


**Ryc. 44.2.** Artystyczny obraz białego karła ściągającego materię ze zwykłej gwiazdy

Supernowe mają moc promieniowania miliardy razy większą od typowej gwiazdy. Ich jasność jest porównywalna z jasnością macierzystych galaktyk (ryc. 44.3), dlatego względnie łatwo odkrywa się je w odległych galaktykach (robią to również amatorzy). Ostatnia supernowa w naszej Galaktyce była widoczna gołym okiem w 1604 roku (ryc. 44.4). Nie wiemy, kiedy zdarzy się następna.



**Ryc. 44.**3. Supernowa w galaktyce NGC 4526

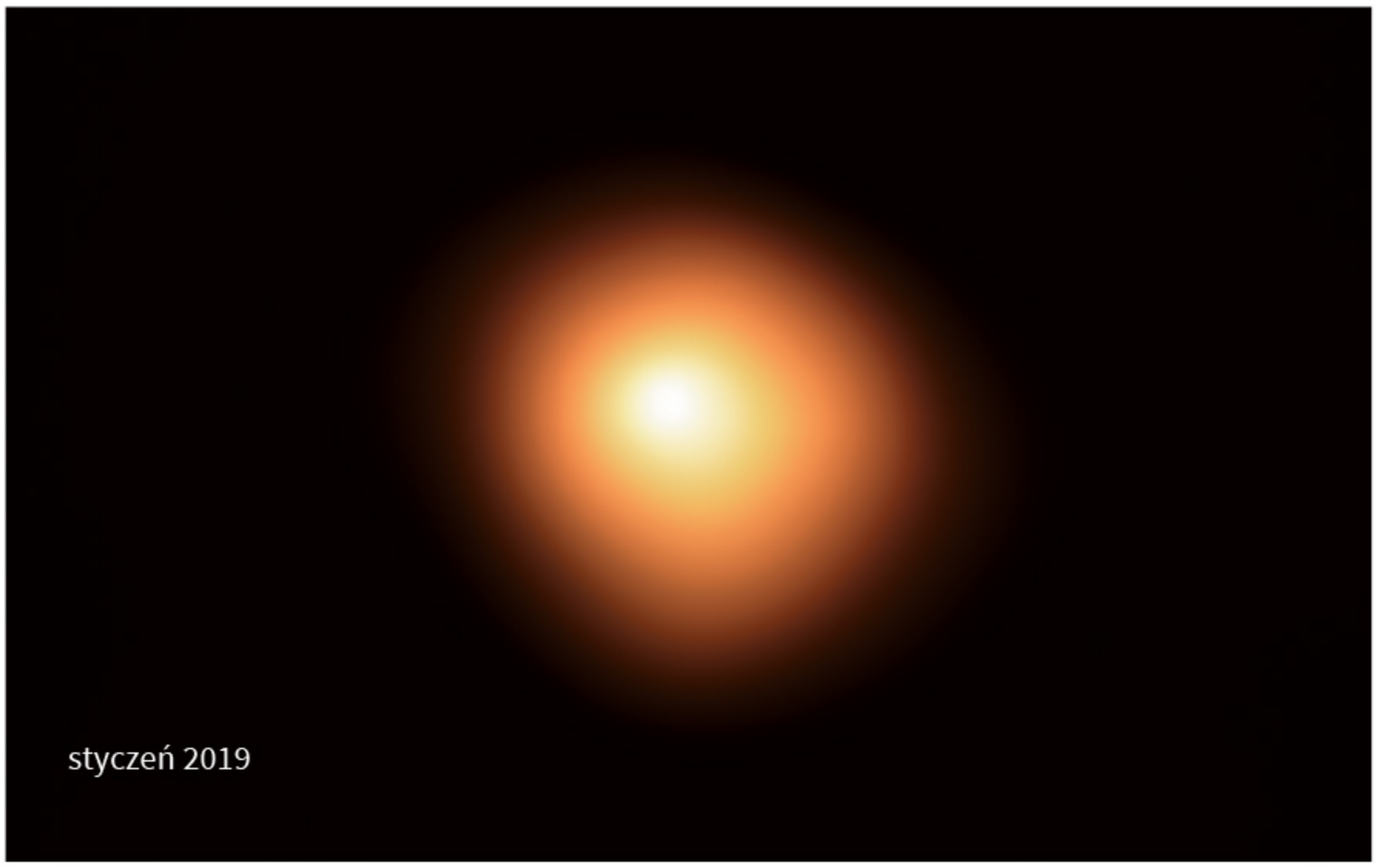


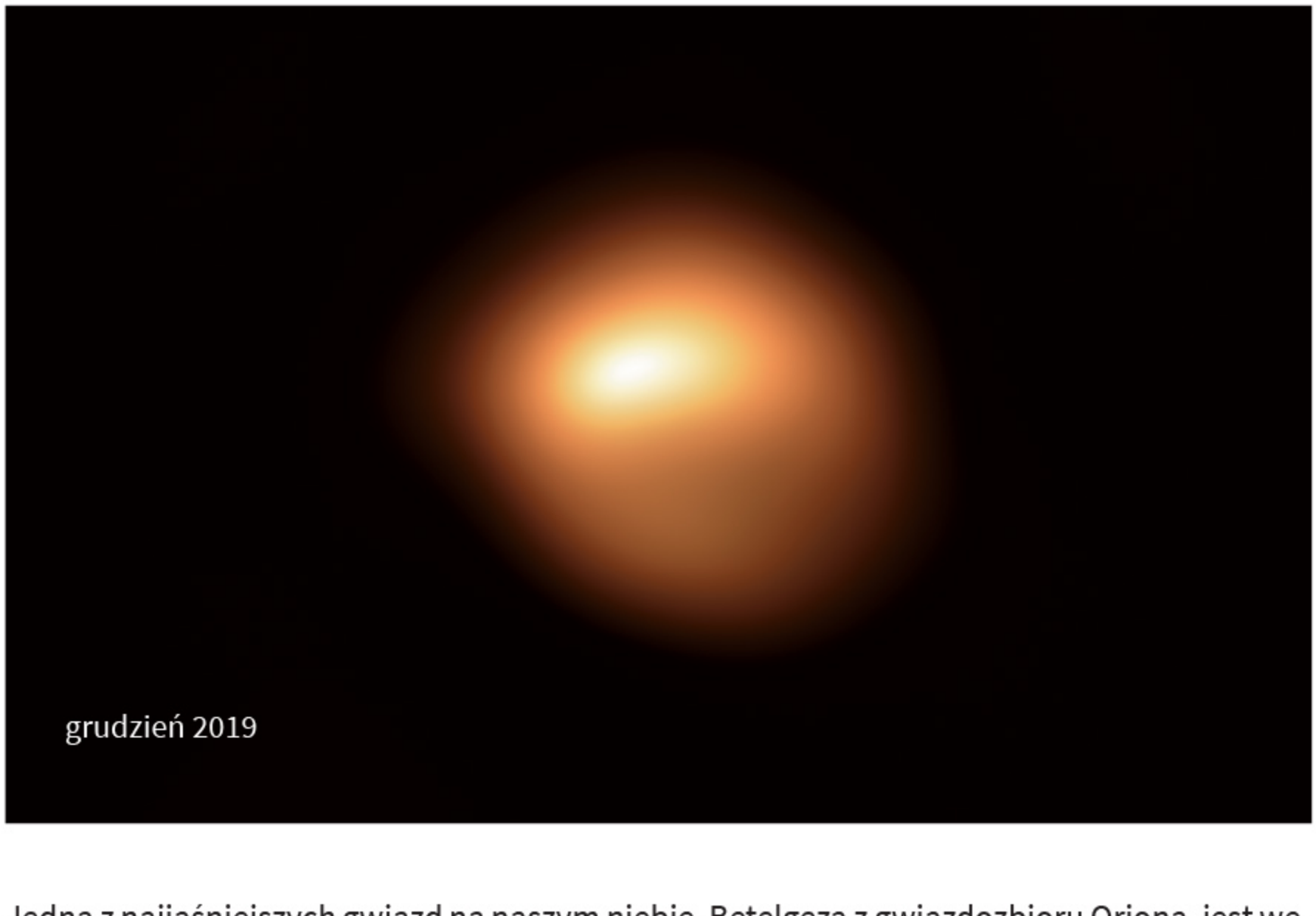
**Ryc. 44.4.** Pozostałość po supernowej z 1604 roku

F

## WARTO WIEDZIEĆ

### Kandydatka na supernową




Jedna z najjaśniejszych gwiazd na naszym niebie, Betelgeza z gwiazdozbioru Oriona, jest według astronomów bliska wybuchu. Wykazuje ostatnio dużą zmienność jasności (ryc.). Gdyby tę ogromną gwiazdę umieścić na miejscu Słońca, sięgałaby aż do Jowisza. Betelgeza znajduje się ok. 640 lat świetlnych od Słońca, co w kosmicznej skali oznacza bliskie sąsiedztwo. Jako supernowa byłaby jasna jak Księżyc w pełni, zatem zmieniłaby zupełnie widok nocnego nieba.

Supernowe nie zdarzają się często, lecz mają duże znaczenie dla naszego istnienia. Jedynie we wnętrzach gwiazd mogą powstawać pierwiastki cięższe od helu, ale ich produkcja kończy się na żelazie. Dopiero w trakcie wybuchu gwiazdy tworzą się pierwiastki jeszcze cięższe, zatem tylko supernowe wzbogacają mgławice w pierwiastki cięższe od żelaza. Pochodzące od supernowych fale uderzeniowe powodują powstawanie wewnątrz mgławic zgęszczeń będących zarodkami nowych gwiazd i planet. Wszystkie składniki Ziemi i naszych ciał – poza wodorem i helem – powstały w jądrach dawno umarłych gwiazd. Ich wybuchy umożliwiły powstanie naszej planety oraz rozwój życia. W tym sensie jesteśmy dziećmi kosmosu.

## Czarne dziury

Nie zawsze kolaps jąder masywnych olbrzymów jest zatrzymywany przez siły jądrowe między neutronami. Im większa masa gwiazdy neutronowej, tym większa siła grawitacji. Jeśli masa przekroczy trzy do czterech mas Słońca, siły jądrowe nie są w stanie powstrzymać kolapsu. Gwiazda neutronowa się zapada i powstaje niezwykły obiekt nazywany **czarną dziurą**.

> **Czarna dziura** to obiekt o tak silnej grawitacji, że nic – łącznie ze światłem – nie może go opuścić.

Taki obiekt nie ma żadnej materialnej powierzchni. Każde wpadające do czarnej dziury ciało musi dotrzeć do jej środka, nazywanego **osobliwością**. **Horyzont czarnej dziury** to powierzchnia, spod której żadna cząstka, nawet światło, nie może się wydostać. Wobec tego nie możemy zobaczyć, co jest pod horyzontem. Promień horyzontu traktujemy jako promień czarnej dziury. Wzór na odległość horyzontu od środka nieobracającej się czarnej dziury jest następujący:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} \tag{1}$$

gdzie:

$R_g$ – promień nieobracającej się czarnej dziury, tzw. promień grawitacyjny,
$M$ – masa czarnej dziury,
$c$ – prędkość światła w próżni.
$G$ – stała grawitacji

Gdyby czarną dziurę utworzyła materia gwiazdy obracającej się wokół własnej osi, ten promień byłby mniejszy. W przypadku maksymalnie szybkiego obrotu (poruszająca się materia nie może osiągnąć prędkości światła) byłby dwa razy mniejszy od $R_g$.

Ze wzoru (1) wynika, że ciało o dowolnej masie może być czarną dziurą pod warunkiem, że osiągnie odpowiednio małe rozmiary. Na przykład Ziemia stałaby się czarną dziurą, gdyby całą jej materię ścisnąć do rozmiarów piłeczki pingpongowej. Nie ma w przyrodzie sił, które mogłyby tego dokonać.

F

**PRZYKŁAD 1.**

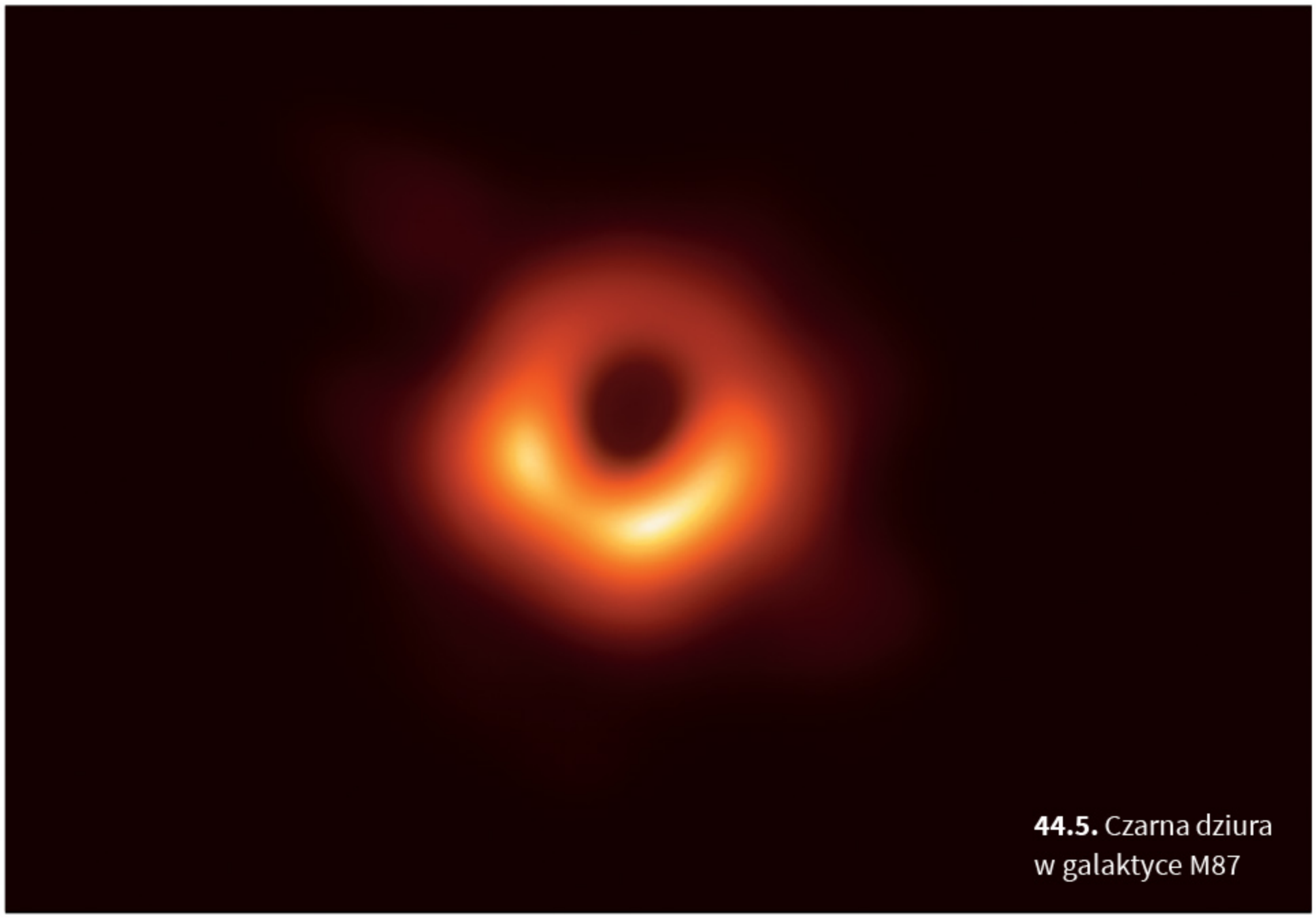
Słońce mogłoby stać się czarną dziurą, gdyby zdecydowanie zmniejszyły się jego rozmiary. Oszacujmy, jaki powinien być wówczas jego promień. Masa Słońca to $2 \cdot 10^{30}$ kg.

Podstawiamy dane do wzoru (1):

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} = \frac{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11} \ \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2} \cdot 2 \cdot 10^{30} \ \mathrm{kg}}{\left(3 \cdot 10^8 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)^2} \approx 3000 \ \mathrm{m}$$

Promień Słońca jest równy ok. 700 tys. km, zatem aby stało się ono czarną dziurą, musiałoby mieć promień ponad 230 tys. razy mniejszy. Grawitacja Słońca jest zbyt słaba, by tego dokonać.

Czarna dziura nie emituje żadnego promieniowania, więc jej samej nie widać, ale dzięki swej potężnej grawitacji ściąga do siebie pobliską materię, a tę możemy już zobaczyć (ryc. 44.5). Dzięki temu we Wszechświecie odkryto całkiem sporo czarnych dziur. Okazało się, że np. w centrach wielu galaktyk istnieją niezwykle masywne czarne dziury. Czarna dziura znajdująca się w centrum naszej Galaktyki ma masę ok. 4 mln mas Słońca. W 2019 roku udało się uzyskać obraz czarnej dziury w centrum galaktyki M87 (ryc. 44.5); ma ona masę 6,5 mld razy większą od masy Słońca.



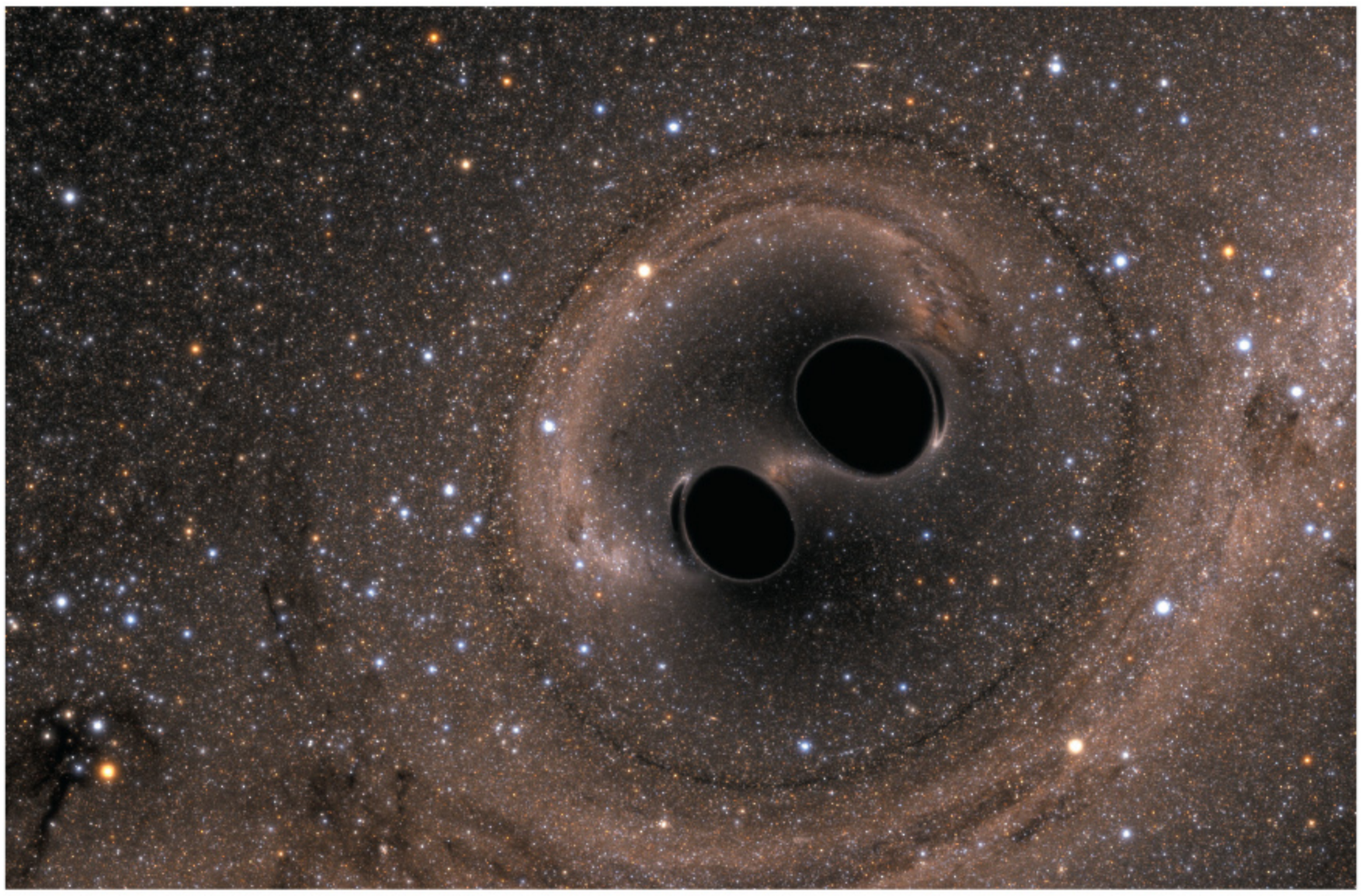
**44.5.** Czarna dziura w galaktyce M87

F

## WARTO WIEDZIEĆ

**Fale grawitacyjne i czarne dziury**

W 2015 roku odkryto fale grawitacyjne rozchodzące się z prędkością światła. Fale te powodują okresowe, drobne zmiany przestrzeni i czasu. Zmiana przestrzeni oznacza, że zmieniają się odległości między wszystkimi ciałami. Fale grawitacyjne powstają w wyniku zmiany wzajemnego położenia masywnych obiektów. Pierwsza odkryta fala grawitacyjna została wyemitowana przez dwie obiegające się czarne dziury (ryc.) podczas ich zlewania się w jedną. Zmiany odległości wywołane tą falą były niewyobrażalnie małe. Detektor, który ją zarejestrował, zmierzył zmiany odległości między czujnikami mniejsze od rozmiaru nukleonu.

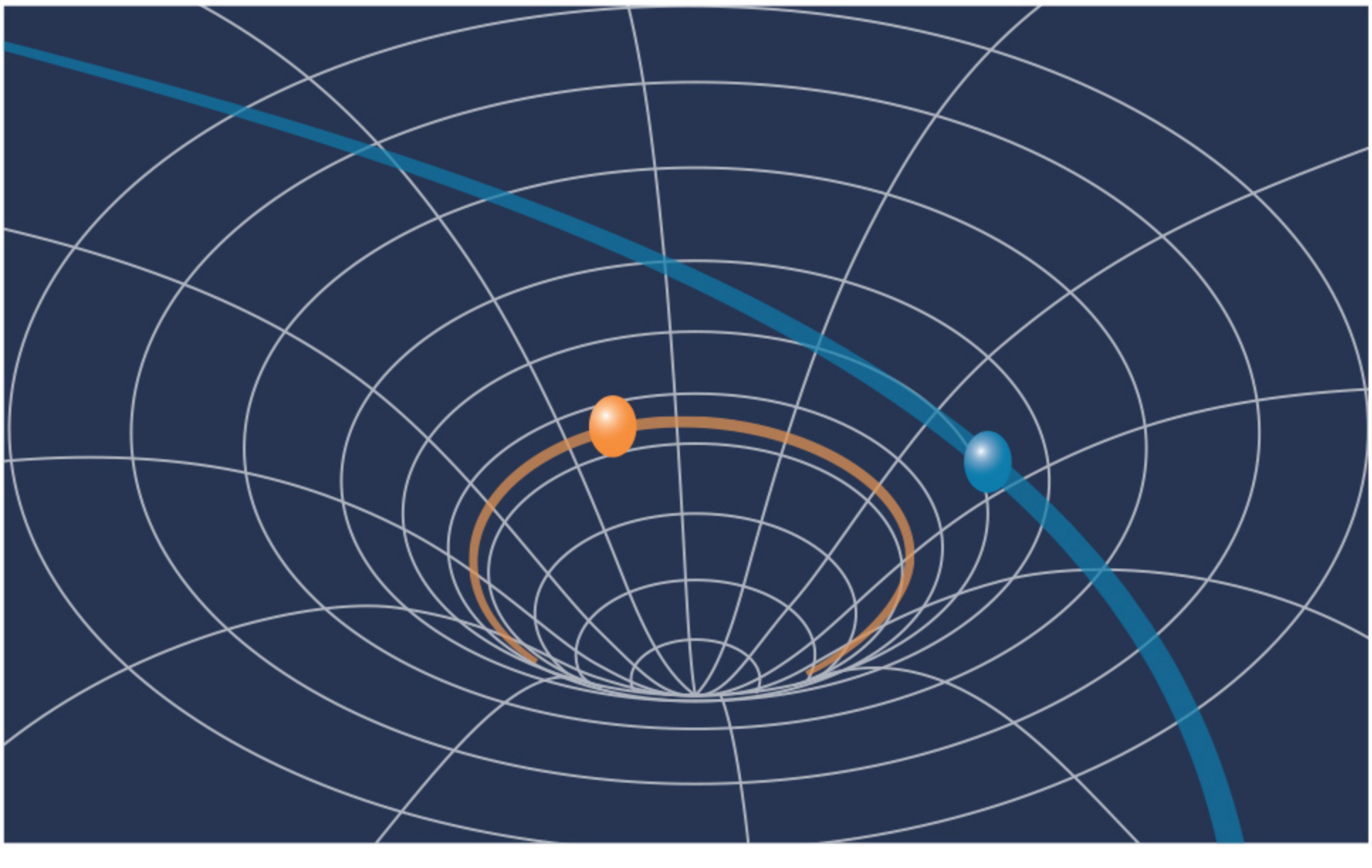


Udało się zmierzyć masy czarnych dziur będących źródłem tej fali. Były one około 36 i 31 razy większe od masy Słońca. Czarna dziura, która z nich powstała, miała masę 63 razy większą od masy Słońca. To niezwykłe wydarzenie nastąpiło w odległości prawie 1,5 mld lat świetlnych od Ziemi. Do końca 2018 roku amerykański detektor LIGO i europejski Virgo odkryły w sumie dziesięć zderzeń czarnych dziur i jedno zderzenie gwiazd neutronowych.

## Dziury w czasoprzestrzeni

Obiektów o potężnej grawitacji nie można poprawnie opisywać za pomocą praw Newtona. Współczesną teorię grawitacji opracował w 1915 roku Albert Einstein. Jej podstawowym pojęciem jest czterowymiarowa **czasoprzestrzeń** – połączenie czasu i przestrzeni. Okazało się, że grawitacja to efekt zakrzywienia czasoprzestrzeni. Im większa masa ciała, tym bardziej zakrzywia czasoprzestrzeń wokół siebie – to zmusza inne ciała do ruchów krzywoliniowych. Można to przedstawić graficznie z ograniczeniem się do dwóch wymiarów (ryc. 44.6). Im większa masa gwiazdy, tym głębszy wytwarza lej w czasoprzestrzeni.

F Czarna dziura wytwarza lej najgłębszy, z którego nic nie może się wydostać. Jednak daleko od czarnej dziury jej oddziaływanie grawitacyjne jest wciąż takie samo jak gwiazdy, z której powstała. Na przykład kolaps gwiazdy kończący się powstaniem czarnej dziury nie zmieniłby orbit planet wokół niej krążących.



**Ryc. 44.6.** Gwiazda (w głębi leja) zakrzywia czasoprzestrzeń i powoduje grawitacyjne przyciąganie

Zakrzywienie czasoprzestrzeni wokół masywnych ciał oznacza m.in. to, że czas płynie obok nich wolniej – tym wolniej, im większa grawitacja. Efekt ten jest świetnie potwierdzony np. działaniem GPS. System ten musi uwzględniać, że zegary umieszczone w satelitach poruszających się wysoko nad Ziemią chodzą odrobinę szybciej niż na Ziemi z powodu mniejszej grawitacji. Gdyby wysłać w stronę czarnej dziury sondę badawczą, widzielibyśmy, jak w miarę zbliżania się do jej horyzontu wszystkie procesy (w tym zegary) na niej spowalniają do niewyobrażalnie wolnego tempa.

To tylko jeden przykład niezwykłych właściwości czarnych dziur. Nie wiemy jeszcze, czym jest osobliwość i jaki jest tam stan materii. Taka jest istota nauki – daje ona odpowiedzi na pytania dotyczące praw natury i budowy Wszechświata, nie daje jednak odpowiedzi „ostatecznych". Każda odpowiedź rodzi kolejne pytania, na które uzyskujemy dokładniejszą odpowiedź. Kolejne pokolenia uczonych przesuwają granicę poznania dalej i dalej. Dla waszego pokolenia również jest miejsce w tej fascynującej przygodzie ludzkości.

## PODSUMOWANIE

- **Supernowa** to wybuch gwiazdy, w którym powstają pierwiastki cięższe od żelaza.
- **Czarna dziura** to obiekt, z którego nie może się wydostać nawet światło.
- W centrach niektórych galaktyk istnieją czarne dziury o ogromnych masach.

## PYTANIA I ZADANIA

1. Mgławica Krab ma rozmiary ok. 10 lat świetlnych. Czy łatwo na rycinie 44.1 dojrzeć pozostałą po wybuchu gwiazdę neutronową? Wskazówka: jasność gwiazdy neutronowej jest niewielka w porównaniu z jasnością mgławicy, porównaj zatem ich rozmiary.
2. Czy niedaleka od nas gwiazda po przemianie w czarną dziurę zagroziłaby istnieniu Układu Słonecznego? Uzasadnij odpowiedź.
3. Oszacuj promień czarnej dziury znajdującej się w M87. Skorzystaj z danych zawartych w treści rozdziału.
4. Na podstawie danych z tekstu rozdziału oszacuj średnią gęstość gwiazdy neutronowej i porównaj ją z gęstością białego karła.
5. W 2018 roku zaobserwowano połączenie się dwóch czarnych dziur o masach 51 i 34 razy większych od masy Słońca. Powstała czarna dziura miała masę równą 81 masom Słońca.
   a) Wyjaśnij, dlaczego masa produktu tej reakcji jest mniejsza od sumy mas dwóch czarnych dziur przed połączeniem.
   b) Oblicz wydzieloną energię.

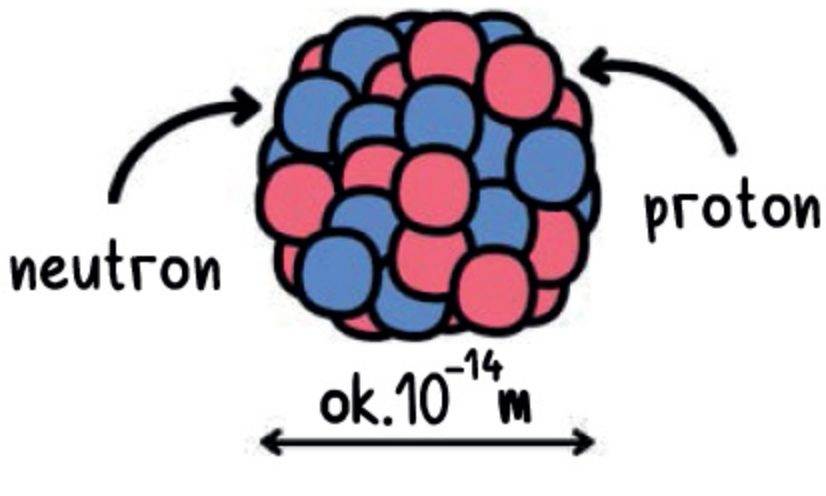
# FIZYKA JĄDROWA

## JĄDRO ATOMOWE

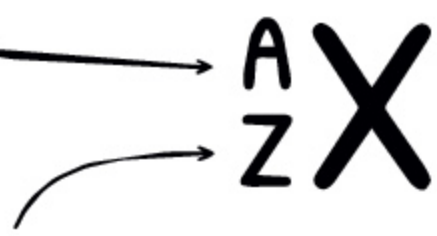
zbudowane jest z protonów i neutronów (nukleonów).

## SIŁY JĄDROWE

to siły oddziaływania między nukleonami, działające na odległościach rzędu średnicy nukleonu.




**Liczba masowa A** – liczba wszystkich nukleonów w jądrze atomu.




**Liczba atomowa Z** – liczba protonów w jądrze atomu.

## Izotopy

to atomy tego samego pierwiastka o różnej liczbie neutronów w jądrze.

$^{11}_{6}C$ $^{12}_{6}C$ $^{13}_{6}C$ $^{14}_{6}C$

izotopy węgla

**Rozpad α**

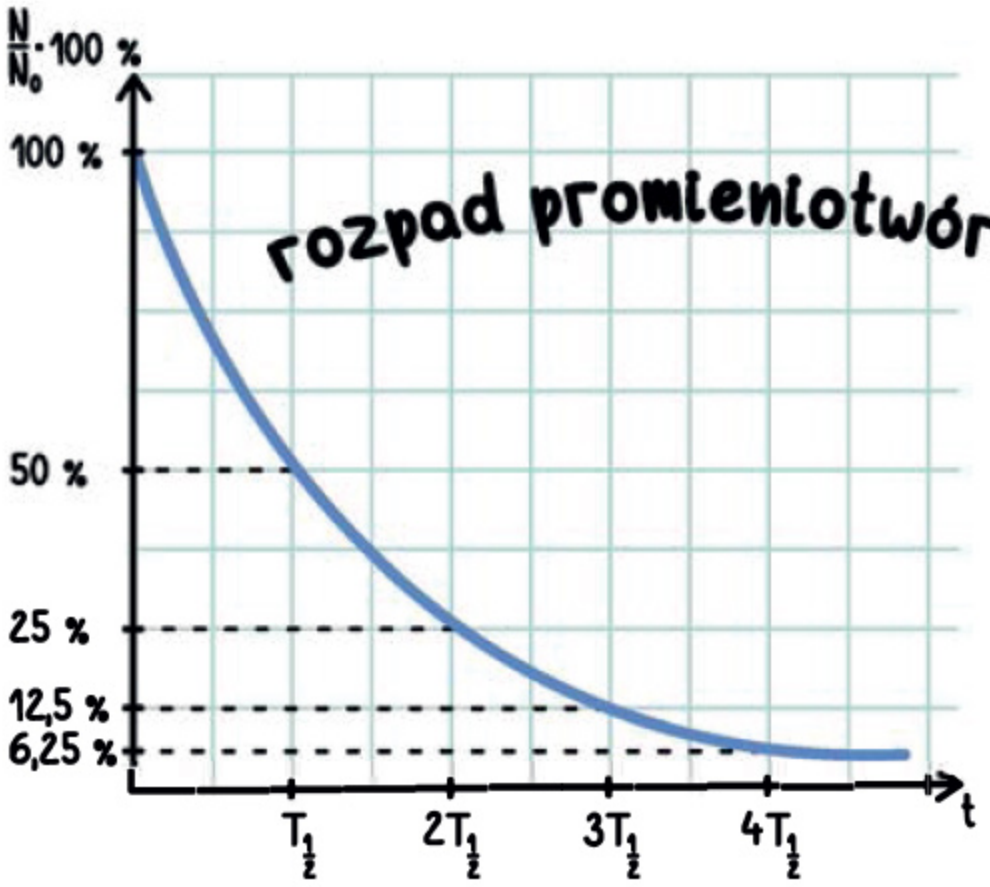
$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

cząstka α

**Rozpad β**

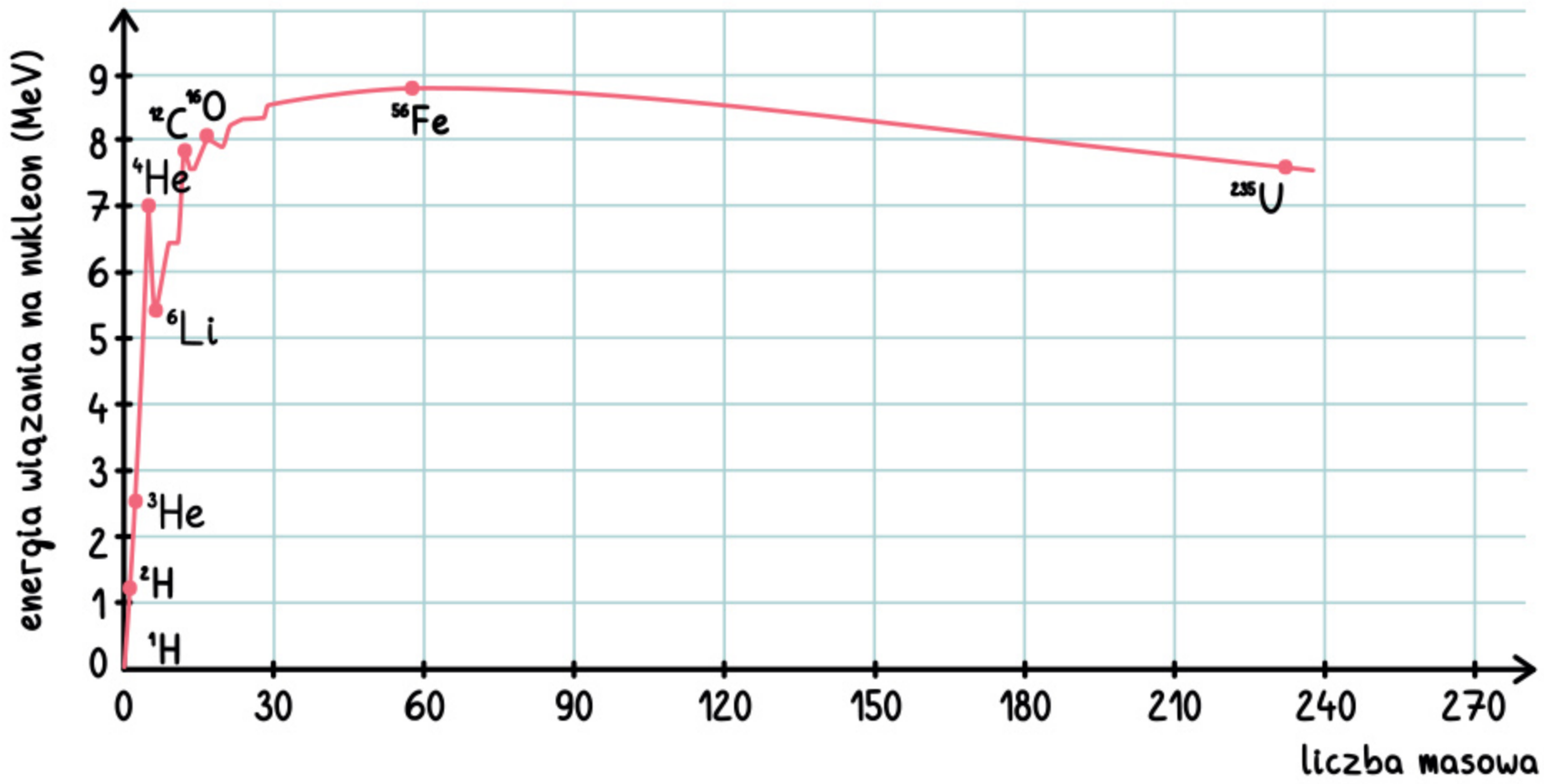
$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$$

elektron




## CZAS POŁOWICZNEGO ROZPADU $T_{\frac{1}{2}}$

to czas, w którym rozpada się połowa jąder izotopu promieniotwórczego w danej próbce.




Masa jądra atomowego jest mniejsza od sumy mas nukleonów swobodnych, które utworzyły to jądro.

Różnica tych mas nazywana jest **DEFICYTEM MASY.**

deficyt masy — energia wiązania

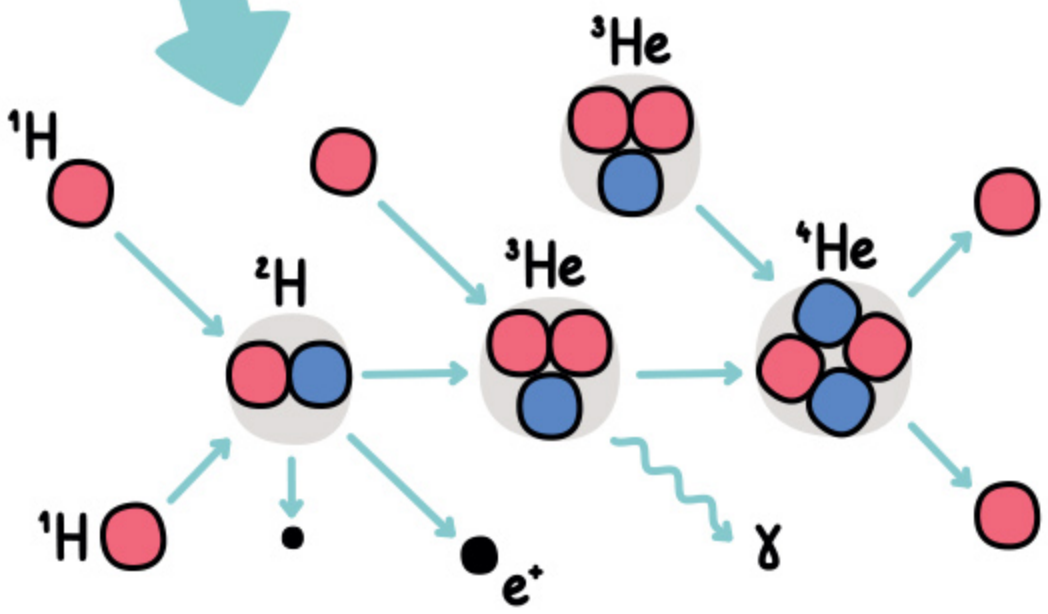
$$\Delta m = \frac{E_w}{c^2}$$

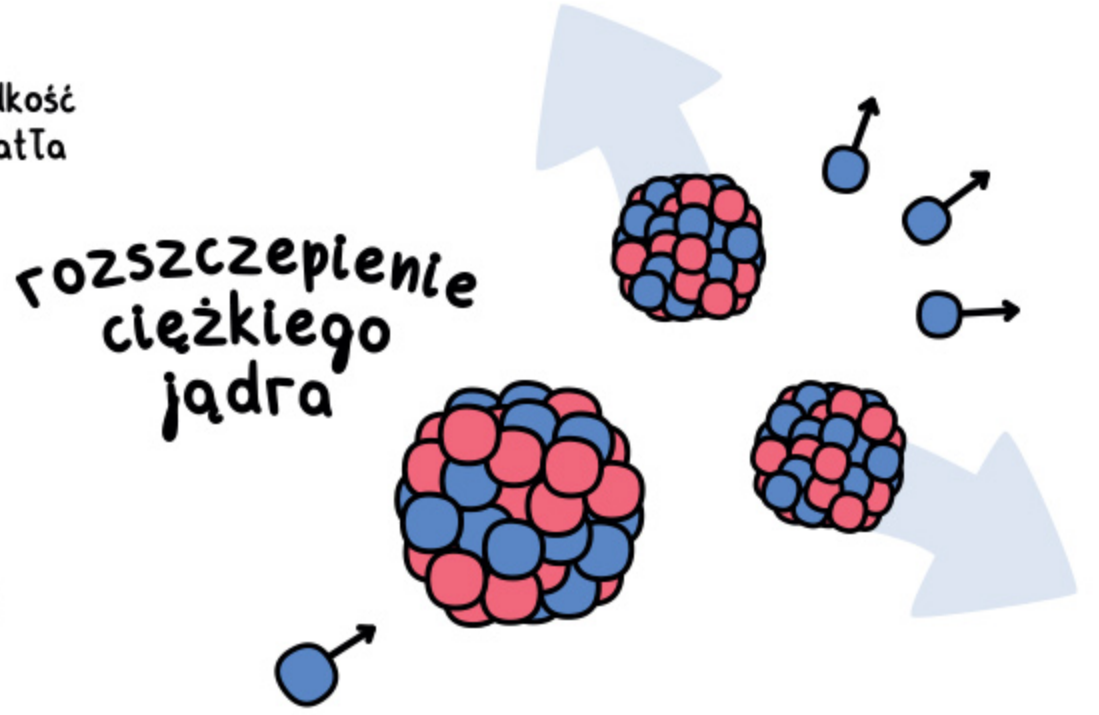
prędkość światła

## ENERGIA WIĄZANIA JĄDRA

to energia potrzebna do rozbicia jądra na poszczególne nukleony.

## SYNTEZA JĄDROWA




przykładowa reakcja rozszczepienia

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{236}_{92}U \longrightarrow ^{101}_{43}Y + ^{132}_{49}In + 3\,^{1}_{0}n$$

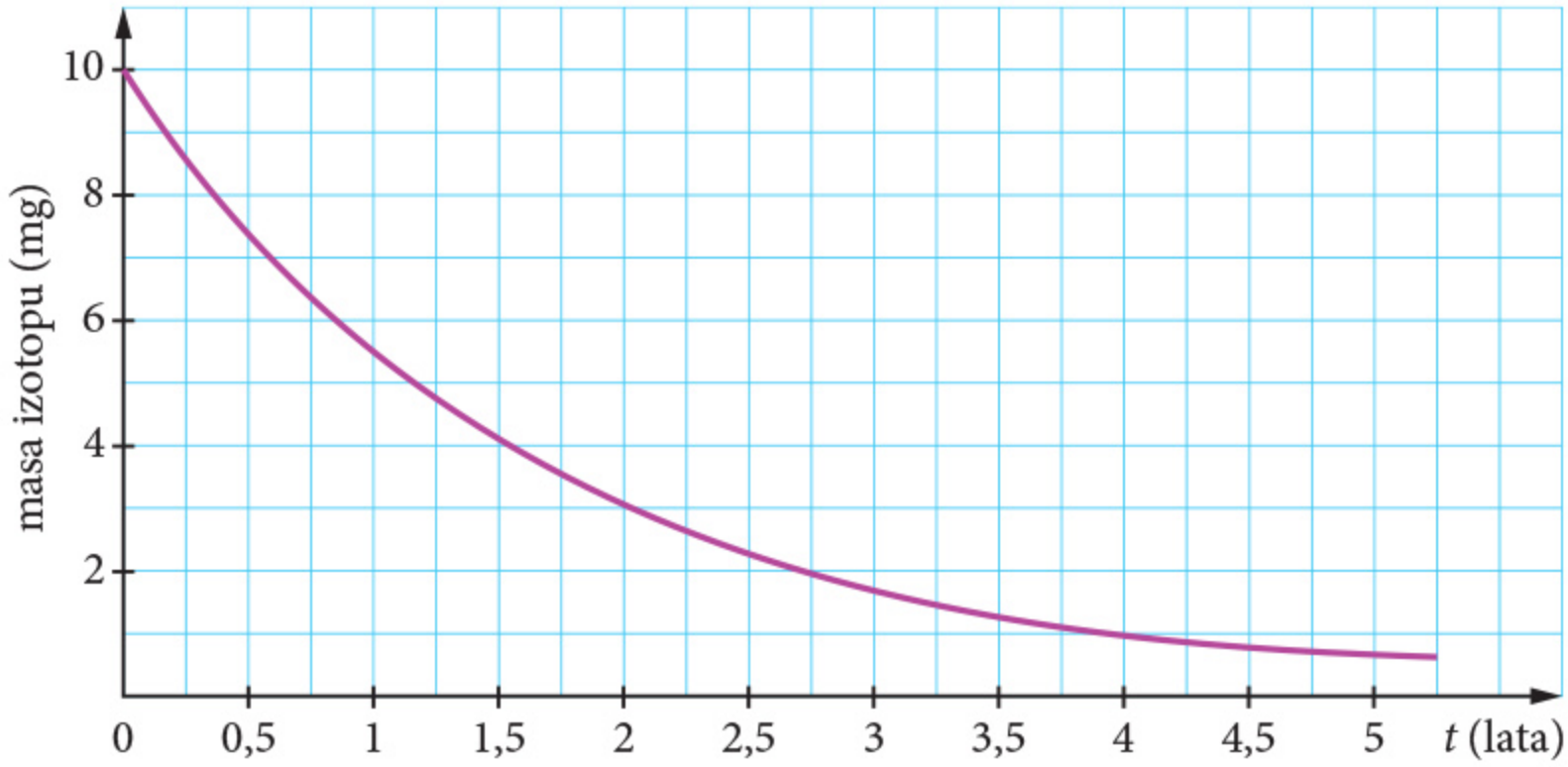
## Ewolucja Słońca

## PYTANIA I ZADANIA

**1.** Skorzystaj z układu okresowego zamieszczonego na końcu podręcznika i podaj:
- **a)** liczbę atomową potasu,
- **b)** liczbę neutronów w poszczególnych izotopach potasu.

**2.** Izotop polonu $^{218}_{84}\text{Po}$ jest $\alpha$-promieniotwórczy. Zapisz przemiany prowadzące do powstania z niego izotopu polonu $^{214}_{84}\text{Po}$.

**3.** Na wykresie przedstawiono zależność masy pewnego izotopu promieniotwórczego od czasu.




Na podstawie wykresu oszacuj:
- **a)** czas połowicznego rozpadu tego izotopu,
- **b)** masę izotopu po 30 miesiącach od początku obserwacji.

**4.** Pewien preparat promieniotwórczy dostał się do wnętrza organizmu. Preparat ten emituje porównywalne liczby cząstek $\alpha$, $\beta$ i $\gamma$.
**Oceń prawdziwość zdań. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe.**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **1.** | Najbardziej niebezpieczne dla organizmu jest w tym przypadku promieniowanie $\gamma$. | **P** | **F** |
| **2.** | Bez względu na dawkę każde promieniowanie jądrowe jest szkodliwe dla organizmu. | **P** | **F** |
| **3.** | Najkrótszy zasięg w tkankach organizmu ma promieniowanie $\alpha$. | **P** | **F** |

**5.** W szczątkach mamuta wydobytych na Syberii zawartość węgla $^{14}\text{C}$ wynosiła ok. 25 % wartości początkowej. Oszacuj, ile lat temu żył ten mamut. Czas połowicznego rozpadu węgla $^{14}\text{C}$ wynosi 5730 lat.

**6. Wybierz poprawne dokończenie zdania.**
Reakcje rozszczepienia jąder atomowych zachodzą
- **A.** po wchłonięciu neutronu przez lekkie jądra.
- **B.** po zderzeniu dwóch lekkich jąder.
- **C.** po wchłonięciu neutronu przez niektóre ciężkie jądra.
- **D.** podczas emisji promieniowania gamma przez ciężkie jądra.

7. W reaktorach jądrowych można w sposób kontrolowany wyzwolić energię zgromadzoną w jądrach pierwiastków ciężkich.
**Oceń prawdziwość zdań. Wybierz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe.**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **1.** | Skład izotopowy uranu stosowanego w reaktorach jądrowych jest taki sam jak uranu znajdującego się w bombach atomowych. | **P** | **F** |
| **2.** | Rolą moderatora w reaktorach jądrowych jest spowolnienie elektronów i protonów emitowanych podczas rozszczepiania jąder. | **P** | **F** |
| **3.** | Pręty kontrolne ograniczają liczbę reakcji rozszczepienia jąder w jednostce czasu. | **P** | **F** |

8. Czy możliwa jest reakcja połączenia jąder stabilnych izotopów berylu i helu tak, aby powstało jądro izotopu $^{14}C$? Wskazówka: skorzystaj z układu okresowego pierwiastków.

9. Pewien uczeń zapisał etapy ewolucji Słońca w sposób następujący:
gwiazda ciągu głównego → biały karzeł → czerwony olbrzym → czarna dziura
Czy taki cykl przemian gwiazdy jest możliwy? Uzasadnij odpowiedź.

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

| | | | |
|---|---|---|---|
| **1.** | Supernowa to wybuch gwiazdy, podczas którego powstają pierwiastki cięższe od żelaza. | **P** | **F** |
| **2.** | Czarna dziura to obiekt, z którego może wydostać się wyłącznie światło o dużych częstotliwościach. | **P** | **F** |
| **3.** | Końcowym etapem życia Słońca będzie gwiazda neutronowa. | **P** | **F** |

## Najważniejsze pojęcia


- biały karzeł [*white dwarf*] 317, 318–319
- choroba popromienna [*radiation sickness*] 269
- czarna dziura [*black hole*] 325
- czasoprzestrzeń [*spacetime*] 196, 327
- czas połowicznego rozpadu [*half-life*] 260–261
- czerwony olbrzym [*red giant*] 317, 318–319
- cykl protonowy [*proton–proton chain reaction*] 308
- datowanie radioizotopowe [*radioisotope dating*] 272
- dawka promieniowania [*radiation dose*] 267
- deficyt masy [*mass deficit*] 287–288
- elektrownia jądrowa [*nuclear power plant*] 300–301

# POWTÓRZENIE DZIAŁU

- energia spoczynkowa [*rest energy*] 285
- energia wiązania [*binding energy*] 281
- energia wiązania na nukleon [*binding energy per nucleon*] 282
- ewolucja gwiazd [*stellar evolution*] 317–319
- gwiazda [*star*] 313
- gwiazda ciągu głównego [*main sequence star*] 317
- gwiazda neutronowa [*neutron star*] 319, 322
- izotop [*isotope*] 248
- liczba atomowa [*atomic number*] 248
- liczba masowa [*mass number*] 248
- masa krytyczna [*critical mass*] 292
- mgławica [*nebula*] 313, 314–315
- moderator [*moderator*] 296
- neutron [*neutron*] 246
- nukleon [*nucleon*] 246
- plazma [*plasma*] 306
- prawo rozpadu promieniotwórczego [*the law of radioactive decay*] 262
- promieniotwórczość [*radioactivity*] 251
- proton [*proton*] 246
- reakcja jądrowa [*nuclear reaction*] 283
- reakcja łańcuchowa [*chain reaction*] 292
- reaktor jądrowy [*nuclear reactor*] 295
- rozpad promieniotwórczy [*radioactive decay*] 251
- rozszczepienie jądra [*nuclear fission*] 290, 295
- siły jądrowe [*nuclear forces*] 247
- supernowa [*supernova*] 322–323
- synteza jądrowa [*nuclear fusion*] 307
- tło promieniowania [*radiation background*] 266
- zasada zachowania liczby nukleonów [*principle of nucleon conservation*] 255

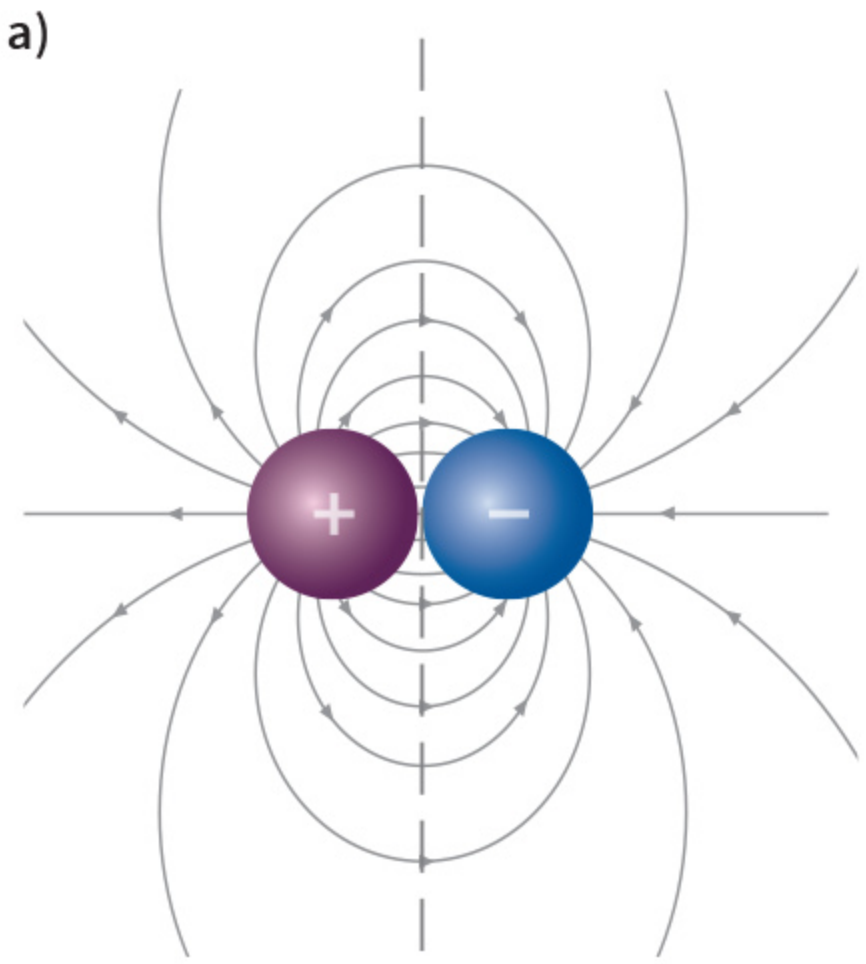
## SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 1. Ładunek elektryczny na balonie

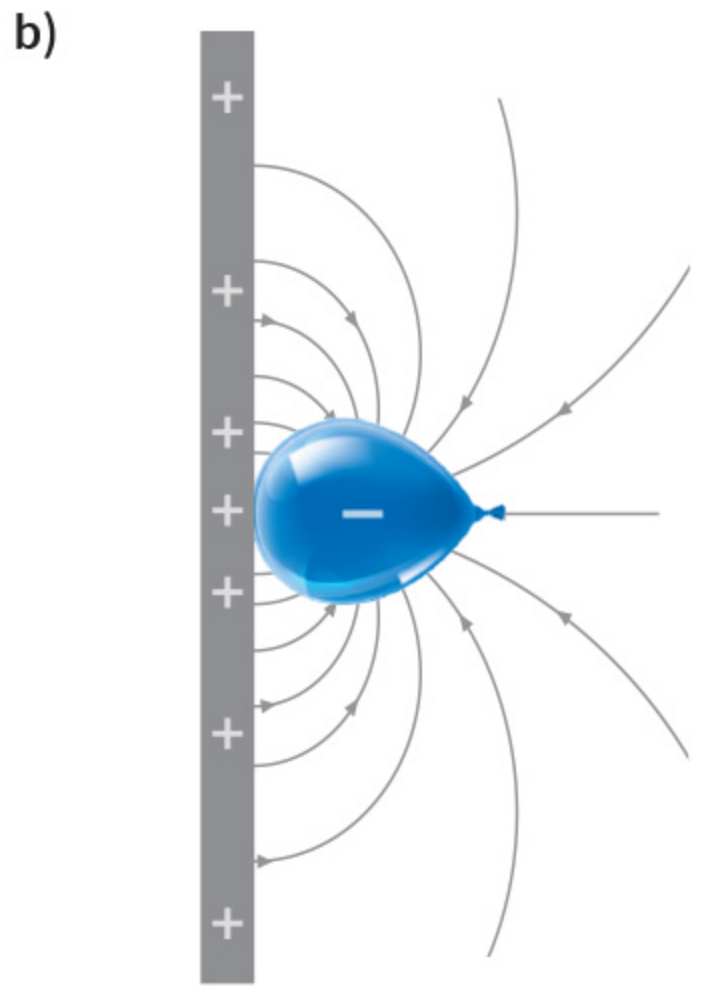
### Problem badawczy

Wyznaczenie wartości ładunku elektrycznego zgromadzonego na potartym balonie

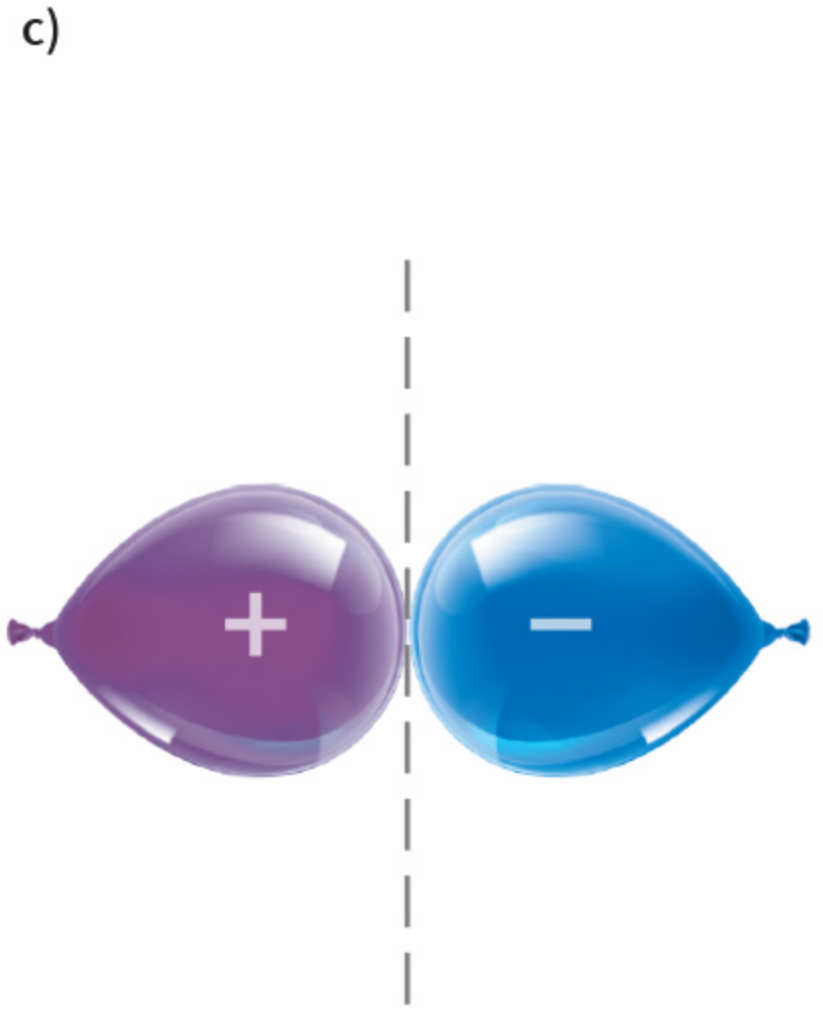
### Wstęp

Ładunki elektryczne oddziałują ze sobą za pośrednictwem pola elektrycznego. Pole elektryczne wytworzone przez dwa przeciwne ładunki przedstawione jest na rysunku a. Takie ładunki przyciągają się siłą, którą można wyznaczyć z prawa Coulomba.




Potarty wełnianą tkaniną balon elektryzuje się ujemnie. Jeśli zbliżyć go do dużej metalowej płyty, będzie przez nią przyciągany, gdyż na jej powierzchni w wyniku indukcji pojawi się ładunek elektryczny przeciwnego znaku. Pole elektryczne wytworzone przez balon i płytę wygląda jak na rysunku b – linie pola biegną tak jak po prawej stronie przerywanej linii na rysunku a. Można stąd wywnioskować, że oddziaływanie balonu i płyty jest takie samo jak oddziaływanie dwóch stykających się balonów naładowanych przeciwnym ładunkiem (ryc. c). Dzięki temu, przy założeniu, że balon naelektryzowany jest równomiernie, siłę oddziaływania między balonem i płytą możemy obliczyć z prawa Coulomba:




$$F_e = k\frac{q^2}{r^2}$$

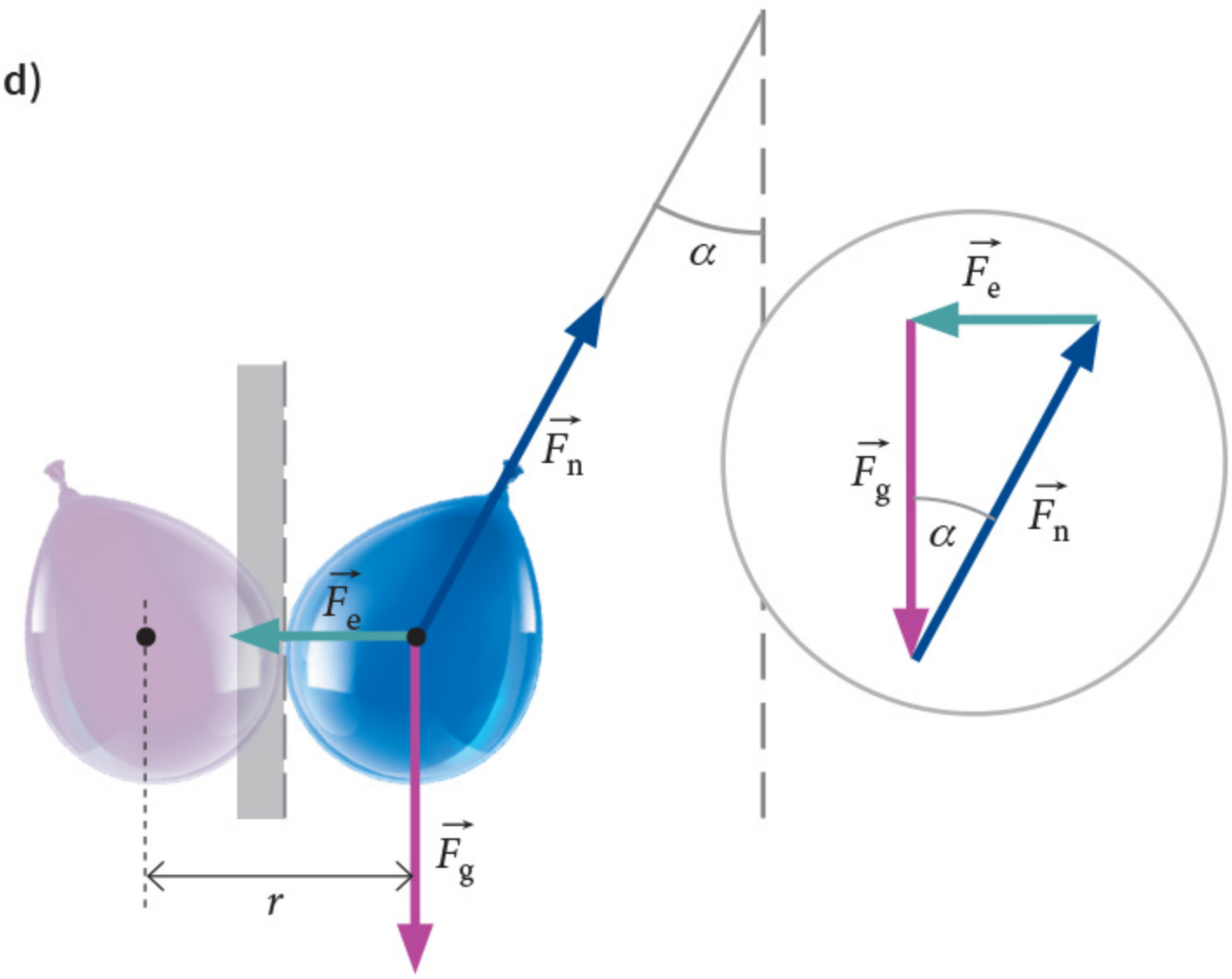
gdzie:

$q$ – ładunek zgromadzony na balonie,

$r$ – odległość między środkami balonu i jego obrazu (czyli średnica balonu).

Naelektryzowany balon zawieszony na nitce w pobliżu pionowej metalowej płyty będzie przez nią przyciągany, wskutek czego nitka nie będzie wisiała pionowo. Gdy balon zetknie się z płytą, będą działały na niego cztery równoważące się siły: elektryczna, ciężkości, naprężenia nitki oraz nacisku. Wraz ze wzrostem kąta, który nitka tworzy z kierunkiem pionowym, maleje siła, jaką płyta naciska na balon. Przy odpowiednio dużym kącie, gdy balon jest na granicy oderwania się od płyty, siła nacisku znika całkowicie, a trzy pozostałe siły się równoważą (ryc. d).

d)




Trójkąt utworzony przez wektory sił w tej sytuacji jest prostokątny. W tym trójkącie:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{F_e}{F_g}$$

gdzie $\alpha$ jest kątem między siłą ciężkości i siłą naprężenia nitki.

Po przekształceniu i podstawieniu odpowiednich wzorów otrzymujemy:

$$F_e = F_g \cdot \operatorname{tg}\alpha$$

$$k\frac{q^2}{r^2} = mg \cdot \operatorname{tg}\alpha$$

stąd ładunek balonu:

$$q = \sqrt{\frac{mgr^2 \operatorname{tg}\alpha}{k}}$$

Kąt $\alpha$ w trójkącie jest taki sam, jak kąt odchylenia nitki od pionu. Jeśli znamy ten kąt oraz masę i średnicę balonu, możemy wyznaczyć ładunek elektryczny tego balonu.

Założenie, że balon jest równomiernie naelektryzowany, jest dużym uproszczeniem realnej sytuacji, dlatego wynik obliczeń jest jedynie oszacowaniem ładunku zgromadzonego na balonie.

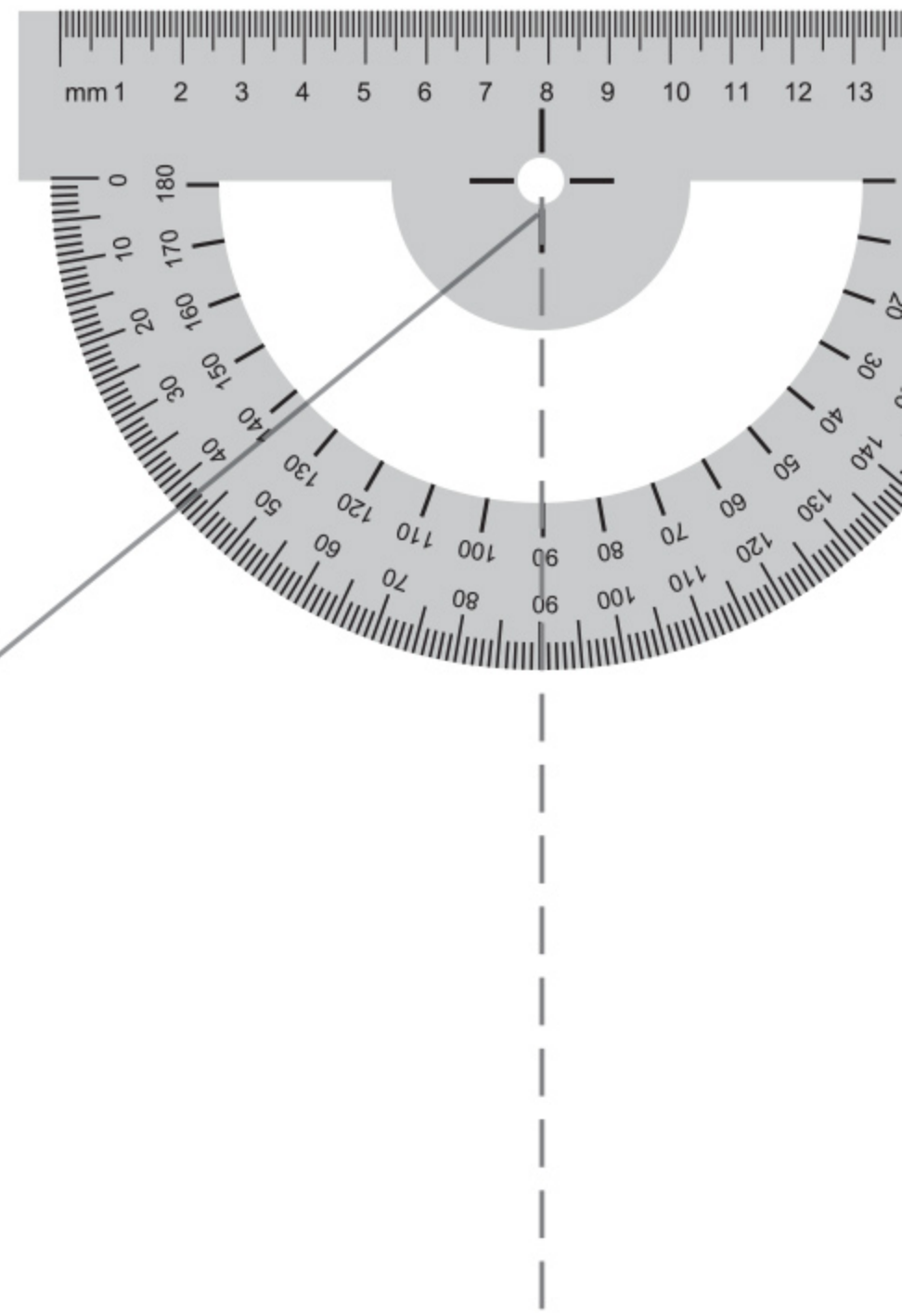
**Przyrządy pomiarowe i materiały do przeprowadzenia doświadczenia**

- balon
- nitka o długości ok. 0,5 m
- tkanina wełniana
- kątomierz
- waga kuchenna

**Przebieg doświadczenia**

1. Wyznacz masę balonu* (możesz zważyć wiele balonów i podzielić wynik przez ich liczbę).
2. Do napompowanego balonu przymocuj nić.
3. Zmierz średnicę balonu ($r$ we wzorach powyżej).
4. Drugi koniec nitki przymocuj do kątomierza tak, aby możliwy był odczyt kąta, który nitka tworzy z pionem (np. jak na rysunku e).
5. Naelektryzuj balon przez potarcie go ze wszystkich stron tkaniną.
6. Zbliż balon z kątomierzem do pionowej metalowej płyty (może to być ścianka lodówki lub pralki). Balon powinien przylgnąć do płyty.
7. Obserwuj wskazania kątomierza i powoli odsuwaj kątomierz od płyty do momentu, aż balon oderwie się od jej powierzchni. Zanotuj maksymalny kąt, jaki tworzyła nitka z pionem.
8. Czynności z punktów 6. i 7. powtórz co najmniej trzy razy.

e)




**Opracowanie wyników doświadczenia**

1. Oblicz ładunek balonu dla każdego pomiaru.
2. Oblicz wartość średnią ładunku ze wszystkich pomiarów.

* Masa balonu może być różna, zwykle jest w granicach od 1 g do 3 g.

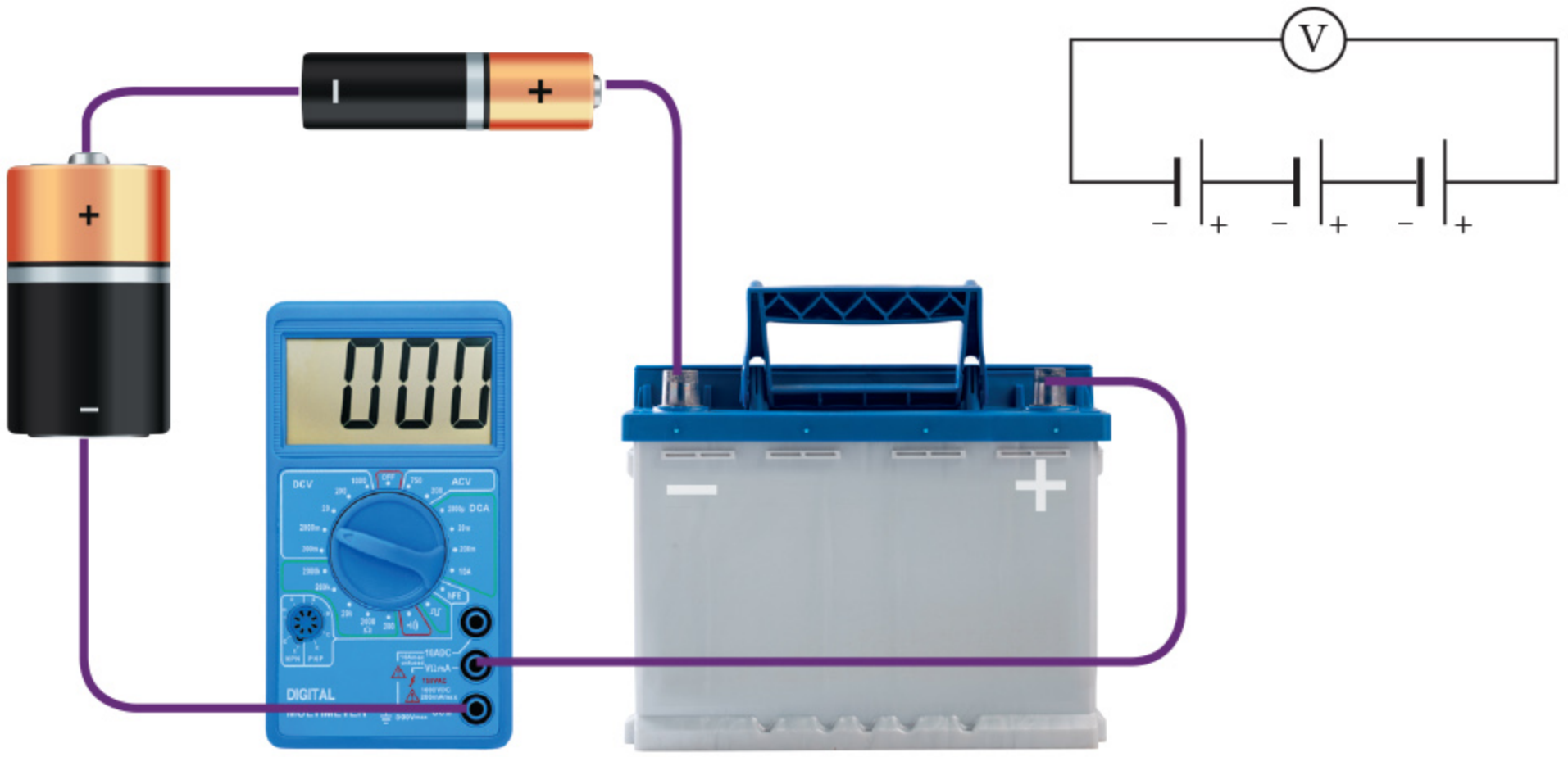
## SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 2. Źródła napięcia połączone szeregowo

### Problem badawczy

Pomiar napięcia na układzie baterii połączonych szeregowo

### Wstęp

Ogniwa galwaniczne mają określone napięcie w zależności od związków chemicznych wykorzystanych do ich budowy. Na przykład ogniwo Leclanchégo (baterie AA) ma napięcie 1,5 V, a akumulator kwasowo-ołowiowy (stosowany powszechnie w samochodach) – napięcie 2 V. Baterie o różnych napięciach uzyskuje się w wyniku szeregowego połączenia kilku ogniw (np. akumulator samochodowy ma napięcie 12 V i jest złożony z 6 ogniw ołowiowych). W praktyce baterie buduje się z jednego typu ogniw. Ważne jest, aby ogniwa tworzące baterię były wpięte w tę samą stronę, czyli zacisk ujemny jednego ogniwa powinien być połączony z zaciskiem dodatnim drugiego (ryc.).




### Hipoteza badawcza

Napięcie na układzie baterii połączonych szeregowo jest równe sumie napięć na poszczególnych bateriach.

### Przyrządy pomiarowe i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- trzy różne baterie
- woltomierz
- przewody i końcówki pozwalające połączyć baterie szeregowo

### Przebieg doświadczenia

1. Zmierz woltomierzem napięcie na każdej baterii, wyniki zapisz w tabeli.
2. Połącz szeregowo dwie baterie i zmierz napięcie na końcach takiego układu.
3. Zmień kolejność baterii i ponownie zmierz napięcie na końcach układu.

4. Powtórz pomiary dla innej pary baterii.
5. Połącz szeregowo trzy baterie, zmierz napięcie na końcach układu.
6. Zmień kolejność baterii, ponownie zmierz napięcie.

**Opracowanie wyników pomiarów**

Uzupełnij tabelę.

| $U_1$ | $U_2$ | $U_3$ | $U_1 + U_2$ | $U_2 + U_3$ | $U_1 + U_2 + U_3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |

**Omówienie wyniku doświadczenia**

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy hipoteza badawcza została potwierdzona?
2. Czy kolejność łączenia baterii ma wpływ na napięcie na końcach układu?

## SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 3. Pierwsze prawo Kirchhoffa

### Problem badawczy

Jakie jest natężenie prądu w przewodach elektrycznych mających wspólny węzeł?

**Uwaga**: Doświadczenie można przeprowadzić pod warunkiem, że ma się dostęp do specjalistycznych przyrządów. Ze względu na możliwość nieumyślnego uszkodzenia sprzętu doświadczenie powinno być wykonywane pod kierunkiem nauczyciela.

### Wstęp

Pierwsze prawo Kirchhoffa dotyczy węzłów sieci elektrycznej, czyli miejsc, w których łączy się ze sobą kilka przewodów. Prawo to wynika bezpośrednio z zasady zachowania ładunku elektrycznego, a jego treść brzmi: suma natężeń prądów wpływających do węzła sieci elektrycznej jest równa sumie natężeń prądów z niego wypływających.

W celu zilustrowania tego prawa należy zbudować rozgałęziony obwód elektryczny i mierzyć jednocześnie natężenie prądu w każdym z przewodów łączących się w danym węźle.

### Hipoteza badawcza

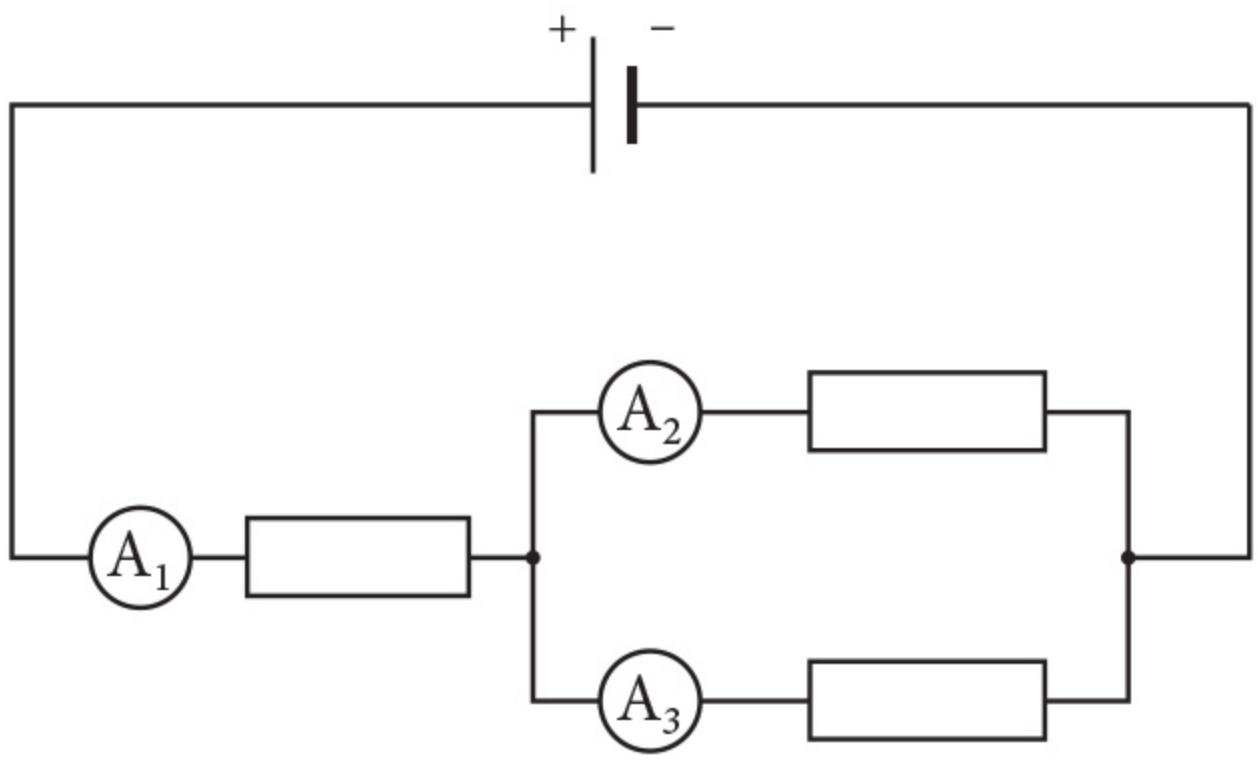
Suma natężeń prądów wpływających do węzła sieci elektrycznej jest równa sumie natężeń prądów wypływających z tego węzła.

### Przyrządy pomiarowe i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- zasilacz laboratoryjny lub bateria
- trzy amperomierze
- trzy oporniki (najlepiej o różnych oporach)
- przewody do połączenia elementów obwodu

### Przebieg doświadczenia

**1.** Zbuduj obwód zgodnie z poniższym schematem.




**Uwaga:** Nie włączamy zasilacza do sieci ani nie podłączamy baterii do obwodu, dopóki obwód nie będzie sprawdzony i zatwierdzony przez nauczyciela!

2. Włącz zasilanie, odczytaj i zanotuj w tabeli wskazania mierników.
3. Wyłącz zasilanie, zamień miejscami dwa oporniki i ponownie włącz zasilanie. Odczytaj i zanotuj wskazania mierników.
4. Powtórz czynności z punktu 3. dla dwóch innych oporników. Zanotuj wyniki pomiarów w tabeli.

| $I_1$ (A) | $I_2$ (A) | $I_3$ (A) |
|---|---|---|
| | | |
| | | |
| | | |

5. Rozmontuj obwód.

**Omówienie wyniku doświadczenia**

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy hipoteza badawcza została potwierdzona? Uwzględnij niepewność pomiarową.
2. Oszacuj minimalną niepewność pomiaru natężenia prądu, przy której wyniki pomiarów są zgodne z I prawem Kirchhoffa.

## SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 4. Wypadkowe pole magnetyczne Ziemi i magnesu

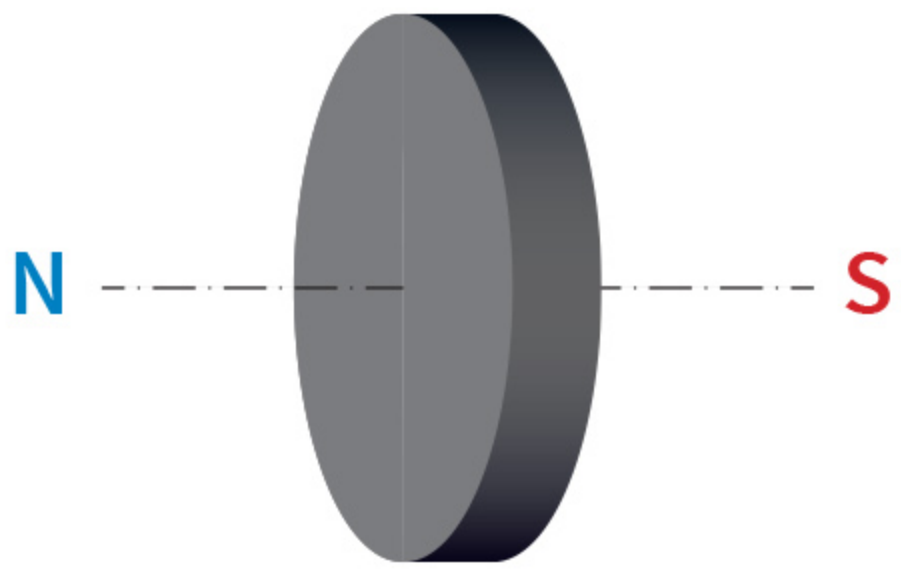
### Problem badawczy

Jak biegną linie pola magnetycznego w pobliżu magnesu?

### Wstęp

Pole magnetyczne przedstawiamy za pomocą linii pola, czyli linii ciągłych z określonym zwrotem, wyznaczonym przez północny biegun igły kompasu (igła magnetyczna w polu magnetycznym ustawia się wzdłuż linii pola). Gdy chcemy poznać przebieg linii pola w danym obszarze, należy dokonać obserwacji w wielu punktach tego obszaru i dopiero na tej podstawie wyznaczyć obraz pola.

Celem ćwiczenia jest narysowanie linii pola magnetycznego w obszarze o promieniu kilkudziesięciu centymetrów wokół magnesu. Do doświadczenia można wykorzystać magnes sztabkowy lub w kształcie pastylki (ryc.), wymontowany ze starego głośnika.

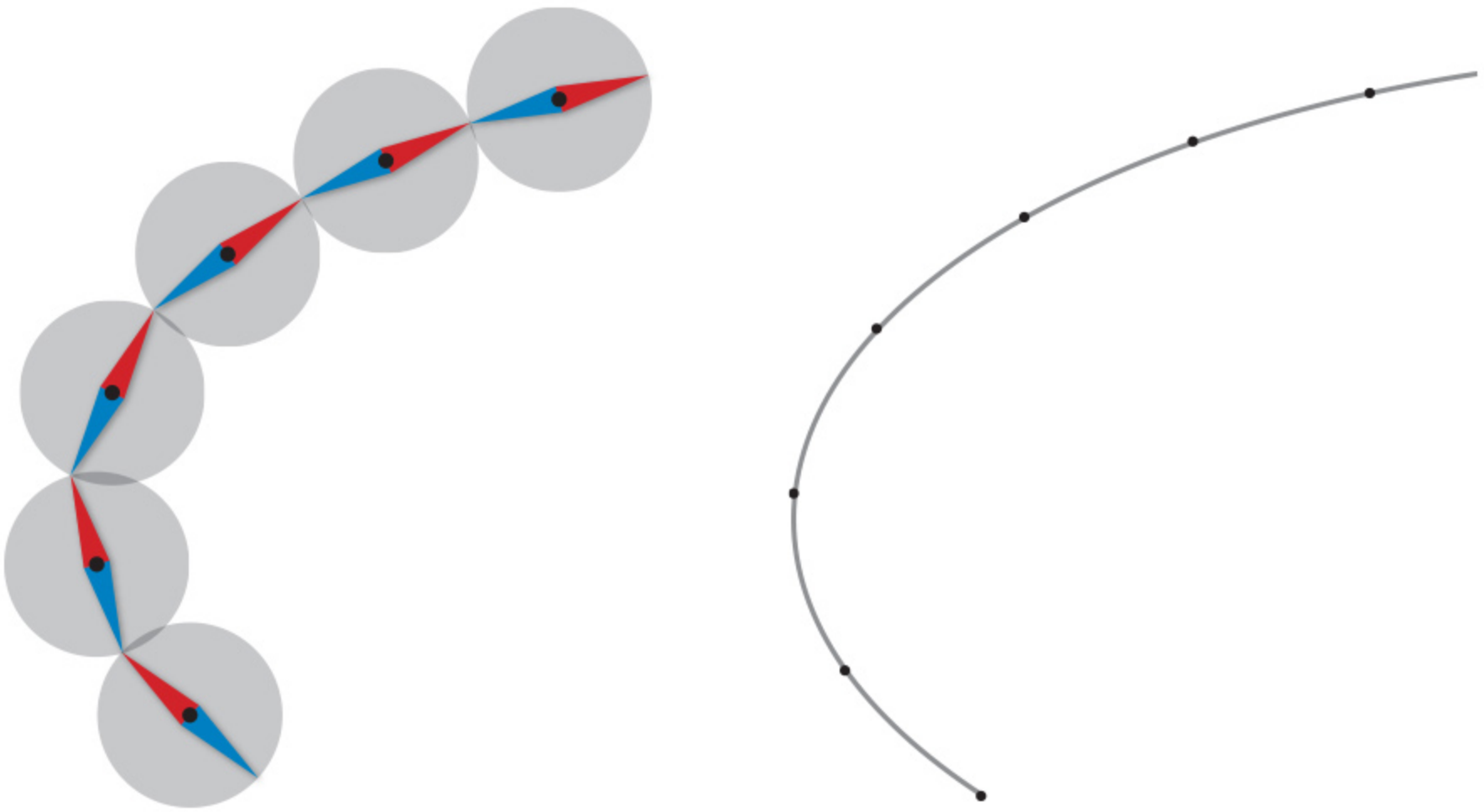



### Przyrządy i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- kompas
- arkusz papieru formatu A1 (np. arkusz papieru pakowego)
- magnes
- ołówek

### Przebieg doświadczenia

1. Umieść magnes na środku arkusza tak, aby jego bieguny leżały na linii wschód–zachód. Nie zmieniaj położenia arkusza i magnesu podczas całego doświadczenia.
2. Umieść kompas przy krawędzi arkusza. Zaznacz na arkuszu punkty, w których znajdują się końce igły kompasu.
3. Przesuń kompas tak, aby jeden z końców igły znalazł się w miejscu poprzednio zajmowanym przez drugi koniec (ryc.).
4. Ponownie zaznacz położenie końców igły i znów przesuń kompas – jak w punkcie 3.



Kolejne położenia kompasu i uzyskana linia pola magnetycznego

5. Gdy dojdziesz z kompasem do magnesu, przez zaznaczone punkty poprowadź gładką linię (bez załamań). W ten sposób wyznaczysz jedną z linii pola magnetycznego.
6. Ustal i zaznacz zwrot uzyskanej linii.
7. Ustaw kompas w innym miejscu arkusza (ale przy jego krawędzi) i wyznacz kolejną linię pola (powtórz punkty od 2. do 6.).
8. Wyznacz tyle linii pola magnetycznego, aby w każdym miejscu arkusza można było bez wątpliwości ustalić ustawienie igły kompasu.

**Omówienie wyniku doświadczenia**

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Jaki jest przebieg linii pola magnetycznego w tym doświadczeniu?
2. W jakiej odległości od magnesu jego wpływ na wskazania kompasu staje się nieistotny?
3. Czy w badanym obszarze są miejsca, w których znoszą się pola magnetyczne Ziemi i magnesu? Uzasadnij odpowiedź.

## SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 5. Dioda

### Problem badawczy

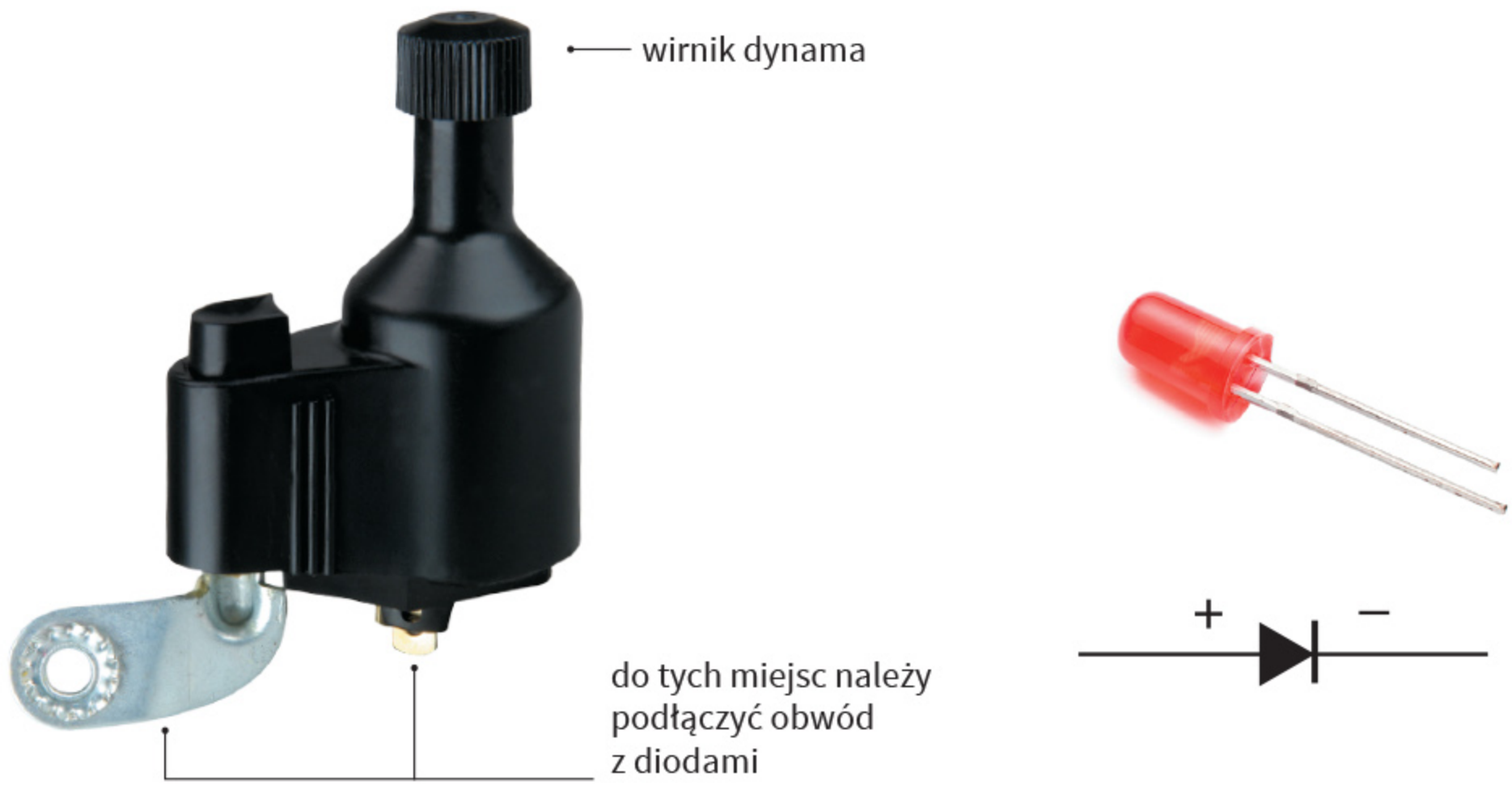
Sprawdzenie działania diody półprzewodnikowej jako elementu składowego prostowników oraz jako źródła światła

### Wstęp

Najczęściej używane prądnice są źródłem napięcia przemiennego. Jednak wiele urządzeń, zwłaszcza tych zawierających układy elektroniczne, wymaga zasilania napięciem stałym. Do zamiany napięcia przemiennego na stałe wykorzystuje się prostowniki. Podstawowym elementem prostownika jest dioda, która przepuszcza prąd tylko w jedną stronę. W zależności od tego, która elektroda diody ma wyższy potencjał, ma ona albo bardzo mały opór elektryczny (czyli jest włączona w kierunku przewodzenia), albo bardzo duży, co praktycznie uniemożliwia przepływ prądu (jest włączona w kierunku zaporowym). Dzięki temu w obwodzie z diodą, zasilanym napięciem przemiennym, prąd płynie tylko w tych momentach, gdy kierunek pola elektrycznego jest zgodny z kierunkiem przewodzenia diody. W przeciwną stronę prąd nie płynie.

W obwodzie z diodą nie płynie jednak prąd stały. Prąd płynie tylko w jednym kierunku, ale jego natężenie się zmienia. Jeżeli elementem prostującym jest dioda świecąca, jej świecenie jest wskaźnikiem przepływu prądu. Diody świecące najczęściej mają nierówne końcówki. Prąd przez diodę płynie wtedy, gdy jej dłuższa „nóżka” ma wyższy potencjał (jest podłączona do „+”).

Celem ćwiczenia jest określenie kierunku przepływu prądu w obwodzie z diodami, gdy źródłem napięcia jest prądnica rowerowa (dynamo).



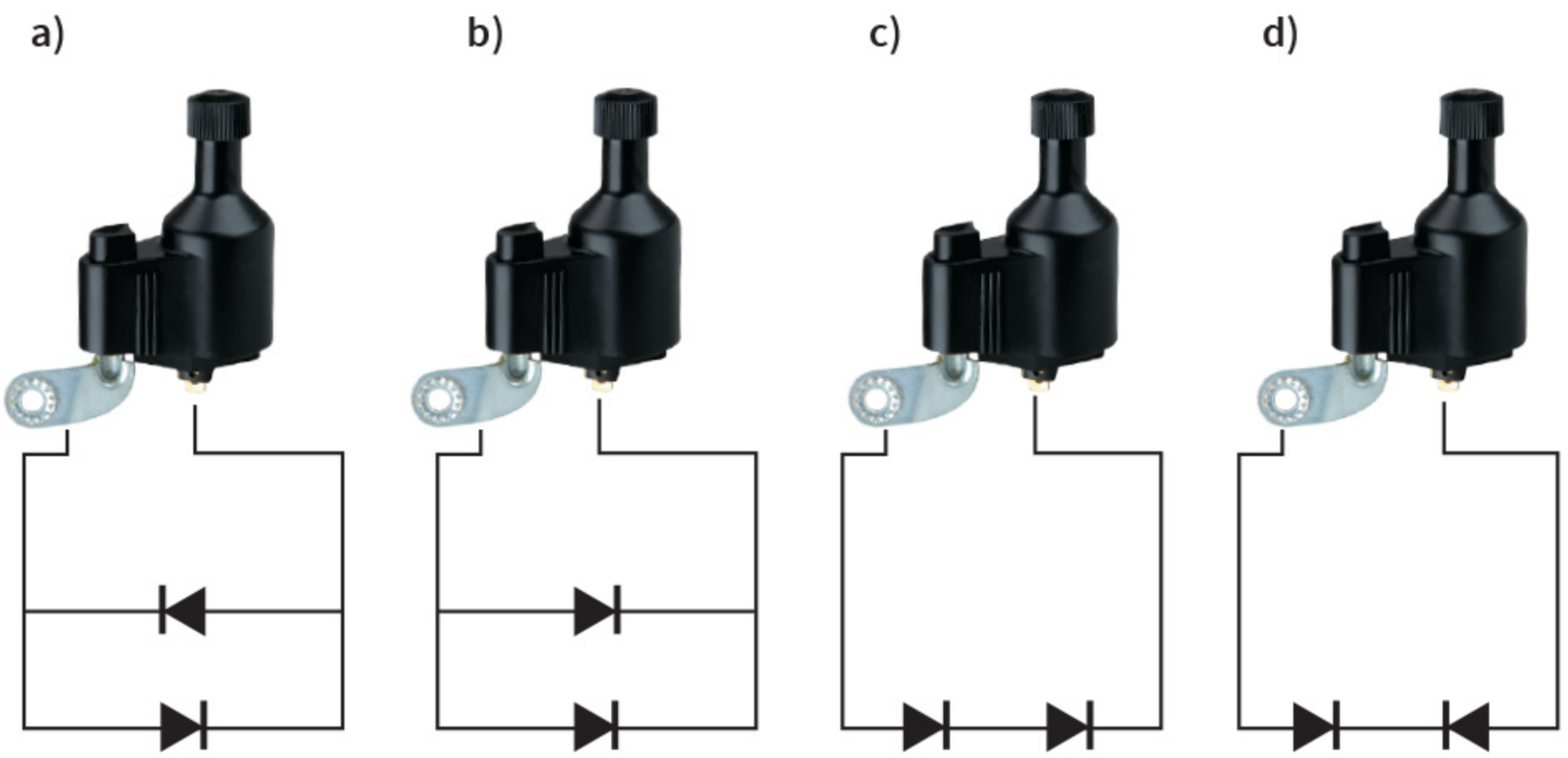

Dynamo rowerowe i dioda świecąca

**Przyrządy i materiały do przeprowadzenia doświadczenia**

- prądnica rowerowa (dynamo)
- dwie diody świecące
- miedziany drut o średnicy 1–2 mm i długości ok. 10 cm
- przewody umożliwiające połączenie elementów ze sobą

**Przebieg doświadczenia**

1. Owiń i zaciśnij drut wokół wirnika dynama. Końcówkę drutu uformuj w niedużą korbkę, umożliwiającą precyzyjne i równe kręcenie wirnikiem.
2. Połącz dwie diody równolegle, z kierunkiem przewodzenia w przeciwną stronę, i podłącz do prądnicy (ryc. a). Zaobserwuj, jak świecą diody w czasie kręcenia wirnikiem prądnicy. Jak zmienia się ich świecenie, gdy zmienia się częstotliwość obrotów wirnika?




3. Podłącz dwie diody równolegle, z takim samym kierunkiem przewodzenia, i podłącz do prądnicy (ryc. b). Zaobserwuj świecenie diod, porównaj je ze świeceniem przy wcześniejszym połączeniu.
4. Połącz diody szeregowo (jedna za drugą), z kierunkiem przewodzenia w tę samą stronę (ryc. c). Zaobserwuj ich świecenie.
5. Połącz diody szeregowo, z kierunkiem przewodzenia w przeciwną stronę (ryc. d). Pokręć prądnicą i zwróć uwagę na efekt.

**Omówienie wyniku doświadczenia**

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy istnieje korelacja między częstotliwością wirowania wirnika a świeceniem diod? Jeżeli tak, to jaka?
2. Opisz i wyjaśnij różnice w świeceniu diod w każdym z obwodów.

## SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 6. Widma

### Problem badawczy

Jakie są różnice w widmach ogólnie dostępnych źródeł światła?

### Wstęp

W naszym otoczeniu mamy wiele różnych źródeł światła. W źródłach termicznych świecącym elementem może być drucik wolframowy rozgrzany do bardzo wysokiej temperatury – tak świecą tradycyjne żarówki i żarówki halogenowe. W innych źródłach światło emituje np. luminofor, czyli substancja pobudzana do świecenia innym promieniowaniem, np. światłem niebieskim lub nadfioletem – tak świecą lampy LED i świetlówki. Dla naszych oczu światło pochodzące z różnych źródeł może wyglądać podobnie. Różnicę zobaczymy dopiero wtedy, gdy rozłożymy to światło na poszczególne barwy, czyli uzyskamy widmo światła.

Do obserwacji widm służy spektroskop.

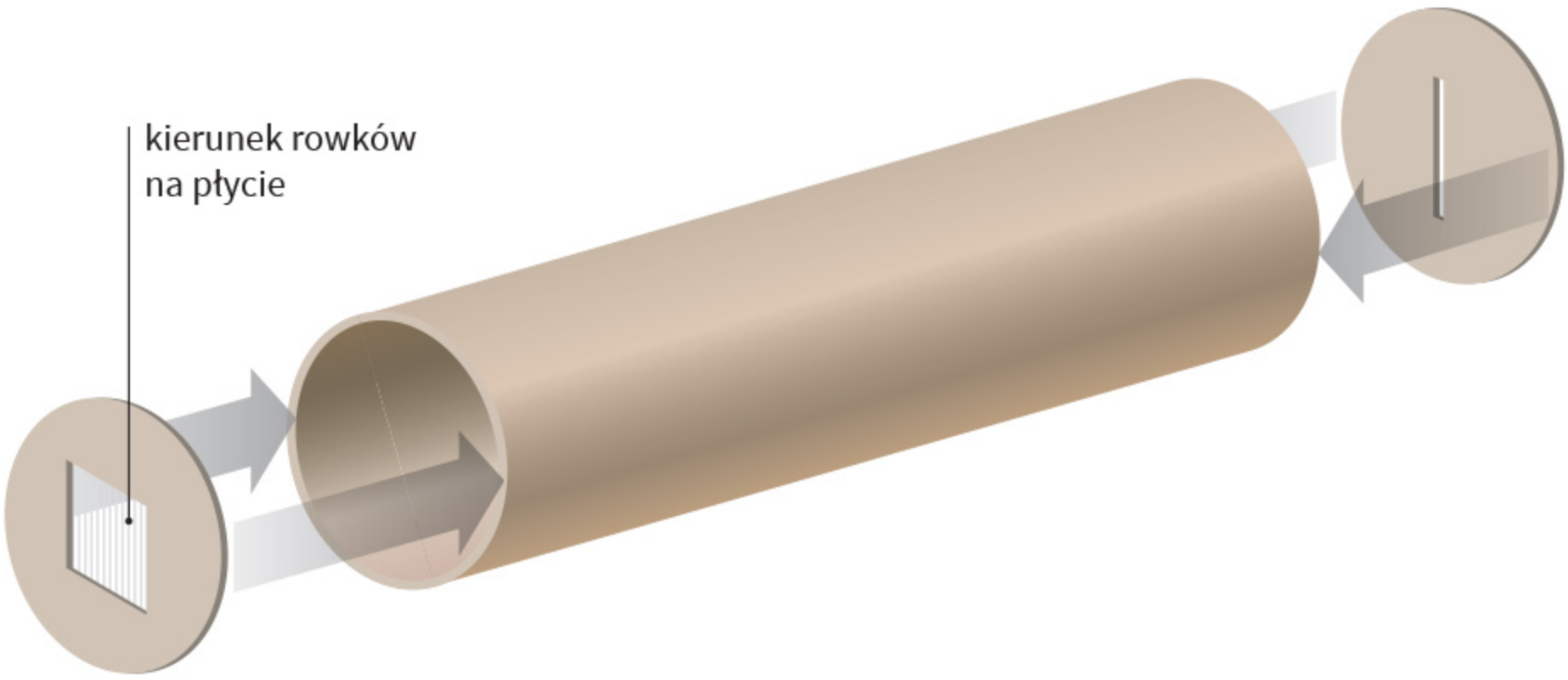
### Materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- płyta CD (może być nagrana)
- rurka o długości ok. 30 cm (np. po ręcznikach papierowych)
- taśma klejąca
- gładki, sztywny papier
- nożyczki, nożyk do papieru
- różne źródła światła: żarówka halogenowa (lub zwykła), żarówka LED, świetlówka, laser, świeczka

### Budowa spektroskopu

Najważniejszą częścią spektroskopu jest element rozszczepiający światło na poszczególne barwy. Do tego celu można wykorzystać płytę CD.

1. Z kartonu wytnij dwa koła o średnicy rurki. W jednym kole zrób szczelinę o szerokości ok. 0,5 mm, a w drugim – kwadratowe okienko, przez które będziesz patrzeć.
2. Fragment płyty należy oczyścić, tak aby był przezroczysty. Można to zrobić poprzez naklejenie na zadrukowaną część płyty mocnej taśmy klejącej i energiczne zerwanie taśmy.
3. Z oczyszczonej części płyty wytnij fragment nieco większy niż okienko w kartonowym kole. Na boku wyciętego fragmentu warto zaznaczyć kreską kierunek przebiegu rowków. Nie widzimy ich, ale wiemy, że tłoczone są koncentrycznie wokół środka płyty.
4. Do koła z okienkiem przyklej fragment płyty, który ma utworzyć swego rodzaju szybkę.
5. Zamocuj przygotowane koła do końców rurki w taki sposób, aby kierunek rowków na płycie zgadzał się z kierunkiem szczeliny po drugiej stronie rurki (ryc.).
6. Spektroskop jest gotowy. Jego szczelinę skieruj na źródło światła (tylko nie bezpośrednio na laser!) i patrz od strony końca z fragmentem płyty. Pośrodku pola widzenia będzie widać szczelinę, a po obu jej stronach w pewnej odległości widoczne będzie widmo światła.




**Przebieg doświadczenia**

Za pomocą spektroskopu uzyskaj widma światła pochodzącego z różnych źródeł, takich jak:

- żarówka halogenowa (lub zwykła)
- Słońce (wystarczy światło padające z okna, nie wolno kierować spektroskopu prosto w Słońce!)
- lampa LED
- świetlówka
- ekran telewizora
- laser (patrzymy na plamkę światła laserowego na kartce)
- płomień świeczki
- płomień świeczki po wsypaniu do niej kryształków soli kuchennej.

**Opracowanie wyników doświadczenia**

Udokumentuj swoje obserwacje. W tym celu możesz zrobić rysunki lub zdjęcia obserwowanych widm.

**Omówienie wyników doświadczenia**

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Które obserwowane źródła światła były źródłami termicznymi? Czy mają one widmo ciągłe?
2. Czy udało się zaobserwować widmo ciągłe dla pozostałych źródeł światła? Czy ich widmo było takie samo jak źródeł termicznych?
3. Które z obserwowanych źródeł światła ma widmo liniowe?

## NIEZBĘDNIK 1. Ciąg geometryczny.

Często mamy do czynienia z sekwencją liczb opisujących określone wielkości. Na przykład:

- średnia roczna temperatura na Ziemi w ciągu ostatniego stulecia,
- codzienny kurs euro na przestrzeni ostatniego miesiąca,
- temperatura powietrza co sto metrów wysokości.

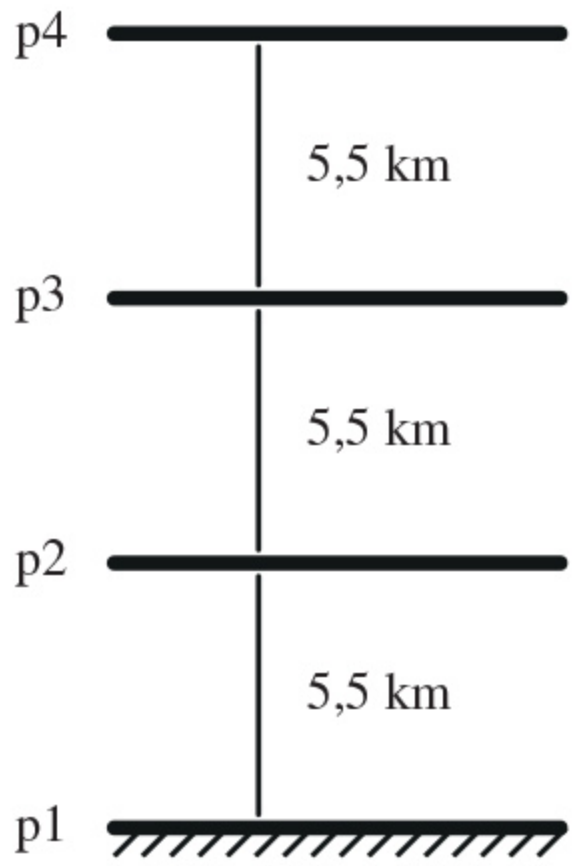
W tych przypadkach ważny jest nie tylko zbiór wartości, ale także ich kolejność.
Taki uporządkowany zbiór liczb nasi nazwę **ciągu liczbowego**, a każda pojedyncza liczba nazywa się **wyrazem ciągu**. W ciągu liczbowym wiadomo, która liczba jest pierwsza, która druga, a która np. dwusetna. Mówi się o pierwszym, drugim, dwusetnym wyrazie ciągu.
Poszczególne wyrazy ciągu zapisuje się z użyciem indeksów: $a_1$, $a_2$, $a_{200}$.
Matematycy definiują ciąg liczbowy jako funkcję, której dziedziną są liczby naturalne dodatnie. Każdej liczbie naturalnej, które to liczby, jak wiadomo, mają ustaloną kolejność, przyporządkowana jest jakaś liczba rzeczywista.
Szczególnym rodzajem ciągu liczbowego jest **ciąg geometryczny**. W tego rodzaju ciągu każdy następny wyraz $(a_{n+1})$ jest równy iloczynowi poprzedniego $(a_n)$ i pewnej stałej wartości nazywanej **ilorazem ciągu** $(q)$.

$$a_{n+1} = a_n q$$

Gdy pierwszy wyraz ciągu jest dodatni, to dla $q > 1$ każdy następny wyraz ciągu jest większy od poprzedniego – mówimy, że ciąg jest rosnący; natomiast gdy $0 < q < 1$, kolejne wyrazy ciągu są coraz mniejsze – mamy ciąg malejący.
Okazuje się, że wiele zależności w przyrodzie ma charakter ciągu geometrycznego. To znaczy, że wartości mierzone w stałych odstępach (np. czasu lub odległości) tworzą ciąg geometryczny. Tak jest np. w przypadku stygnięcia herbaty. Różnica temperatury herbaty i otoczenia mierzona np. co 5 minut tworzy kolejne wyrazy malejącego ciągu geometrycznego. Podobnie jest z grubością piany, jaka powstaje po nalaniu gazowanego napoju do szklanki.
W celu łatwiejszego szacowania wartości używa się pojęcia **połowicznego zaniku**. Jest to czas (lub odległość), po którego upływie dana wielkość maleje dwukrotnie. Wtedy kolejne wartości tworzą ciąg geometryczny o ilorazie $\frac{1}{2}$. Na przykład stężenie substancji leczniczej w osoczu krwi jednego z popularnych antybiotyków ma czas połowicznego zaniku około półtorej godziny.
Podobnie ciśnienie atmosferyczne maleje dwukrotnie wraz ze wzrostem wysokości o około 5,5 km. To znaczy, że na wysokości 16,5 km wynosi zaledwie $\frac{1}{8}$ tego co przy powierzchni Ziemi. Jak to obliczamy?
Gdy znamy pierwszy wyraz ciągu $a_1$, to wyraz o numerze $n$ obliczymy:

$$a_n = a_1 q^{n-1}$$

Idąc zatem w wyobraźni na wysokość 16,5 km, trzykrotnie pokonujemy odległość 5,5 km.



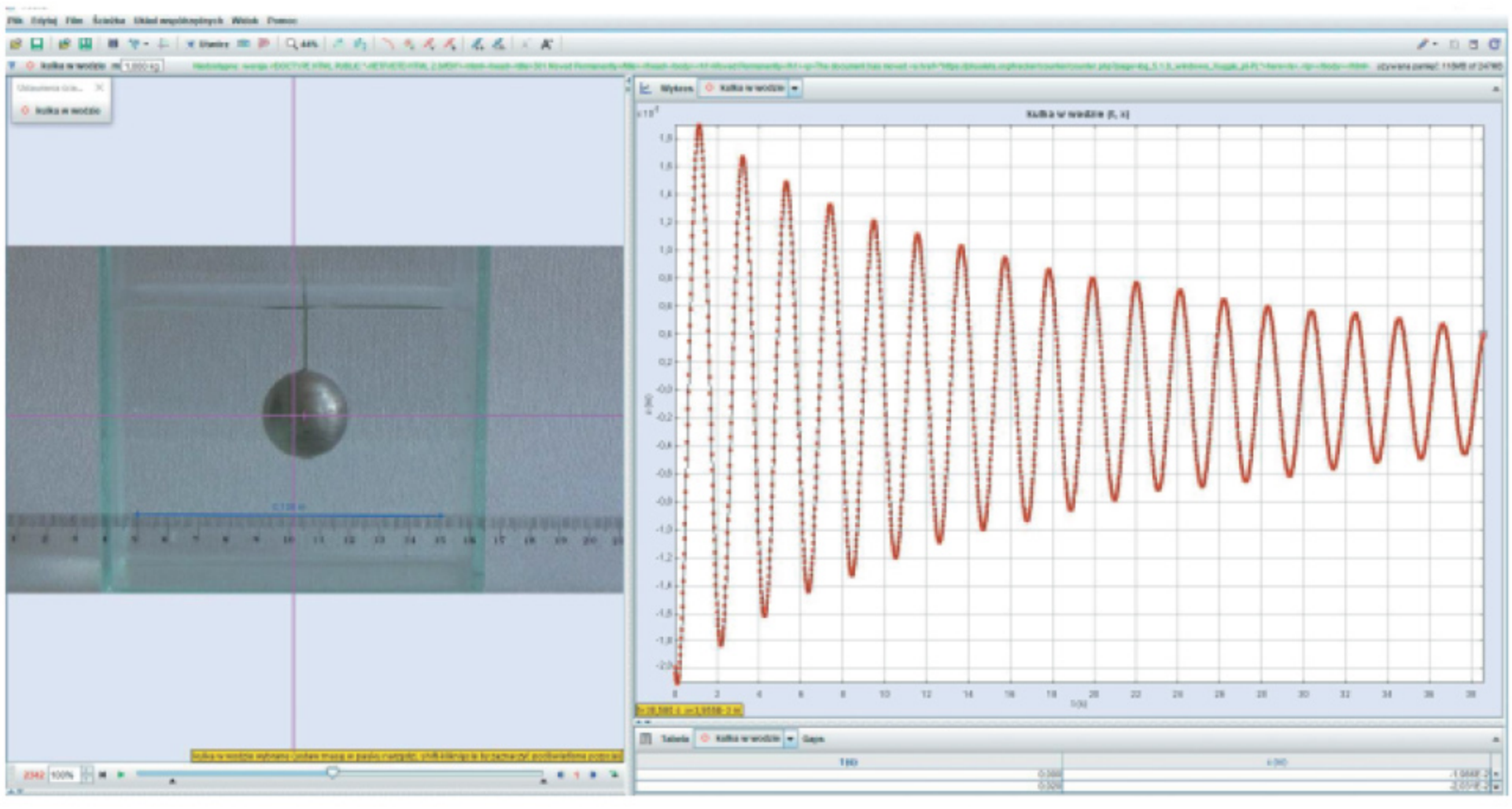

Ciśnienie na tej wysokości jest czwartym wyrazem ciągu geometrycznego, więc

$$p_4 = p_1 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{8}p_1$$

Przeanalizujmy nieco dokładniej dwa przykłady zjawisk, w których znajdujemy ciąg geometryczny.

**Przykład 1. Drgania tłumione.**

Okazuje się, że gdy ciało wykonuje drgania tłumione, kolejne amplitudy po upływie jednego okresu tworzą ciąg geometryczny. Wykres poniżej przedstawia zależność położenia od czasu dla kulki zanurzonej w wodzie wykonującej takie drgania.



Odczytujemy z wykresu kolejne amplitudy:

| $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ | $A_6$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1,85 cm | 1,67 cm | 1,50 cm | 1,35 cm | 1,21 cm | 1,10 cm |

Maksymalne wychylenia kulki po upływie jednego okresu są kolejnymi wyrazami ciągu geometrycznego o ilorazie w przybliżeniu $q = 0{,}9$.
Dowolną kolejną amplitudę *An* można więc obliczyć:

$$A_n = A_1 \cdot q^{n-1}$$

Ale uwaga – amplituda $A_n$ będzie po upływie $n - 1$ okresów (patrz przykład z ciśnieniem atmosferycznym).
Kiedy drgania ustaną? Teoretycznie nigdy, gdyż *An* nigdy nie będzie równe 0. Wiemy jednak, że w fizyce nie ma absolutnej dokładności.
Spróbujmy oszacować czas, po którym kulka praktycznie się zatrzyma. Możemy przyjąć, że kulka jest w spoczynku, gdy drgania nie są możliwe do zaobserwowania gołym okiem, a tak będzie, gdy końcowa amplituda wyniesie około 0,01 cm.
Po przekształceniu uzyskujemy:

$$q^{n-1} = \frac{A_n}{A_1} = 0{,}0054$$

Teraz za pomocą kalkulatora naukowego (jest w prawie każdym smartfonie) możemy sprawdzić, że nasz wykładnik $(n - 1)$ w przybliżeniu wynosi 50. Wprowadzamy liczbę 0,9, naciskamy klawisz dowolnej potęgi „$x^y$”, wprowadzamy liczbę 50 i znak „=”. Uzyskany wynik to 0,0051, czyli bardzo bliski naszej wartości.
Z naszych obliczeń wynika, że po około 50 okresach, drgania kulki nie będą widoczne (pamiętamy, że liczba okresów jest o 1 mniejsza od numeru wyrazu ciągu). Okres drgań kulki wynosi około 2 s, czyli drgania ustaną po niecałych dwóch minutach.

**Przykład 2. Pochłanianie promieniowania rentgenowskiego.**
Promieniowanie rentgenowskie jest szczególnie silnie pochłaniane przez pierwiastki o dużej liczbie atomowej. Jednym z nich jest ołów. Natężenie promieniowania rentgenowskiego maleje dwukrotnie po przejściu przez warstwę ołowiu o grubości 0,05 mm (dystans połowicznego zaniku).
W celu wykonania tradycyjnego zdjęcia rentgenowskiego stosuje się promieniowanie o natężeniu 100 $W/m^2$. Zwykle naświetla się tylko fragment ciała, resztę osłania się specjalnymi fartuchami zawierającymi włókna ołowiane.
Oszacujmy, jaka grubość ołowiu jest wystarczająca, aby osłabić wiązkę promieniowania tysiąckrotnie.

Wartości natężenia promieniowania po przejściu kolejnych warstw o grubości 0,05 mm w ołowiu tworzą ciąg geometryczny o ilorazie $\frac{1}{2}$. Obliczymy, który wyraz ciągu ma wartość mniejszą od 0,1 W/m$^2$ (1/1000 ze 100). Pierwszy wyraz to natężenie padającego promieniowania:

$$I_1 = 100\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$$

Ze wzoru na $n$ wyraz ciągu: $I_n = I_1 q^{n-1}$
Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$0{,}1\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} = 100\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1}$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{n-1} = \frac{1}{1000}$$

$$2^{n-1} = 1000$$

$$n - 1 \approx 10$$

$$10 \cdot 0{,}05 = 0{,}5$$

Pamiętamy, że liczba warstw jest o 1 mniejsza od numeru wyrazu ciągu, zatem aby osłabić tysiąckrotnie promieniowanie rentgenowskie, potrzeba warstwy ołowianej o grubości 0,5 mm.

## NIEZBĘDNIK 2. Rząd wielkości fizycznych.

s. 8
s. 46
s. 55
s. 76
s. 247

### 1. Notacja wykładnicza

Wielkości fizyczne opisują własności ciał, które możemy mierzyć, czyli określać ilościowo. W przyjętym układzie jednostek wartości wielkości fizycznych bywają bardzo duże lub też bardzo małe. Na przykład prędkość światła w próżni to około $300\ 000\ 000\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Natomiast atomy wodoru emitują światło czerwone o długości 0,000000656 m (gdy elektron przechodzi z poziomu trzeciego na drugi). Aby uniknąć pisania wielu zer, stosuje się notację wykładniczą, w której powyższe wartości zapiszemy:

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

$$0{,}000000656 = 6{,}56 \cdot 10^{-7}\ \text{m}.$$

Prawidłowy zapis notacji wykładniczej wymaga, aby liczba stojąca przed potęgą dziesiątki była z przedziału $\langle 1, 10)$. Gdy z obliczeń wychodzi inna liczba, zmieniamy odpowiednio wykładnik potęgi, aby zapis był właściwy.
Na przykład obliczmy częstotliwość fali światła czerwonego. Skorzystamy ze wzoru:

$$\lambda f = c$$

gdzie $c$ jest prędkością światła, $\lambda$ długością fali, a $f$ częstotliwością fali.
Po przekształceniu wzoru i podstawieniu danych otrzymujemy:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{6{,}56 \cdot 10^{-7}\ \text{m}} = 0{,}457 \cdot 10^{15}\ \frac{1}{\text{s}}$$

Właściwie zapisany wynik w notacji wykładniczej ma postać:

$$f = 4{,}57 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}$$

Jednostką częstotliwości jest $1\ \text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$.
Notację wykładniczą stosuje się często w kalkulatorach i komputerach. Wynik naszych obliczeń kalkulator może wyświetlić w postaci:

4,57317 E+14

Natomiast gdy wprowadzimy wartość długości fali światła, na wyświetlaczu pojawia się:

6,56 E–7

### 2. Rząd wielkości fizycznej

Rzędem wielkości fizycznej jest najbliższa jej wartości potęga liczby 10.

Powiemy zatem, że prędkość światła jest rzędu $10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (czytamy: prędkość światła jest rzędu dziesięć do ósmej metra na sekundę). W przypadku długości fali światła czerwonego przybliżeniem liczby $6{,}56 \cdot 10^{-7}$ jest liczba $10 \cdot 10^{-7}$. Zatem długość tej fali jest rzędu $10^{-6}$ m.

Okazuje się, że w celu określenia rzędu wielkości trzeba zaokrąglać w górę do pełnej dziesiątki liczby większe od 3,16. Liczby mniejsze od tej wartości zaokrąglamy do 1.
Robimy tak dlatego, że liczba 3,16 jest tyle razy większa od 1, ile razy jest mniejsza od 10 ($\frac{3,16}{1} \approx \frac{10}{3,16}$). Na przykład liczba 4 jest 2,5 razy mniejsza od 10, ale 4 razy większa od 1.
Zatem w określaniu rzędu wielkości zaokrąglamy ją w górę.
Zgodnie z tak przyjętą definicją rzędu wielkości obliczona przez nas częstotliwość światła jest rzędu $10^{15}$ Hz (liczbę 4,57 zaokrąglamy do 10).

Rząd wielkości to bardzo grube przybliżenie danej wartości, ale okazuje się dosyć wygodnym pojęciem przy omawianiu wspólnych cech wielu obiektów.
Na przykład większość metali ma gęstość rzędu $10^4 \frac{kg}{m^3}$ (np. żelazo $7,8 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}$, ołów $1,13 \cdot 10^4 \frac{kg}{m^3}$, złoto $1,93 \cdot 10^4 \frac{kg}{m^3}$). Natomiast powszechnie występujące gazy mają gęstość rzędu $1 \frac{kg}{m^3}$ (np. powietrze $1,2 \frac{kg}{m^3}$, dwutlenek węgla $1,9 \frac{kg}{m^3}$, tlen $1,4 \frac{kg}{m^3}$).
Pojęcia „rząd wielkości" używamy również, gdy przedział wartości danej wielkości fizycznej nie ma precyzyjnie określonych granic. Na przykład średnica atomu jest rzędu $10^{-10}$ m, natomiast średnica galaktyk podobnych do Drogi Mlecznej jest rzędu $10^5$ lat świetlnych.

## 3. Porównywanie wielkości fizycznych o różnych rzędach wartości

Rozmiary atomów i galaktyk są oczywiście bardzo różne, ale można określić, o ile rzędów się różnią. Po prostu obliczamy różnicę wykładników liczby 10 w obu wartościach.
Najpierw trzeba te wartości wyrazić w tych samych jednostkach – w metrach:
Rozmiar atomu jest rzędu $10^{-10}$ m.
Średnica galaktyk jest rzędu $10^{21}$ m.
Różnica wykładników potęgi 10 dla rozmiarów galaktyk oraz atomów wynosi:

$$21 - (-10) = 31$$

Zatem galaktyki są o 31 rzędów wielkości większe od atomów. W przypadku gęstości powiemy, że gęstość metali jest o 3 rzędy wielkości większa od gęstości gazów.

## 4. Działania matematyczne na wielkościach o różnych rzędach

Wielkości fizyczne możemy dodawać lub odejmować tylko wtedy, gdy wyrażone są w tych samych jednostkach.
Na co dzień posługujemy się wartościami z dokładnością do dwóch lub trzech cyfr znaczących. Zauważmy, że na przykład dodanie lub odjęcie od 1000 liczby 1 praktycznie jej nie zmienia. W szak z dokładnością do 3 cyfr znaczących 1001 to ciągle 1000.
Dodanie lub odjęcie wartości mniejszej o kilka rzędów w zasadzie tej dokładności nie zmienia. Jeżeli, na przykład odległość między miastami wynosi kilkaset kilometrów, to nie ma większego znaczenia 60 cm w jedną lub drugą stronę. Sprawdźmy:

Odległość z Wrocławia do Bydgoszczy wynosi około 310 km.

$$x = 310 \text{ km} = 3{,}1 \cdot 10^5 \text{ m}$$

$$d = 60 \text{ cm} = 0{,}6 \text{ m} = 6 \cdot 10^{-1} \text{ m}$$

Liczbę 3,1 zaokrąglamy do 1, więc odległość $x$ jest rzędu $10^5$.
Liczbę 6 zaokrąglamy do 10 i otrzymujemy $10 \cdot 10^{-1} = 1$, więc dystans $d$ jest rzędu $10^0$.
Różnica odległości $x$ i $d$ w tym przykładzie jest 5 rzędów wielkości.
Inaczej sprawa wygląda przy mnożeniu i dzieleniu wartości różniących się rzędami. W tym wypadku nie możemy pominąć jednej z liczb, wynik działania najczęściej różni się o wiele rzędów wielkości od liczb, które mnożymy lub dzielimy (przykład z początku tekstu).
Grubość materiału, który składa się z miliarda warstw atomowych, wynosi:

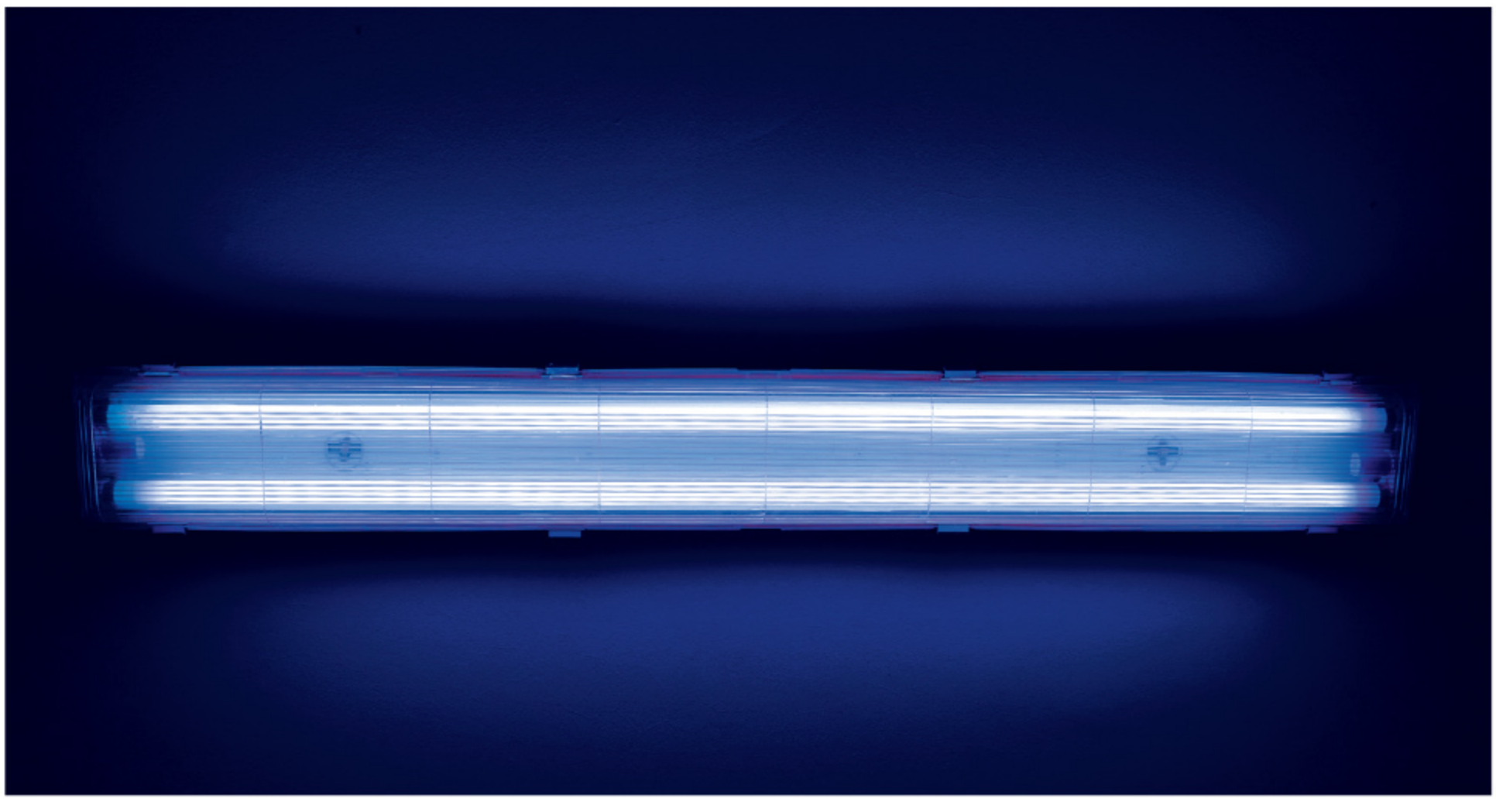
$$D = 10^9 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0{,}1 \text{ m}$$

Wynik znacznie różni się zarówno od średnicy atomu, jak i liczby warstw.
W sytuacjach, w których nie zależy nam na precyzji obliczeń, a tylko na zgrubnym szacowaniu wielkości fizycznych, wygodnie jest posługiwać się pojęciem „rząd wielkości".

## TEKST 1. Tryboluminescencja

Ciekawe zjawisko fizyczne można zaobserwować, nawet otwierając zwykły list (ale taki tradycyjny, w kopercie, nie e-mail). Zdarza się, że odklejany pasek papieru z tylnej części koperty emituje niebieskie błyski. Podobne świecenie można zaobserwować również, odklejając z rolki niektóre rodzaje taśmy klejącej. Obserwowane zjawisko nazywane jest tryboluminescencją.

Tryboluminescencja jest jednym z rodzajów luminescencji – zjawiska polegającego na świeceniu substancji wskutek wzbudzania jej atomów czynnikami zewnętrznymi, np. promieniowaniem ultrafioletowym lub strumieniem rozpędzonych elektronów. Wyróżnia się kilka rodzajów luminescencji, w zależności od tego, co pobudza substancję do świecenia. Jeśli świecenie zachodzi w wyniku reakcji chemicznych, mówimy o chemiluminescencji. Przykładem może tu być reakcja utleniania fosforu białego. W przypadku elektroluminescencji czynnikiem wzbudzającym są rozpędzone elektrony, przyspieszone w polu elektrycznym. Sonoluminescencja jest z kolei wywołana dźwiękami. Czasami wyróżnia się jeszcze bioluminescencję, czyli emitowanie światła przez organizmy żywe, jednak w rzeczywistości zazwyczaj jest to chemiluminescencja.



**Ryc. 1.** Lampa jarzeniowa świeci w wyniku luminescencji

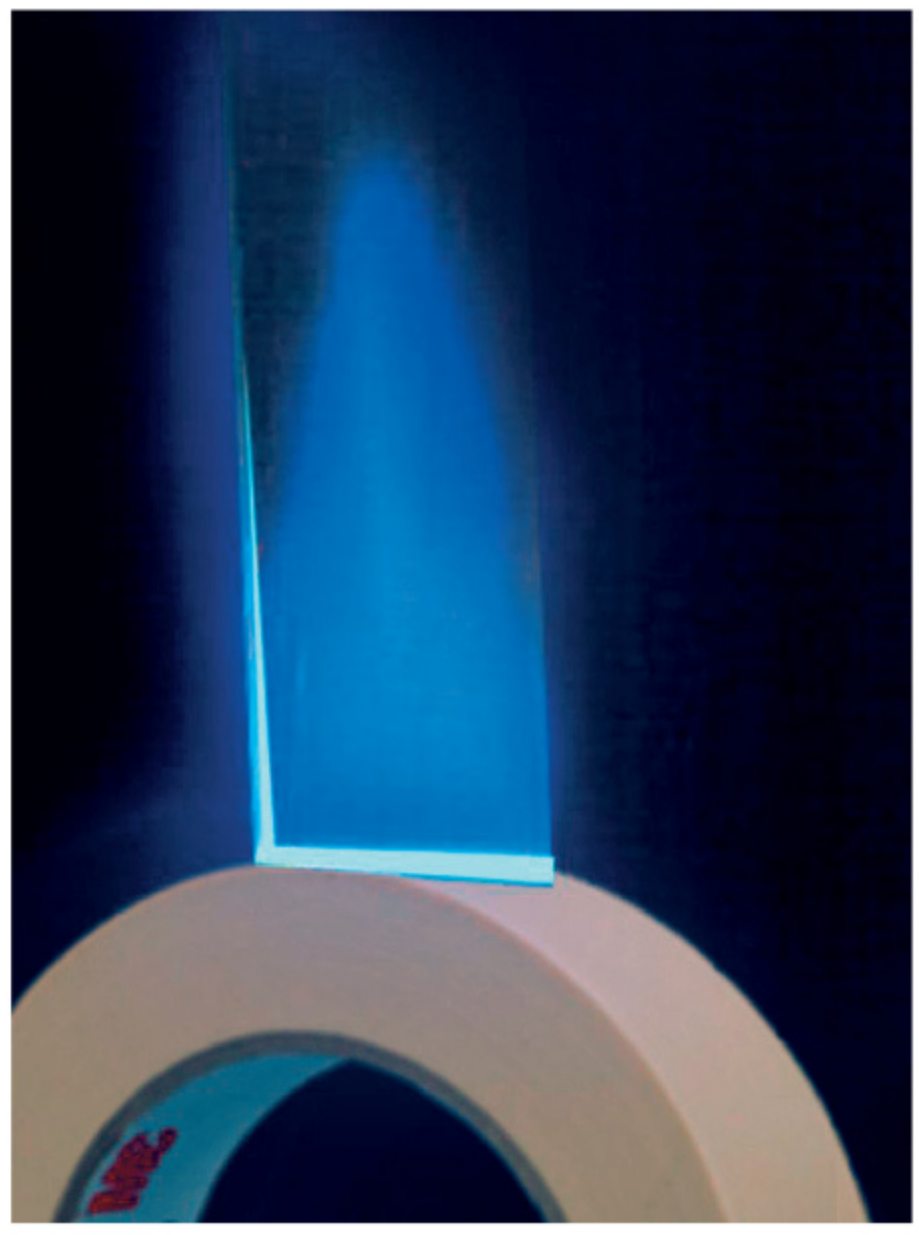
(…) W przypadku tryboluminescencji świecenie substancji wywołane jest czynnikiem mechanicznym – może to być np. tarcie lub uderzenie, stąd też pochodzi nazwa zjawiska – od greckiego *tribein* – trzeć i łacińskiego *lumen* – światło. Nazwę tę zaproponowali Wiedemann i Schmidt w 1888 roku.
Przykładem występowania zjawiska tryboluminescencji jest wspomniane na początku niebieskie świecenie odklejanego paska papieru lub taśmy klejącej. Gdy gwałtownym ruchem odrywamy sklejone paski papieru lub sklejone kawałki taśmy klejącej, cząsteczki

kleju są bardzo silnie rozciągane. Niektóre z nich odrywają się od jednej ze sklejonych powierzchni, a inne są rozrywane. Mogą również zostać zerwane wiązania chemiczne w cząsteczkach kleju.

W wyniku tych procesów dochodzi do separacji (czyli rozdzielenia) ładunków elektrycznych, a jeśli proces zachodzi szybko i dużo ładunków zostaje rozdzielonych, to powstałe silne pole elektryczne może spowodować wyrwanie elektronów z materiału i ich rozpędzenie w stronę ładunków dodatnich. Takie elektrony zderzają się np. z atomami azotu w powietrzu znajdującym się w powstałych w wyniku rozrywania szczelinach. Jeśli elektrony mają dostatecznie dużą energię, to powodują wzbudzanie azotu. Atomy azotu, wracając do niższych poziomów energetycznych, emitują błyski – głównie promieniowanie w zakresie ultrafioletowym (czyli niewidzialne), ale również w niebieskiej i fioletowej części zakresu widzialnego. Mechanizm ten, zaproponowany przez H. Longchambona w latach dwudziestych XX wieku, został potwierdzony doświadczalnie poprzez obserwację widma emitowanego światła – zawierało ono silne linie emisyjne azotu.

Zauważono również, że niektóre rodzaje taśmy klejącej rozwijane w próżni emitują błyski promieniowania rentgenowskiego o czasie trwania rzędu nanosekund (ryc. 2). Odkrycie to było na tyle ciekawe, że zostało opublikowane w renomowanym czasopiśmie naukowym „Nature".

Niestety, nie każdy rodzaj kleju i taśmy klejącej umożliwia zajście możliwego do zaobserwowania zjawiska tryboluminescencji. Aby się to udało, klej musi zawierać długie i elastyczne cząsteczki polimerów. Zjawisko tryboluminescencji, mimo że trudne do zaobserwowania, zostało odkryte już kilka wieków temu. Jako pierwszy opisał je w 1605 roku filozof Francis Bacon. Zauważył on świecenie kruszonego cukru trzcinowego. Swoje obserwacje opisał w dziele *The Advancement of Learning*. Warto spróbować samodzielnie wykonać taki eksperyment. Jeśli bardzo mocno uderzymy młotkiem kostkę zwykłego cukru spożywczego (chemicznie rzecz ujmując: sacharozy $C_{12}H_{22}O_{11}$), można zaobserwować krótkie błyski światła niebieskiego lub zielonego. Aby się to udało, w pomieszczeniu musi panować całkowita ciemność, wzrok musi przyzwyczaić się do ciemności, a cukier musi być całkowicie suchy. Świecenie zgniatanego cukru częściowo



**Ryc. 2.** Zdjęcie promieniowania X emitowanego przez odklejaną taśmę klejącą, wykonane specjalną kamerą przez Juana Escobara i współpracowników (Uniwersytet Kalifornijski, Los Angeles)*

* https://www.scienceabc.com/pure-sciences/what-is-triboluminescence.html

tłumaczy się podobnie, jak opisane wcześniej świecenie odklejanej taśmy klejącej, czyli świeceniem gazu pod wpływem mikrowyładowań elektrycznych. Drugi mechanizm polega na świeceniu wzbudzonego tryboluminoforu, czyli kruszonego lub pocieranego kryształu. Mechanizm ten, nazywany trybolumineskencją emisyjną, nie został jeszcze do końca poznany i wyjaśniony. Jednym z rozważanych objaśnień jest fotoluminescencja odkształcanego materiału, spowodowana wzbudzeniem promieniowania ultrafioletowego powstałego w wyniku opisanego już wyładowania elektrycznego w powietrzu. Drugi rozważany mechanizm to bezpośrednie świecenie deformowanego materiału pod wpływem przemieszczanych elektronów.

Okazuje się, że trybolumineskencję wykazuje wiele różnych substancji krystalicznych, między innymi diament, kwarc, fluoryt $CaF_2$ czy blenda cynkowa ZnS. Barwy emitowanego światła są zróżnicowane, np. diament świeci na niebiesko i czerwono, a kwarc na żółtopomarańczowo.

(…) Zjawisko trybolumineskencji przez długi czas było traktowane jedynie jako naukowa ciekawostka, nie do końca zresztą poznana. Ostatnio prowadzone są badania nad praktycznym wykorzystaniem tego zjawiska. Obiecujące wydaje się np. zastosowanie go do wykrywania wad w materiałach kompozytowych. Elementy takie można pokryć odpowiednią powłoką wykonaną z materiału wykazującego trybolumineskencję. W przypadku nawet niewielkiego i niezauważalnego gołym okiem mechanicznego uszkodzenia (np. pęknięcia) elementu powłoka zaświeci się w miejscu uszkodzenia, co pozwoli odpowiednio wcześnie zauważyć usterkę i być może uniknąć całkowitego uszkodzenia urządzenia lub nawet katastrofy.

Witold Zawadzki
(fragmenty artykułu opublikowanego w czasopiśmie „Neutrino”, nr 44, wiosna 2019)

## PYTANIA I ZADANIA

1. Co to jest luminescencja?
2. Czy zaobserwujemy zjawisko trybolumineskencji przy otwieraniu koperty zaklejonej kruchym, zaschniętym klejem? Uzasadnij odpowiedź.
3. Jaki czynnik pobudza do świecenia atomy azotu znajdujące się w pobliży odklejanej taśmy klejącej?
4. Jaka jest barwa światła emitowanego przez kruszony diament, a jaka – światła emitowanego przez kruszony kwarc?
5. Jakie mogą być zastosowania zjawiska trybolumineskencji?

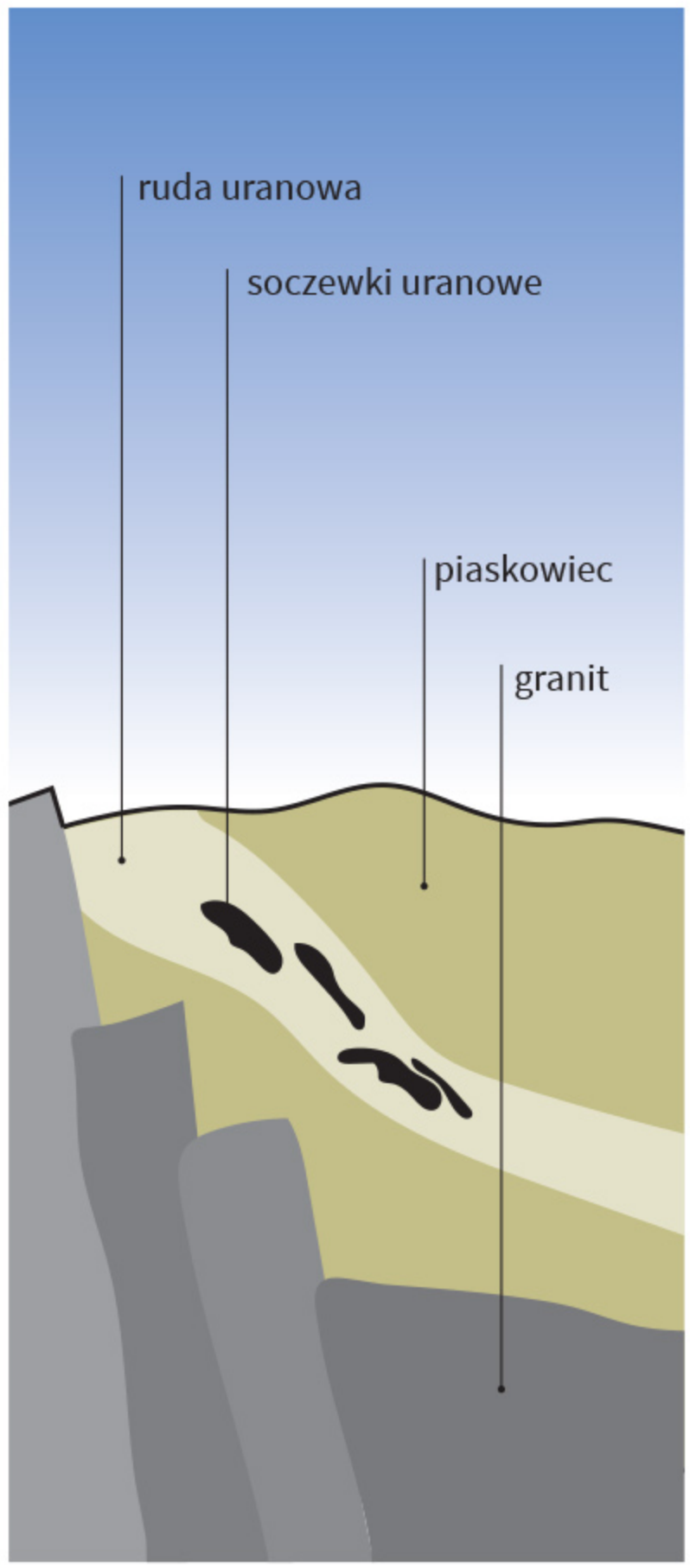
## TEKST 2. Naturalny reaktor jądrowy

Maj na południu Francji bywa upalny, ale pracownicy zakładów wzbogacania uranu w Pierrelatte czuli się jak we wnętrzu reaktora. Rutynowe badanie próbek rudy z gabońskiej kopalni w rejonie Oklo wykazało zmniejszoną zawartość uranu-235. Zamiast 0,72 % – jak w wypadku każdej rudy uranowej na świecie – analizy dawały wyniki w granicach 0,60 %. Stałość składu izotopowego pierwiastków jest dogmatem chemii i fizyki (występują co prawda drobne wahania zależne od czynników naturalnych, ale nie tego rzędu) i takie sytuacje po prostu nie mają prawa się zdarzyć. Oceniono, że w całym transporcie brakuje około 200 kg izotopu uranu-235 (co wystarcza na zbudowanie kilku bomb atomowych). Ponieważ był rok 1972, sam środek zimnej wojny, zrozumiałe, że w Pierrelatte panowała wtedy nerwowa atmosfera.

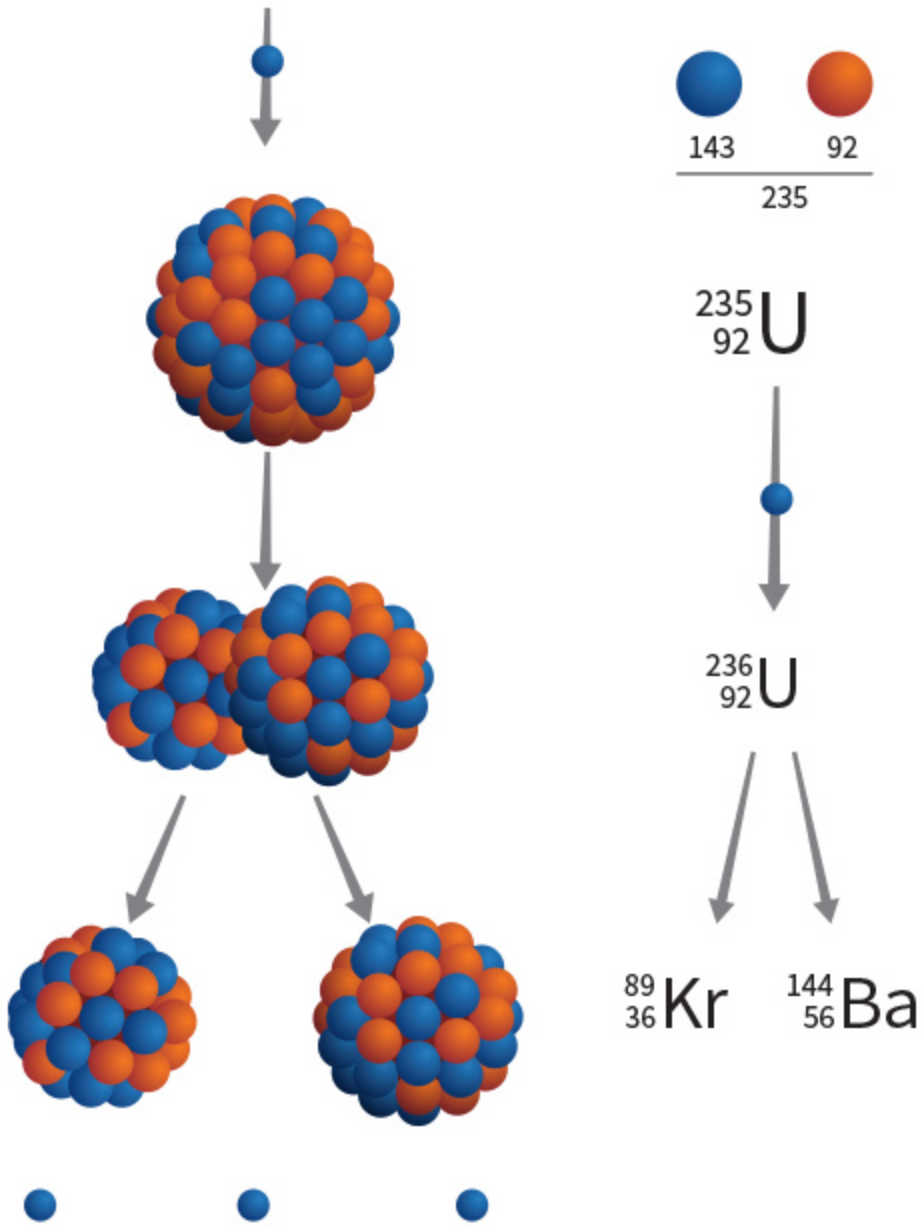
### Wizja lokalna

Śledztwo podjęli funkcjonariusze francuskiej Komisji Energii Atomowej (*Commissariat à l'énergie atomique*, w skrócie CEA). W toku dochodzenia pojawiła się kolejna zagadka. W próbkach wykryto różny od naturalnego skład izotopowy neodymu i rutenu. To zdecydowanie nie była typowa ruda uranu. Najbardziej przypominała... zużyte paliwo z reaktora jądrowego (w nim właśnie znajdują się znaczące ilości niektórych izotopów neodymu i rutenu). Postanowiono zbadać sprawę bezpośrednio w kopalni. Pracownicy CEA pobrali próbki ze złoża i potwierdzili wyniki z francuskich laboratoriów. Dodatkowo w minerałach znaleziono pęcherzyki ksenonu, rzadkiego gazu szlachetnego, i to o dokładnie takim składzie izotopowym, jaki powstaje w wyniku rozszczepienia uranu w reaktorze. Wtajemniczeni (z oczywistych względów nie rozpowszechniano wiadomości o zaginionym uranie) niewątpliwie odetchnęli z ulgą. Zagadka jak dla agenta 007 stała się zagadką dla naukowców. Skąd wzięło się zużyte paliwo jądrowe w pokładach piaskowca sprzed 2 mld lat?

Rozwiązanie problemu podał francuski fizyk Francis Perrin. Ruda naprawdę była wypalonym materiałem rozszczepialnym, ale sam reaktor to nie dzieło rąk ludzkich (…).




**Ryc. 1.** Przekrój przez złoże w Oklo: soczewki uranowe, w których zachodziła reakcja rozszczepienia, pokłady piaskowca, żyła rudy uranowej, skała granitowa




**Ryc. 2.** Jedna z możliwości rozszczepienia izotopu uranu $^{235}U$: neutron trafia w jądro $^{235}U$ i powstaje nietrwałe jądro $^{236}U$, pękające następnie na dwa fragmenty – bar $^{144}Ba$ i krypton $^{89}K$ (emitowane są również trzy neutrony podtrzymujące reakcję)

**Ryc. 3.** Próbka rudy uranu zawierająca jego minerały: żółty uranofan i ciemny uraninit

## Reaktor a matka natura

(…) Rzeka Ogowe, przepływająca przez rejon Oklo, wymywała związki uranu ze skał. W jej zastoiskach (gdzie jest mniej tlenu) osadzały się one na dnie. Stopniowo przykrywała je warstwa innych osadów, przekształcających się w piaskowiec. Złoże w Oklo ma postać żył o grubości do jednego metra, z gniazdami o średnicy kilku metrów, w których zawartość uranu dochodzi do 60 %. Równocześnie miejscowe warunki geologiczne sprawiły, że w skałach znajduje się niewiele pierwiastków pochłaniających neutrony. Natomiast funkcję moderatora pełniła woda przesączająca się do złoża przez szczeliny skalne. Neutrony zaś pochodzą z promieniowania kosmicznego, nielicznych samorzutnych rozszczepień jąder uranu oraz oddziaływania promieni emitowanych przez uran na jądra atomów innych pierwiastków.

(…) Odpowiednie rozmiary złoża i wysoka koncentracja uranu w skałach są potrzebne, aby zapobiec ucieczkom neutronów poza obszar działania reaktora. Jądro atomowe, w które musi trafić neutron, jest 10 tys. razy mniejsze niż rozmiary atomu. Dlatego należy zapewnić długą drogę (w skali atomowej oczywiście), na której lecąca cząstka ma szansę spotkać jądro uranu. Spośród naturalnych izotopów uranu tylko uran-235 łatwo ulega rozszczepieniu, dlatego zawartość przekraczająca 3 % jest niezbędna do uzyskania wydajnej reakcji. W reaktorach stosuje się specjalnie przygotowane paliwo jądrowe zawierające potrzebną ilość tego izotopu (uran wzbogacony). Pierwiastki pochłaniające neutrony są stosowane do kontrolowania przebiegu reakcji rozszczepienia. Zapobiegają nadmiernemu wzrostowi ich liczby, co prowadziłoby do przyspieszenia reakcji i niebezpieczeństwa stopienia rdzenia reaktora. W przypadku uranu-235 najbardziej

efektywna reakcja rozszczepienia zachodzi w odniesieniu do tzw. neutronów termicznych. Są to neutrony, których energia ruchu jest zbliżona do energii ruchu cząstek w temperaturze pokojowej. Jako moderatorów używa się wody, ciężkiej wody lub grafitu (…).

## Wrzący kocioł

Badania w rejonie Oklo oraz pobliskim Bangombe pozwoliły wykryć kilkanaście miejsc, w których zachodziły reakcje rozszczepienia. Oszacowano, że reaktory działały od 100 tys. do nawet 500 tys. lat i zużyły w tym czasie 5–6 t uranu (potem nie było już wystarczającej ilości materiału rozszczepialnego w złożu). W wypadku najkrótszego czasu pracy daje to moc wynoszącą około 100 kW (wystarczy do zasilenia 50 żelazek czy czajników elektrycznych). Dla porównania: pierwszy reaktor skonstruowany przez człowieka w 1942 roku miał w chwili uruchomienia moc zaledwie 0,5 W (nie zaświeciłaby się nawet żarówka rowerowa), a tylko raz osiągnął 200 W. Moderatorem neutronów była woda, dostająca się do złoża uranu. Obliczono, że reaktor pracował w cyklu 3-godzinnym. W ciągu 30 min woda nagrzewała się do temperatury znacznie przekraczającej 100 °C (pod ciśnieniem panującym w szczelinach skalnych), a następnie wytryskiwała na zewnątrz w postaci gejzerów pary. Brak moderatora w złożu przerywał reakcję, a otaczające skały stopniowo stygły. Po 2,5 godz. temperatura spadała na tyle, że ciekła woda znowu dostawała się do wnętrza reaktora i cały cykl powtarzał się od początku. Całość przypominała wrzący kocioł pod ciśnieniem, a widoki były podobne do tych, jakie dziś można zobaczyć w Yellowstone czy na Islandii. I tak dzień po dniu, przez tysiące lat, choć naukowcy sądzą również, że reaktory działały tylko podczas pory deszczowej.

**Ryc. 4.** 200 tys. dolarów w rękach! Tyle jest warte 4,5 kg uranu wzbogaconego w izotop $^{235}U$

Można pozazdrościć bezawaryjności pracy w tak długim czasie. Reaktory nie uległy stopieniu w wyniku przegrzania ani nie wybuchły (…). Złoże w Oklo pozwoliło również inaczej spojrzeć na problem związany z bezpieczeństwem składowanych odpadów promieniotwórczych. Badania w Gabonie dowiodły, że produkty rozszczepienia (pierwotnie wytworzone izotopy promieniotwórcze nie dotrwały do chwili obecnej, chodzi o ich trwałe produkty rozpadu) praktycznie nadal znajdują się w miejscu powstania. Tak więc to wyjątkowe doświadczenie (o czasie trwania 2 mld lat!) pokazało, że nawet pozostawione same sobie odpady promieniotwórcze nie muszą stanowić zagrożenia dla środowiska. Gabońskie reaktory to jedyne tego rodzaju obiekty na Ziemi. Co jednak nie oznacza, że i w innych miejscach nie zaszła podobna kombinacja warunków jak w Oklo. Światowy przemysł energetyczny potrzebuje coraz więcej uranu, zatem badania jeszcze nieznanych złóż prawdopodobnie pozwolą go odkryć. Ale będzie to tylko potwierdzenie, że nawet w przypadku tak zaawansowanej technologii, jaką są reaktory jądrowe, natura był pierwsza.

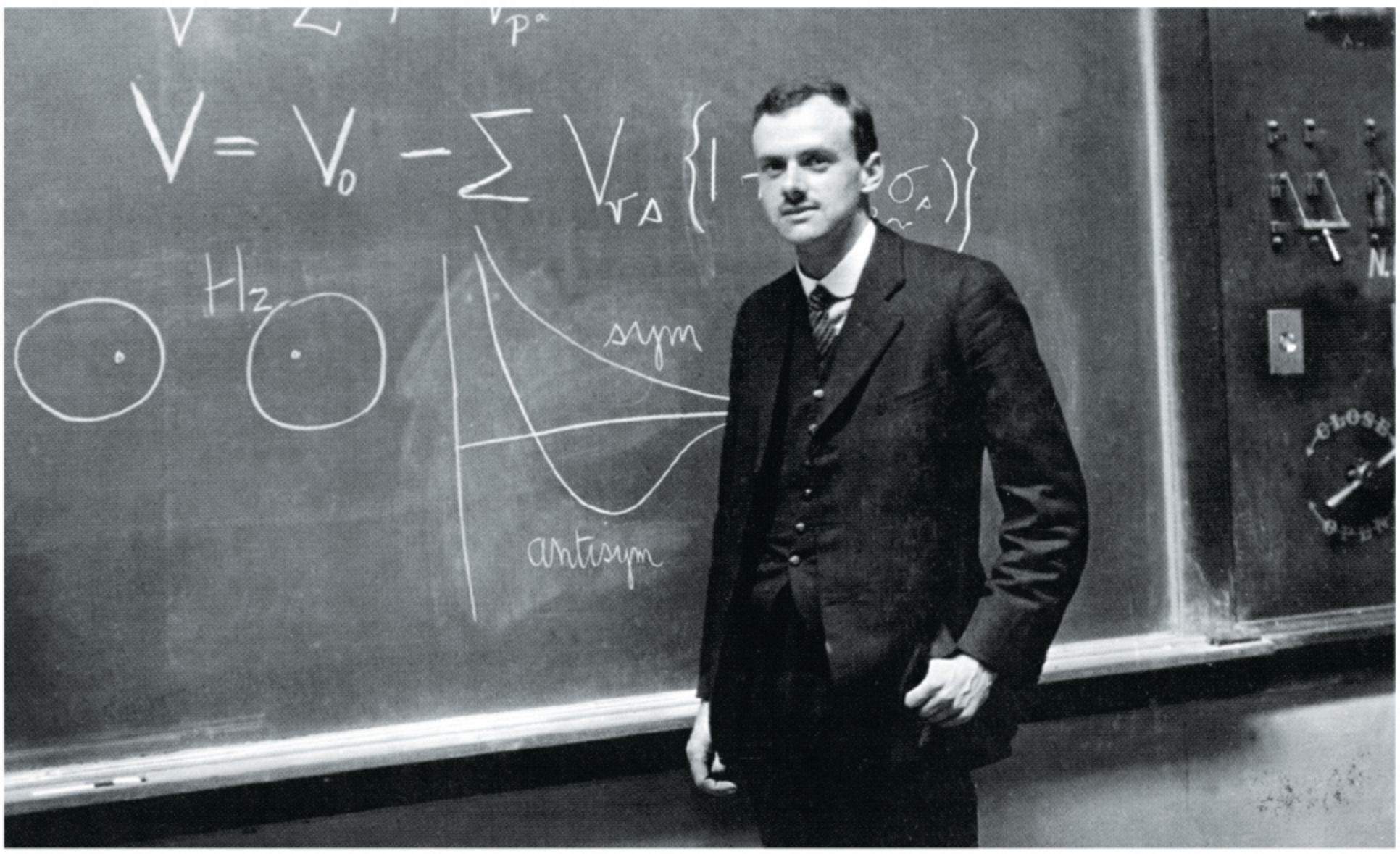
Krzysztof Orliński
(fragmenty artykułu opublikowanego w czasopiśmie „Wiedza i Życie", maj 2016,
© POLITYKA sp. z o.o. S.K.A. 2016–2021)

## PYTANIA I ZADANIA

1. Jaka jest zawartość uranu $^{235}U$ w naturalnych złożach występujących na Ziemi?
2. Jaka jest zawartość uranu $^{235}U$ w złożu w Oklo?
3. Jaka substancja stanowiła moderator w naturalnym reaktorze w Oklo?
4. Jakie były kolejne etapy pracy naturalnego reaktora w Oklo?
5. Gdy reaktor w Oklo rozpoczynał swoją pracę, zawartość izotopu $^{235}U$ w złożu była równa ok. 3,7 %. Wyjaśnij, dlaczego obecnie zawartość tego izotopu w typowych złożach wynosi ok. 0,7 %.

## TEKST 3. Niezwykła antymateria

Wielu czytelników spotkało się z pojęciem antymaterii w rozmaitych książkach fantastycznonaukowych, część zapewne pamięta też książkę Dana Browna oraz film *Anioły i demony*, w których antymateria skradziona z CERN-u służy do szantażu w Watykanie. To wszystko jest oczywiście fikcją literacką, ale realna antymateria jest bliżej nas, niż nam się wydaje. Jeśli mamy w domu np. banany, mamy też antymaterię. Wynika to z tego, że potas-40, będący naturalnym izotopem promieniotwórczym obecnym w tych owocach, czasami rozpada się, emitując dodatni elektron (pozyton), który jest właśnie antycząstką. Nie wyrządzi on nam jednak żadnej szkody, bo bardzo szybko spotyka się ze zwykłym ujemnym elektronem i ulega anihilacji (unicestwieniu).



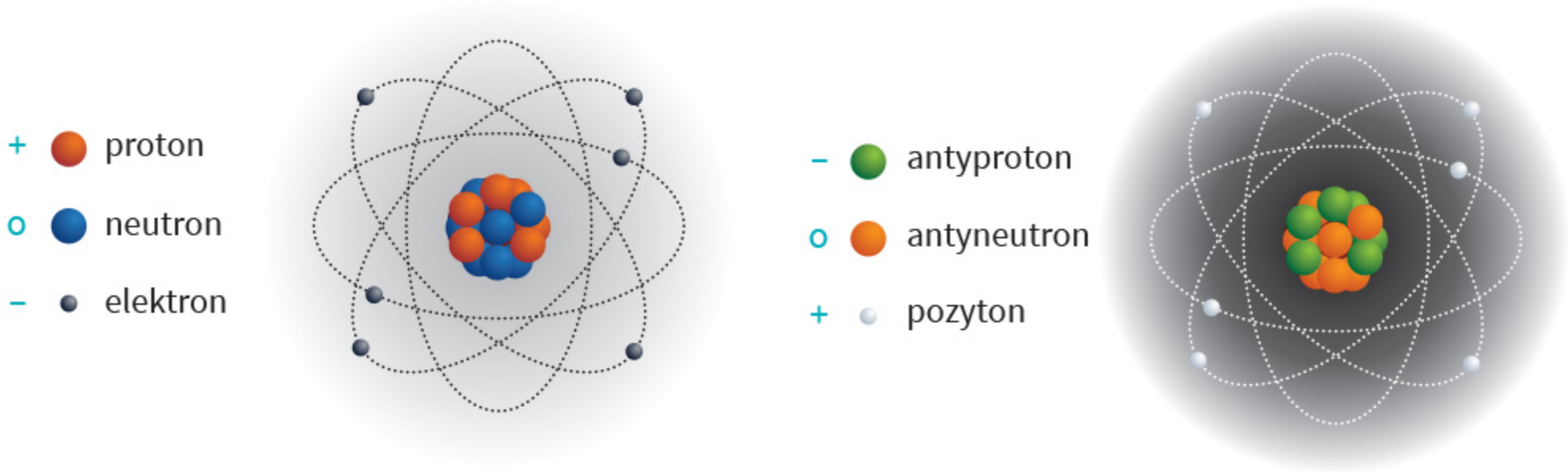

**Ryc. 1.** Paul Dirac prezentuje kwantowo-mechaniczny model atomu wodoru

### Dirac

Fizyk brytyjski Paul Adrien Maurice Dirac w wieku zaledwie 26 lat wyprowadził w 1928 roku znane każdemu specjaliście nauk ścisłych równanie opisujące zachowanie elektronu, znane dziś jako równanie Diraca. Rozwiązanie tego równania dawało dwa wyniki, ale jeden z nich był związany z ujemną energią, a więc z fizycznego punktu widzenia nie miał sensu. Młody uczony zauważył jednak, że wszystko będzie się zgadzać ze zdrowym rozsądkiem, jeśli opisywana cząstka będzie miała ładunek dodatni. W tamtym czasie koncepcję tę przyjęto jako zwykłą ciekawostkę matematyczną, ale już w 1932 roku amerykański fizyk Carl David Anderson wykonał doświadczenie, w którym – wykorzystując docierające do Ziemi promieniowanie kosmiczne – jednoznacznie wykazał istnienie takiej cząstki. Nazwano ją antyelektronem (pozytonem) (…).

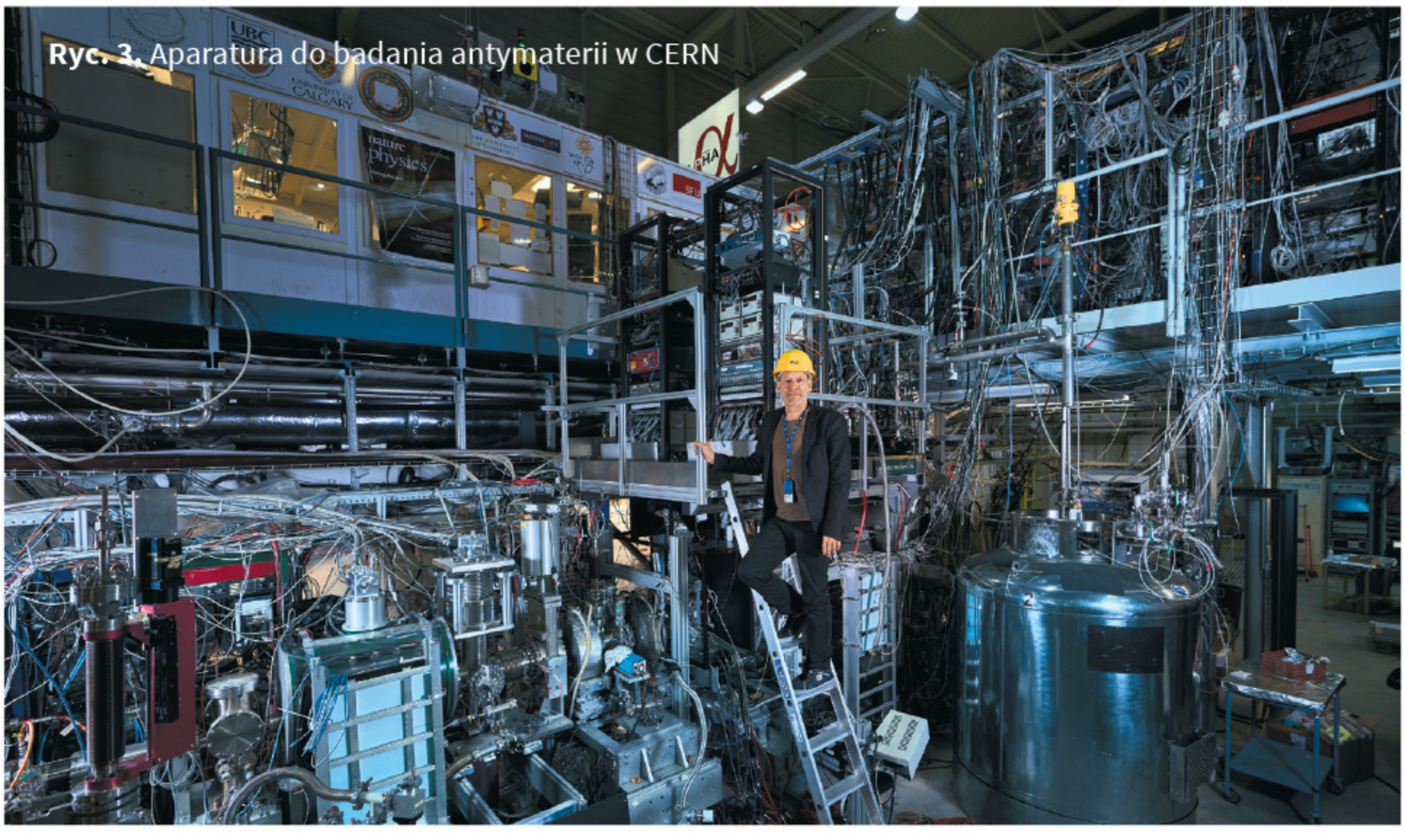
## Antyświat

Odkrycie pozytonu było impulsem do poszukiwania następnych antycząstek, choć trochę to potrwało. W 1955 roku odkryto antyproton (o ładunku ujemnym), a rok później – antyneutron. Dziś znamy dziesiątki antycząstek. W zasadzie każda cząstka elementarna ma swój lustrzany odpowiednik. Jest tylko jeden znaczący wyjątek – foton. W jego przypadku fizycy uznają, że cząstka i antycząstka są identyczne (…).




**Ryc. 2.** Modele atomu materii i atomu antymaterii

Skoro znamy antycząstki, to logiczny jest postulat istnienia antyatomów. Jeśli gdzieś spotka się antyproton z pozytonem, może powstać atom antywodoru. W warunkach ziemskich poszukiwanie go było przez lata bardzo skomplikowane. Dziś jednak dysponujemy aparaturą badawczą, która umożliwia niezwykłe eksperymenty. I tak pod koniec XX wieku udało się wytworzyć pojedyncze atomy antywodoru. Były to jednak tzw. gorące atomy, których czas życia był na tyle krótki, że nie dało się przeprowadzić żadnych konkretnych badań. Dopiero na początku XXI wieku wyprodukowano „zimny" antywodór dzięki tzw. pułapkom Penninga, służącym do przechwytywania i utrzymy-

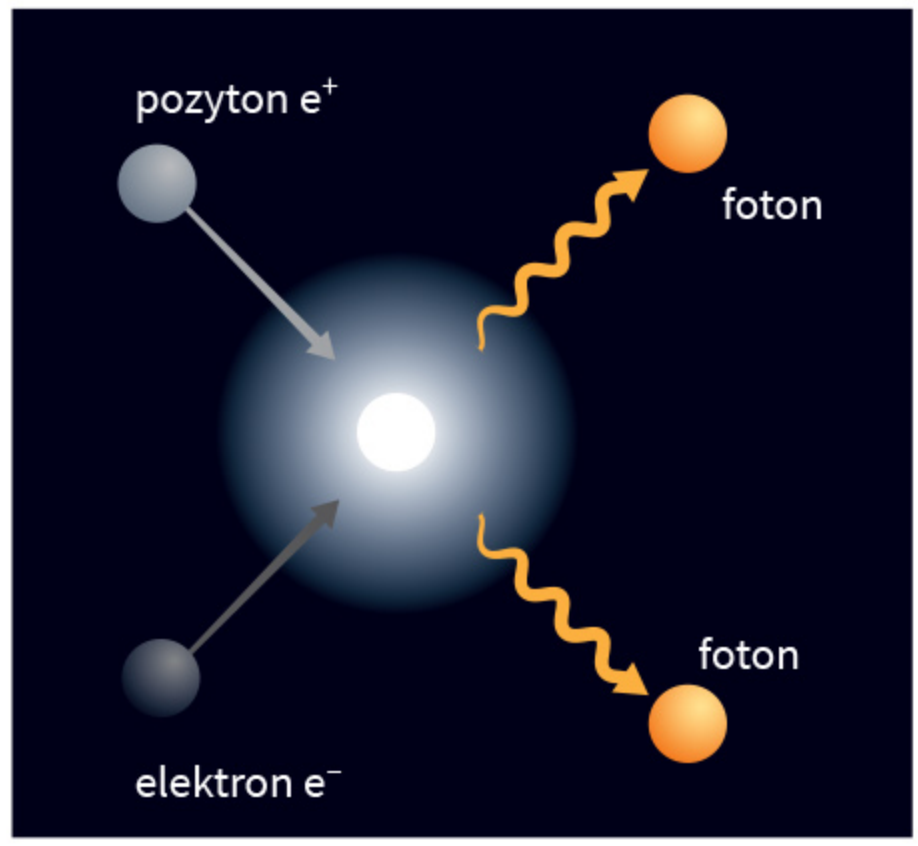



**Ryc. 3.** Aparatura do badania antymaterii w CERN

wania cząstek naładowanych. Laboratorium CERN w Genewie doniosło w latach 2002 i 2004 o otrzymaniu sporej liczby antyatomów – w najnowszych eksperymentach były to już miliony. Ulepszenie techniki pułapkowania pozwala teraz uzyskać po kilka atomów o czasie życia wynoszącym nawet kilkanaście minut. Umożliwiło to m.in. zbadanie ich widma. Ma ono identyczne parametry jak widmo zwykłego atomu wodoru. Fizycy mogli odetchnąć, ponieważ było to zgodne z teorią. Gdyby widmo okazało się inne, trzeba by przekonstruować sporą część teorii fizycznych.

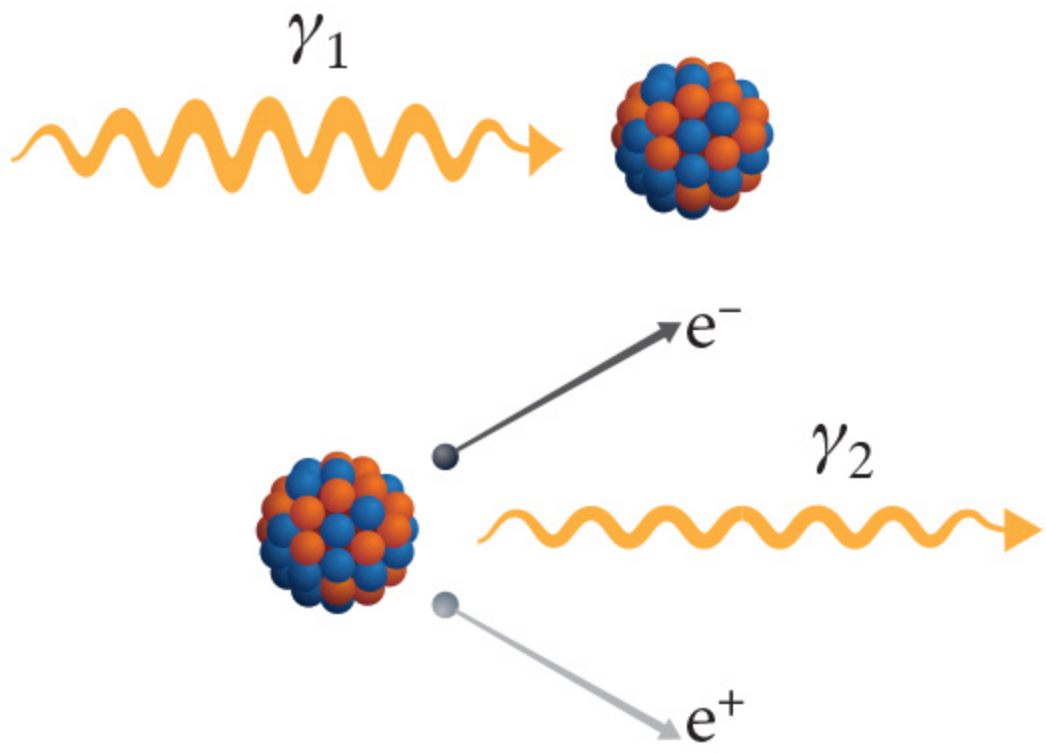
## Anihilacja i kreacja

Tak jak wspomniałem wyżej, spotkanie cząstek z antycząstkami jest zjawiskiem bardzo gwałtownym. Naukowcy obserwują je od lat. Pierwsze były oczywiście zderzenia elektronu i pozytonu. W wyniku takiego spotkania cząstki przestają istnieć, a ich masa zostaje przekształcona w kwanty światła (fotony), które odlatują w przeciwnych kierunkach. Sumaryczna energia tych kwantów wynika ze znanego wzoru Einsteina $E = mc^2$. Warto pamiętać, że w takiej reakcji powstają najczęściej dwa fotony. Wynika to z jednej z podstawowych zasad fizyki, a mianowicie z zasady zachowania pędu. Jest to najprostszy przypadek anihilacji (…).




**Ryc. 4.** Anihilacja pary elektron–pozyton

Niesamowicie fascynujący jest z kolei proces odwrotny, nazywany kreacją par. Jeśli foton (przypominam, to cząstka nieposiadająca masy) ma wystarczająco dużo energii i na swojej drodze spotka dodatkową cząstkę, która przejmie nadmiar energii i pędu, możliwe jest przekształcenie go w parę cząstka–antycząstka, która rozbiegnie się w różnych kierunkach. Tu również kluczowy jest wzór Einsteina – materia nie powstaje z niczego, uzyskujemy ją z energii fotonu (…).




**Ryc. 5.** Kreacja par elektron–pozyton z fotonu. Foton $(\gamma_1)$ napotyka atom lub cząsteczkę, którym przekazuje część pędu

### Co się stało z antymaterią z Wielkiego Wybuchu?

Zgodnie z aktualnymi poglądami na powstanie Wszechświata w chwili Wielkiego Wybuchu powinno powstać dokładnie tyle samo materii i antymaterii. Tyle że w takim przypadku zaraz potem nastąpiłaby anihilacja i Wszechświat składałby się wyłącznie z fotonów. Widać więc, że gdzieś musiała wystąpić drobna asymetria, która spowodowała, że nie ma tam gdzieś daleko antyświata składającego się wyłącznie z antymaterii. Według obliczeń teoretycznych wystarczy bardzo niewielka przewaga materii nad antymaterią (1 cząstka na miliard), by wszystko pasowało do obecnego modelu. Już od jakiegoś czasu fizycy wiedzą, że istnieją bardzo subtelne różnice w zachowaniu się antymaterii w stosunku do „zwykłej" materii, ale one nie przybliżają uczonych do wyjaśnienia tej wielkiej zagadki. Nadal więc trwają badania, co konkretnie spowodowało, że świat wygląda tak, jak wygląda.

### Do czego może się przydać antymateria?

Pierwotnie antymateria była tylko koncepcją teoretyczną. Dziś jednak potrafimy ją badać zdalnie oraz wytwarzać. Okazuje się, że można ją także wykorzystać do bardzo praktycznych celów. W medycynie mamy już całkiem popularne urządzenia PET (pozytonowa tomografia emisyjna).

Trwają badania nad wykorzystaniem antymaterii jako paliwa, szczególnie do napędu statków kosmicznych. Jedną z wersji jest tu napęd impulsowy katalizowany antyprotonami. Wstrzyknięcie niewielkiej ilości antyprotonów w podkrytyczną masę uranu czy plutonu może spowodować zainicjowanie reakcji rozpadu (takiego jak w bombie jądrowej). Szacuje się, że do wywołania pojedynczej eksplozji wystarczy 1 μg antyprotonów. Innym projektem jest klasyczna anihilacja, w której cała masa spoczynkowa materii i antymaterii przekształca się w energię kinetyczną. Niestety, w tym przypadku wielkim problemem technicznym pozostaje skierowanie tej energii w konkretną stronę, dlatego ten pomysł jest nadal bardzo daleki od realizacji (…).

Mirosław Dworniczak
(fragmenty artykułu opublikowanego w czasopiśmie „Wiedza i Życie", marzec 2018,
© POLITYKA sp. z o.o. S.K.A. 2016–2021)

## PYTANIA I ZADANIA

1. Co to jest antycząstka?
2. Podaj nazwę cząstki, która jest antycząstką elektronu.
3. Podaj przykład przedmiotu ze swojego otoczenia emitującego antycząstki.
4. Ile fotonów powstaje podczas anihilacji elektronu i pozytonu?
5. Podaj przykład urządzenia wykorzystującego antymaterię.

# DZIAŁ I. ELEKTROSTATYKA

## ROZDZIAŁ 1. (s. 14)

**1.** Silniej, bo zniknie siła odpychania między ładunkami ujemnymi.

**3.** $n \approx 3{,}8 \cdot 10^{13}$

**4.** Tak, po zbliżeniu naelektryzowanego ciała ładunek przez nie odpychany odpłynie na paski.

**5.** Elektron może być, pozyton nie może. Wynika to z zasady zachowania ładunku.

## ROZDZIAŁ 2. (s. 19)

**2.** Dodatnio – np. silikonem, ujemnie – np. wełną.

**3.** Jest przewodnikiem, gdyż jony mają ładunek elektryczny i swobodę ruchu.

**4.** Kozłowanie powoduje, że podczas każdego odbicia piłka styka się z parkietem innym fragmentem, co zwiększa powierzchnię styku.

**5.** **a)** Pozostanie przy płytce.
**b)** Piłka by się rozładowała i zawisłaby swobodnie.

## ROZDZIAŁ 3. (s. 25)

**1.** $F = 3{,}6 \cdot 10^{-4}$ N

**3.** $F = 1{,}62$ N

**5.** $F = 9 \cdot 10^{9}$ N. Około 900 tys. ton.

## ROZDZIAŁ 4. (s. 31)

**2.** Najsilniejsze jest między ładunkami, a najsłabsze jest daleko od obu ładunków.

**5.** Wskazówka: przeanalizuj siły działające na każdy z ładunków dipola.

## ROZDZIAŁ 5. (s. 37)

**1.** Jony dodatnie w dół, ujemne w górę. Ich ruch jest ciągle zakłócany przez zderzenia z cząsteczkami powietrza, więc nie jest jednostajnie przyspieszony.

**2.** Nie, gdyż nie byłoby napięcia między jej końcami.

**3.** 0,0024 mm

**4.** **a)** Poruszały się w przeciwne strony.
**b)** Każda cząstka uzyskała energię ok. $1{,}3 \cdot 10^{-17}$ J.
**c)** Elektron, ponieważ ma mniejszą masę.

**5.** Nie jest to niebezpieczne, gdyż energia elektryczna i przepływający ładunek są bardzo małe.

## ROZDZIAŁ 6. (s. 44)

**2.** Ażurowa stalowa konstrukcja mostu jest klatką Faradaya, choć niedoskonałą ze względu na duże odstępy między metalowymi elementami.

**3.** W izolatorze ładunki nie mogą się przemieszczać, więc nasze ciało nie jest uziemione.

**4.** Ponieważ przy ostrzach pole elektryczne jest silniejsze.

**5.** Jest równe zeru, bo nasze ciało jest przewodnikiem.

## ROZDZIAŁ 7. (s. 50)

**1.** Nie zmieni się.

**2.** Większe napięcie i energia są w kondensatorze z większym ładunkiem.

**3.** $q = -3{,}4$ mC

**4.** $q = 6{,}75$ mC

**5.** Kondensator B.

## ROZDZIAŁ 8. (s. 57)

**1.** Nie był to skuteczny sposób. Fala dźwiękowa nie ma istotnego wpływu na zmiany pola elektrycznego w atmosferze. Mogło to być niebezpieczne dla dzwonników. Wieże, w których montowano dzwony, były z reguły najwyższymi punktami w okolicy.

**2.** Są tam elektrony swobodne oraz jony dodatnie.

**3.** Nie, brakuje odprowadzenia ładunku do ziemi.

**4.** $q = 24$ C

**5.** $C \approx 1{,}7$ F

## POWTÓRZENIE DZIAŁU ELEKTROSTATYKA (s. 62)

**1.** $q = +2$ nC

**2.** Nastąpiło przemieszczenie ładunków w wyniku indukcji elektrostatycznej. Na większą kulę przepłynął ładunek ujemny, a na mniejszej pozostał ładunek dodatni.

**3.** B

**4.** 1 F, 2 P, 3 P

**5.** $E_k \approx 11$ μJ

**6.** C 2

**7.** Były ok. 6,9 razy większe.

**8.** **a)** $q \approx 19$ mC

**b)** $t \approx 4{,}5$ s

**c)** $q \approx 9{,}6$ mC

**9.** Nie zmieni się.

**10.** Naelektryzowane ujemnie krople wody są cięższe od naelektryzowanych dodatnio kryształków lodu. Krople wody gromadzą się w niższych warstwach chmury, kryształki w wyższych.

# DZIAL II. PRĄD ELEKTRYCZNY

## ROZDZIAŁ 9. (s. 73)

**1.** Nie jest naelektryzowany.

**2.** Trzy.

**3.** Nie.

**4.** $t \approx 3{,}3$ s

**5.** Natężenie wynosi ok. 12 A, więc w każdej sekundzie przepływa ok. $7{,}5 \cdot 10^{19}$ elektronów.

## ROZDZIAŁ 10. (s. 81)

**1.** $I = 2{,}25$ mA

**2.** Opornik $R_1$, ok. 2,5 razy.

**3.** Opór się nie zmieni.

**4.** $U = 45$ V

**5.** Wskazówka: przypomnij sobie, jak zależą opór przewodnika i opór półprzewodnika od temperatury.

## ROZDZIAŁ 11. (s. 87)

**1.** Nie, będzie dwa razy większe.

**2.** energia światła słonecznego → energia pola elektrycznego wytworzonego przez fotoogniwo w obwodzie → energia wiązań chemicznych

**3.** $P \approx 900$ W

**4.** $I = 7{,}83$ A

**5.** ok. 20 zł

## ROZDZIAŁ 12. (s. 92)

**1.** Nie, amperomierz pokaże natężenie prądu płynącego przez opornik.

**2.** $I \approx 0{,}43$ A

**3.** Przez żarówkę 2 popłynie prąd o dwa razy większym natężeniu.

**4.** Wskazówka: ustal, jakie jest napięcie na każdej z żarówek.

**5.** $R_1 = 150\ \Omega$, $R_2 = 300\ \Omega$

## ROZDZIAŁ 13. (s. 99)

**1.** $I \approx 13$ A

**2.** Nie, natężenie prądu w obwodzie byłoby większe niż 10 A.

**3.** Bezpiecznik przeciążeniowy nie pozwala na to, by przez obwód płynął prąd o zbyt dużym natężeniu, bezpiecznik różnicowoprądowy odcina zasilanie w przypadku wypływu prądu z sieci elektrycznej.

**5.** Wskazówka: porównaj sumę natężeń prądów płynących przez wszystkie podłączone urządzenia z wartością podaną na bezpieczniku.

## POWTÓRZENIE DZIAŁU PRĄD ELEKTRYCZNY (s. 102)

**1.** **b)** $U = 4{,}5$ V

**2.** 1 P, 2 P, 3 P

**3.** A

**4.** $R = 120\ \Omega$

**5.** Większy opór ma czajnik, ok. 1,5 raza.

**6.** B 1

**7.** $I_3 = 60$ mA

**8.** Na oporniku $R_1$ – ok. 1,5 raza większa.

**9.** ok. 68 zł

**10.** Nie można. W obwodzie płynie prąd o natężeniu ok. 7,6 A, po podłączeniu żelazka natężenie prądu byłoby równe ok. 12,8 A.

# DZIAŁ III. ELEKTROMAGNETYZM

## ROZDZIAŁ 14. (s. 111)

**1.** W prawo (względem zdjęcia).

**2.** Na górze jest biegun północny, na dole – południowy.

**3.** Wskazówka: narysuj linie pola magnesu sztabkowego. W miejscu, w którym linie pola „wchodzą" do kawałka żelaza, powstaje biegun S.

**4.** Wskazówka: igła magnetyczna ustawia się zgodnie z liniami pola magnetycznego.

**5.** Pomarańczowym.

## ROZDZIAŁ 15. (s. 117)

**1.** W prawo.

**2.** A – biegunem północnym w prawo, B – w lewo.

**3.** A – zgodne, B – przeciwne.

**4.** W A i C lub w B i D.

**5.** Wskazówka: w momencie włączenia młoteczek uderza w lewy element dźwięczący.

## ROZDZIAŁ 16. (s. 124)

**1.** **a)** W lewo.
**b)** Przed rysunek.
**c)** W dół.
**d)** Nie działa.
**e)** W prawo.
**f)** Ukośnie w prawo w dół.

**2.** Koniec B.

**3.** Zgodnie z ruchem wskazówek zegara.

**4.** **b)** Na boki ramki równoległe do linii pola siła nie działa, na pozostałe działa siła 0,0005 N.
**c)** Ramka się obróci.

**5.** Przyciągają się.

## ROZDZIAŁ 17. (s. 131)

**1.** c

**2.** Prędkość cząstek się zmniejszała.

**3.** $v \approx 4800$ m/s

**4.** Po torze 1 – cząstka o ładunku dodatnim, po torze 2 – o ładunku ujemnym. Większą masę miała cząstka ujemna.

## ROZDZIAŁ 18. (s. 137)

**1.** Na biegunie północnym – prawie pionowo w dół, na sawannie – prawie poziomo w prawo.

**3.** Nie, gdyż pole magnetyczne nie zmienia wartości prędkości cząstek naładowanych.

**4.** Wskazówka: pole magnetyczne Ziemi przechwytuje cząstki naładowane wysoko nad atmosferą.

**5.** Tak, załogę ISS osłania ziemskie pole magnetyczne.

## ROZDZIAŁ 19. (s. 144)

**1.** Gdy ruch odbywał się z większą prędkością.

**2.** Prąd popłynie zgodnie z ruchem wskazówek zegara.

**3.** Nie, w obu przypadkach magnes jest nieruchomy względem zwojnicy.
**4.** Wskazówka: pole magnetyczne zwojnicy jest podobne do pola magnetycznego magnesu.
**5.** W sytuacji c.

## ROZDZIAŁ 20. (s. 149)

**1.** W przypadkach b i c.
**2.** W stronę przeciwną niż przedstawiona w treści zadania.
**3.** W sytuacji a.
**4.** Przez pierwsze dwie sekundy i od szóstej sekundy.
**5.** Wskazówka: prąd płynie, gdy w zwojnicy zmienia się pole magnetyczne.

## ROZDZIAŁ 21. (s. 156)

**1.** Wskazówka: praca siły jest sposobem przekazu energii do zasilania urządzenia.
**2.** Tak, wymaga większego wysiłku, patrz zadanie 1.
**3.** Nie, byłoby to niezgodne z zasadą zachowania energii.
**4.** Wskazówka: elektrownia wiatrowa zamienia energię kinetyczną mas powietrza na energię elektryczną.
**5.** Nie, w takiej sytuacji siła Lorentza nie spowoduje powstania napięcia między końcami ramki.

## ROZDZIAŁ 22. (s. 161)

**1.** $P = 4$ W, napięcie znamionowe: od 220 V do 240 V.
**2.** $I_{sk} \approx 2{,}8$ A; $f \approx 125$ Hz
**3.** $U_{sk} = 24{,}3$ V, $U_{max} \approx 34{,}4$ V
**4.** $U_{sk} \approx 11{,}3$ V, $f = 100$ Hz
**5.** $P = 3680$ W

## ROZDZIAŁ 23. (s. 169)

**1.** $n_1 = 2300$
**2.** $U_2 = 0$, gdyż transformator nie działa na prąd stały.
**3.** Tylko niektóre linie pola zwojnicy $n_1$ przechodzą przez zwojnicę $n_2$.
**4.** Wskazówka: gdy zmieni się moc w uzwojeniu wtórnym, to zmieni się również moc w uzwojeniu pierwotnym.
**5.** $I \approx 950$ A

## POWTÓRZENIE DZIAŁU ELEKTROMAGNETYZM (s. 172)

**2.** 1 F, 2 P, 3 P
**3.** B, C
**4.** Od A do B.
**5.** Równoległe w pobliżu równika, prostopadłe w pobliżu biegunów.
**6.** 1 P, 2 F, 3 P
**7.** a, c
**8.** W $t_2$ oraz $t_3$.
**9.** $P \approx 140$ W
**10.** $I_{sk} = 45$ A, $I_{max} \approx 64$ A

# DZIAŁ IV. FIZYKA ATOMOWA

## ROZDZIAŁ 24. (s. 186)

**1.** Od ok. $10^{12}$ Hz do $10^{14}$ Hz.

**2.** Od ok. $4{,}3 \cdot 10^{14}$ Hz do $7{,}5 \cdot 10^{14}$ Hz.

**3.** Nie, farba na banknotach pod wpływem nadfioletu emituje światło.

**4.** $\frac{1}{2}\lambda \approx 6{,}1$ cm

**5.** **a)** Nie, bo wirus jest mniejszy od długości fal świetlnych.
**b)** Krótkofalowa część nadfioletu i promienie X.

## ROZDZIAŁ 25. (s. 195)

**1.** Gwiazda o barwie niebieskiej.

**2.** Widma tych pierwiastków są takie same jak widma pierwiastków na Ziemi.

**3.** Wodór i hel.

**4.** **a)** Nie – w świetle dziennym mogą pojawić się barwy niewidoczne przy sztucznym.
**b)** W odcieniach czerwieni. W części zielononiebieskiej widma tych świetlówek brakuje więcej barw niż w części czerwonej.

**5.** $\lambda \approx 2{,}4$ μm. Większość emisji jest w podczerwieni.

## ROZDZIAŁ 26. (s. 202)

**1.** $E_f \approx 3{,}1$ eV, $E_c \approx 1{,}8$ eV

**2.** Czerwonego.

**5.** $n \approx 5 \cdot 10^{18}$

## ROZDZIAŁ 27. (s. 211)

**1.** 6

**2.** O energii 7 eV nie, gdyż energia tego fotonu nie wystarczy do przejścia elektronu na drugi poziom; o energii 14 eV tak, gdyż atom zostanie zjonizowany.

**3.** $E_n - E_k \approx 2{,}2$ eV

**4.** $\lambda \approx 485$ nm

**5.** **a)** W podczerwieni.
**b)** W nadfiolecie.

## ROZDZIAŁ 28. (s. 218)

**1.** W atomie tlenu cztery, w atomie bromu osiemnaście.

**3.** German, bo ma mniejszą przerwę energetyczną.

**4.** Jest izolatorem.

## ROZDZIAŁ 29. (s. 224)

**1.** W energię wewnętrzną całego złącza.

**2.** Wskazówka: długość fali promieniowania związana jest z energią fotonu. Zastanów się, od czego zależy energia emitowanego fotonu.

**3.** Fotony światła niebieskiego mają większą energię od fotonów światła zielonego lub czerwonego, zatem luminofor może je „zamienić” na fotony światła wielu innych barw.

**4.** Wskazówka: obydwa fotony nie mogą być w zakresie światła, gdyż suma ich energii musi być równa energii fotonu pochłanianego przez luminofor.

## ROZDZIAŁ 30. (s. 231)

**1.** Nie, gdyż między kanałem i bramką jest izolator.
**2.** Diody połączone są przeciwnie.
**3.** Około 2,5 V oraz 4 V.
**4.** Nie jest.
**5.** W zakresie mniej więcej od 5 V do 6 V.

## ROZDZIAŁ 31. (s. 239)

**1.** Należy zwiększyć częstotliwość promieniowania.
**2.** W obwodzie oświetlonym światłem niebieskim. Liczba fotonów światła niebieskiego jest 10 razy większa.
**3.** $\lambda_{gr} \approx 1400$ nm
**4.** Aby zaszło zjawisko fotochemiczne, fotony muszą mieć energię większą od granicznej.
**5.** Energia padających fotonów jest równa najwyżej 4,1 eV, czyli zjawisko fotoelektryczne nie zachodzi.

## POWTÓRZENIE DZIAŁU FIZYKA ATOMOWA (s. 242)

**1.** ok. 2,39
**2.** 1 F, 2 P, 3 P
**3.** $f_{gr} \approx 4 \cdot 10^{15}$ Hz; do nadfioletu.
**4.** Od ok. 240 GHz do ok. 390 THz.
**5.** np. Ne, He, Ar
**6.** A, B, D
**7.** A, D
**8.** Nie wywoła takiego efektu, ponieważ to nie moc lampy ma znaczenie, lecz częstotliwość promieniowania.
**9.** Świeci tylko prawa dioda.
**10.** Natężenie prądu zmieni się (wzrośnie) o ok. 4,8 A.

# DZIAŁ V. FIZYKA JĄDROWA

## ROZDZIAŁ 32. (s. 250)

**1.** Liczba protonów – liczba w dolnym indeksie, liczba neutronów – różnica liczb w górnym i dolnym indeksie.

**2.** Ca – sześć izotopów, Au – jeden izotop, Mg – trzy izotopy, P – jeden izotop, O – trzy izotopy.

**3.** $m \approx 3{,}27 \cdot 10^{-22}$ g, liczba atomów to ok. $9{,}2 \cdot 10^{21}$.

**4.** $R \approx 7{,}4 \cdot 10^{-15}$ m

**5.** $10^{-10}$ %

## ROZDZIAŁ 33. (s. 257)

**1.** $^{226}_{88}\mathrm{Ra} \xrightarrow{\alpha} {}^{222}_{86}\mathrm{Rn}$ $\quad$ $^{8}_{3}\mathrm{Li} \xrightarrow{\beta} {}^{8}_{4}\mathrm{Be}$

$^{240}_{94}\mathrm{Pu} \xrightarrow{\alpha} {}^{236}_{92}\mathrm{U}$ $\quad$ $^{210}_{84}\mathrm{Po} \xrightarrow{\alpha} {}^{206}_{82}\mathrm{Pb}$

$^{229}_{89}\mathrm{Ac} \xrightarrow{\beta} {}^{229}_{90}\mathrm{Th}$ $\quad$ $^{183}_{74}\mathrm{W} \xrightarrow{\gamma} {}^{183}_{74}\mathrm{W}$

$^{117}_{50}\mathrm{Sn} \xrightarrow{\gamma} {}^{117}_{50}\mathrm{Sn}$ $\quad$ $^{24}_{11}\mathrm{Na} \xrightarrow{\beta} {}^{24}_{12}\mathrm{Mg}$

**2.** $^{58}\mathrm{Mn}$, $^{64}\mathrm{Co}$, $^{44}\mathrm{K}$, $^{3}\mathrm{H}$, $^{138}\mathrm{Cs}$

**3.** Wskazówka: uran jest $\alpha$-promieniotwórczy.

**4.** $\alpha, \beta, \alpha, \beta, \alpha, \alpha, \alpha, \beta, \alpha, \alpha, \beta$

**5.** **b)** Około 50 zliczeń.

**c)** Badane było promieniowanie $\beta$, promieniowanie $\alpha$ ma w powietrzu znacznie krótszy zasięg.

## ROZDZIAŁ 34. (s. 265)

**1.** Ca – ok. 4 dni, P – ok. 14 dni

**2.** Zawierała dwukrotnie więcej tego izotopu, czyli o 100 % więcej.

**3.** Maleje, krótszy czas połowicznego rozpadu powoduje, że szybciej ubywa lekkiego izotopu.

**4.** **a)** 2 lata

**b)** 2006, 16 %, 0,5 %

**5.** **b)** $T_{½} = 32$ h

**c)** ok. 130 h

## ROZDZIAŁ 35. (s. 271)

**1.** ok. 24 %

**2.** $\alpha$

**3.** Nie, lecz mogła im grozić choroba popromienna.

**4.** ok. 0,04 mSv

**5.** ok. 0,2 mSv

## ROZDZIAŁ 36. (s. 280)

**1.** Izotopy o krótkim czasie połowicznego rozpadu w skałach dawno się rozpadły.

**2.** Blacha – $\beta$, gdyż $\alpha$ nie przeniknie przez blachę, folia – $\alpha$, gdyż tak cienka warstwa nie osłabi promieniowania $\beta$. Promieniowanie $\gamma$ jest tak przenikliwe, że nie nadaje się do tych celów.

**3.** Około 7500 lat.

**4.** Głębokość wnikania promieniowania $\alpha$ jest bardzo mała.

**5.** ok. $3{,}4 \cdot 10^{15}$ cząstek

## ROZDZIAŁ 37. (s. 284)

**1.** $E_w \approx 1800$ MeV

**2.** Z uranu.

**3.** Jądro litu.

**4.** Wydziela się.

**5.** Jest ponad 350 tys. razy większa.

## ROZDZIAŁ 38. (s. 289)

**1.** Dla jądra wodoru ${}_1^3\mathrm{H}$, gdyż ma większą energię wiązania.

**2.** $\Delta m \approx 3{,}2 \cdot 10^{-27}$ kg

**3.** **a)** $\Delta m \approx 2{,}658 \cdot 10^{-28}$ kg
**b)** $E_w \approx 149{,}5$ MeV

**4.** Neutron może się rozpaść w ten sposób, bo ma masę (czyli także energię spoczynkową) większą od sumy mas (energii spoczynkowych) protonu i elektronu.

**5.** Jądro plutonu.

## ROZDZIAŁ 39. (s. 294)

**1.** ${}_{94}^{239}\mathrm{Pu} + {}_0^1\mathrm{n} \rightarrow {}_{56}^{143}\mathrm{Ba} + {}_{38}^{94}\mathrm{Sr} + 3{}_0^1\mathrm{n}$

**2.** $E \approx 205$ MeV

**3.** Jest mniejsza.

**4.** Większość neutronów powstałych w wybuchu nie spowodowała rozszczepienia i opuściła próbkę.

**5.** Cięższy izotop uranu silnie pochłania neutrony.

## ROZDZIAŁ 40. (s. 299)

**1.** ${}^{238}\mathrm{U}$

**3.** ${}_{92}^{238}\mathrm{U} + {}_0^1\mathrm{n} \rightarrow {}_{92}^{239}\mathrm{U} \xrightarrow{\beta} {}_{93}^{239}\mathrm{Np} \xrightarrow{\beta} {}_{94}^{239}\mathrm{Pu}$

**5.** Około 7 razy więcej, czyli 350 ton.

## ROZDZIAŁ 41. (s. 305)

**1.** 1 – kopalnia uranu, 2 – fabryka wzbogacania uranu, 3 – elektrownia jądrowa, 4 – składowisko odpadów promieniotwórczych, 5 – zakłady przetwarzania rudy uranowej

**3.** Wskazówka: przeanalizuj fragment o paliwie jądrowym.

**4.** Jest nierealne, weź pod uwagę bezpieczeństwo pasażerów.

**5.** ok. 1900 kg

## ROZDZIAŁ 42. (s. 312)

**1.** Wskazówka: jaka temperatura jest niezbędna do reakcji syntezy?

**2.** ${}_1^2\mathrm{H} + {}_1^3\mathrm{H} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + {}_0^1\mathrm{n}$

**3.** Wskazówka: porównaj liczby masowe jąder wyjściowych i produktów reakcji.

**4.** 4,1 MeV

**5.** ok. 40 μg

## ROZDZIAŁ 43. (s. 320)

**1.** gwiazda ciągu głównego, czerwony olbrzym, biały karzeł

**2.** Prawdopodobnie nie, rozmiary Słońca na tym etapie nie przekroczą promienia orbity Ziemi.

**3.** Słońce by zmalało, gdyż zmniejszałoby się ciśnienie w jego wnętrzu i grawitacja by je ściskała.

**4.** $d \approx 1{,}4 \cdot 10^{10}\ \mathrm{kg/m^3}$

**5.** $F_g = 1{,}7 \cdot 10^{8}\ \mathrm{N}$, ok. 220 tys. razy więcej niż na Ziemi.

## ROZDZIAŁ 44. (s. 329)

**1.** Nie.

**2.** Nie, bo nie zmieni się oddziaływanie grawitacyjne między tą gwiazdą a Układem Słonecznym.

**3.** $R_g \approx 2 \cdot 10^{13}\ \mathrm{m}$

**4.** $d \approx 6 \cdot 10^{16}\ \mathrm{kg/m^3}$, ok. 6 mln razy większa od gęstości białych karłów.

**5.** **a)** Podczas zderzenia wydzieliła się energia.

**b)** $E = 7{,}2 \cdot 10^{47}\ \mathrm{J}$

## POWTÓRZENIE DZIAŁU FIZYKA JĄDROWA (s. 332)

**1.** **a)** 19

**b)** 20, 21, 22

**2.** ${}^{218}_{84}\mathrm{Po} \xrightarrow{\alpha} {}^{214}_{82}\mathrm{Pb} \xrightarrow{\beta} {}^{214}_{83}\mathrm{Bi} \xrightarrow{\beta} {}^{214}_{84}\mathrm{Po}$

**3.** **a)** $T_{1/2} \approx 1{,}2$ roku

**b)** $m \approx 2{,}3$ mg

**4.** 1 F, 2 F, 3 P

**5.** Około 11,5 tys. lat temu.

**6.** C

**7.** 1 F, 2 F, 3 P

**8.** Nie, w jądrach berylu i helu jest w sumie za mało nukleonów.

**9.** Nie, biały karzeł to ostatni etap ewolucji gwiazd o małej masie, z których nie mogą powstać czarne dziury.

**10.** 1 P, 2 F, 3 F

## Tabela 1. Stałe fizyczne i astronomiczne

| | |
|---|---|
| współczynnik w prawie Coulomba | $k \approx 9 \cdot 10^9 \ \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{C}^2}$ |
| ładunek elementarny | $e \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$ |
| prędkość światła w próżni | $c \approx 3 \cdot 10^8 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ |
| stała Plancka | $h \approx 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$ |
| masa elektronu | $m_\mathrm{e} \approx 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$ |
| masa protonu | $m_\mathrm{p} \approx 1{,}673 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$ |
| masa neutronu | $m_\mathrm{n} \approx 1{,}675 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$ |
| jednostka masy atomowej | $u \approx 1{,}661 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$ |
| masa Słońca | $m_\mathrm{s} \approx 2 \cdot 10^{30}\ \mathrm{kg}$ |
| stała grawitacji | $G \approx 6{,}67 \cdot 10^{-11} \ \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2}$ |

## 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 | $10^{-15} = 0{,}000\,000\,000\,000\,001$ |

A

amperomierz [*ammeter*] 72
atom [*atom*] 9, 197–198

B

bateria (ogniw) [*battery*] 69
bezpiecznik przeciążeniowy [*circuit breaker*] 94
bezpiecznik różnicowoprądowy [*residual-current device*] 98
biały karzeł [*white dwarf*] 317, 318–319

C

chmura elektronowa [*electron cloud*] 203–204
choroba popromienna [*radiation sickness*] 269
czarna dziura [*black hole*] 325
czasoprzestrzeń [*spacetime*] 196, 327
czas połowicznego rozpadu [*half-life*] 260–261
czerwony olbrzym [*red giant*] 317, 318–319
częstotliwość [*frequency*] 176–177
częstotliwość graniczna [*cutoff frequency*] 209, 232
cykl protonowy [*proton–proton chain reaction*] 308

D

datowanie radioizotopowe [*radioisotope dating*] 272
dawka promieniowania [*radiation dose*] 267
deficyt masy [*mass deficit*] 287–288
dioda półprzewodnikowa [*semiconductor diode*] 219
dioda świecąca [*light emitting diode*] 222
dipol elektryczny [*electric dipole*] 17
długość fali [*wavelength*] 178
dualizm korpuskularno-falowy [*wave–particle duality*] 201

E

elektromagnes [*electromagnet*] 115
elektron [*electron*] 203
elektron swobodny [*free electron*] 10, 214
elektronowolt [*electronvolt*] 199
elektrownia jądrowa [*nuclear power plant*] 300–301
energia elektryczna [*electrical energy*] 33
energia spoczynkowa [*rest energy*] 285
energia wiązania [*binding energy*] 281
energia wiązania na nukleon [*binding energy per nucleon*] 282
ewolucja gwiazd [*stellar evolution*] 317–319

F

fale elektromagnetyczne [*electromagnetic waves*] 148, 176
fale radiowe [*radio waves*] 179
ferromagnetyk [*ferromagnetic*] 109–110
foton [*photon*] 197

G

gwiazda [*star*] 313
gwiazda ciągu głównego [*main sequence star*] 317
gwiazda neutronowa [*neutron star*] 319, 322

I

indukcja elektromagnetyczna [*electromagnetic induction*] 140–149
indukcja magnetyczna [*magnetic induction*] 109
izolator [*insulator*] 15, 215
izotop [*isotope*] 248

J

jądro atomowe [*atomic nucleus*] 203
jonizacja [*ionization*] 208
jonosfera [*ionosphere*] 51

K

klatka Faradaya [*Faraday cage*] 40
kondensator [*capacitor*] 45

L

liczba atomowa [*atomic number*] 248
liczba masowa [*mass number*] 248
linie pola elektrycznego [*electric field lines*] 27
linie pola magnetycznego [*magnetic field lines*] 106–107

Ł

ładunek elektryczny [*electric charge*] 8
ładunek elementarny [*elementary charge*] 8

M

magnes [*magnet*] 106
magnetosfera [*magnetosphere*] 134
masa krytyczna [*critical mass*] 292
mgławica [*nebula*] 313, 314–315
moc prądu elektrycznego [*electric power*] 83
moderator [*moderator*] 296

N

napięcie elektryczne [*voltage*] 34
napięcie znamionowe [*nominal voltage*] 160
natężenie prądu [*current*] 71
neutron [*neutron*] 246
nukleon [*nucleon*] 246

O

obwód elektryczny [*electrical circuit*] 67
ogniwo (bateria) [*galvanic cell*] 67
ogniwo fotoelektryczne (fotoogniwo) [*photoelectric cell*] 235
opornik [*resistor*] 76
opór elektryczny [*electrical resistance*] 74

P

pasmo energetyczne [*energy band*] 214
piorun [*lightning*] 54
piorunochron [*lightning rod*] 56
plazma [*plasma*] 306
pojemność elektryczna (kondensatora) [*capacitance*] 46
pole elektryczne [*electric field*] 26
pole magnetyczne [*magnetic field*] 106
potencjał elektryczny [*electric potential*] 33
poziom energetyczny [*energy level*] 204–205
poziom podstawowy [*basic level*] 205
poziom wzbudzony [*excited level*] 205
powłoka elektronowa [*electron shell*] 204
półprzewodnik [*semiconductor*] 76, 80, 216
praca wyjścia [*work function*] 233
prądnica [*generator*] 151
prawo Coulomba [*Coulomb's law*] 20, 21
prawo Ohma [*Ohm's law*] 75
prawo rozpadu promieniotwórczego [*the law of radioactive decay*] 262
prąd elektryczny [*electric current*] 66
prąd przemienny [*alternating current*] 157
promieniowanie elektromagnetyczne [*electromagnetic radiation*] 176
promieniowanie gamma [*gamma radiation*] 183
promieniowanie mikrofalowe [*microwave radiation*] 180
promieniowanie nadfioletowe [*ultraviolet radiation*] 182
promieniowanie podczerwone [*infrared radiation*] 181
promieniowanie rentgenowskie [*X-rays*] 183
promieniotwórczość [*radioactivity*] 251
prostownik [*rectifier*] 221
proton [*proton*] 246
przerwa energetyczna [*band gap*] 214
przewodnik [*conductor*] 10, 215

R

reakcja jądrowa [*nuclear reaction*] 283
reakcja łańcuchowa [*chain reaction*] 292
reaktor jądrowy [*nuclear reactor*] 295
rozpad promieniotwórczy [*radioactive decay*] 251
rozszczepienie jądra [*nuclear fission*] 290, 295

S

sieci energetyczne [*energy networks*] 168
silnik elektryczny [*electric engine*] 121
siła elektryczna [*electric force*] 9
siła elektrodynamiczna [*electrodynamic force, magnetic force*] 119, 121
siła Lorentza [*Lorentz force, magnetic force*] 126
siła magnetyczna [*magnetic force*] 118, 126
siły jądrowe [*nuclear forces*] 247
stała Plancka [*Planck constant*] 199
supernowa [*supernova*] 322–323
synteza jądrowa [*nuclear fusion*] 307

T

tło promieniowania [*radiation background*] 266
transformator [*transformer*] 163–166
tranzystor [*transistor*] 225
tranzystor polowy [*field-effect transistor*] 226

U

uziemienie [*ground*] 12

W

wiatr słoneczny [*solar wind*] 134
widmo absorpcyjne [*absorption spectrum*] 191
widmo ciągłe [*continuous spectrum*] 188
widmo emisyjne [*emission spectrum*] 191
widmo promieniowania [*spectrum of radiation*] 188
woltomierz [*voltmeter*] 68

Z

zakaz Pauliego [*Pauli exclusion principle*] 212
zasada zachowania ładunku [*principle of charge conservation*] 9
zasada zachowania liczby nukleonów [*principle of nucleon conservation*] 255
zjawisko fotoelektryczne [*photoelectric phenomenon (effect)*] 232, 234
zjawisko fotochemiczne [*photochemical phenomenon*] 238
zorza polarna [*aurora borealis*] 138
zwarcie [*short circuit*] 95
zwojnica [*coil*] 114

Z

źródło napięcia [*voltage source*] 67
źródło nietermiczne [*non-thermal source*] 187
źródło termiczne [*thermal source*] 187

**Źródła ilustracji i fotografii**

**Okładka:** (słup wysokiego napięcia i pioruny) Josemaria Toscano/Shutterstock.com

**Tekst główny:** s. 9 (linijka); s. 10 (ładunki); s. 11, 12 (linijka); s. 13 (elektryzowanie przez indukcję); s. 15 (wełna i plastik); s. 17 (cząsteczki), (dipol), (ładunki); s. 18 (rozmieszczenie ładunków w atomie), (przyciąganie izolatora), (ładunki na grzebieniu); s. 19 (dipol wobec ładunku ujemnego), (zbliżanie piłeczki); s. 22 (naelektryzowane balony); s. 24 (zachowanie dipoli wobec siebie), (elektryczne odpychanie atomów i cząstek), (stół); s. 25 (ładunki); s. 26 (pole elektryczne); s. 27 (siły działające na ładunek); s. 28 (linie pola); s. 29 (pole elektryczne przeciwnych ładunków), (dipol w polu elektrycznym); s. 33 (ładunek w polu elektrycznym); s. 34 (napięcie); s. 35 (pole elektryczne); s. 38 (pole wewnątrz przewodnika); s. 41 (pole elektryczne przy ostrzu); s. 43 (napięcie między płytami), (przepływ wody); s. 45 (kondensator płaski), (zwinięty kondensator); s. 46 (ładowanie kondensatora), (pompa); s. 47 (schemat mikrofonu), (obwód); s. 48 (obwody z kondensatorem); s. 51 (pole elektryczne Ziemi); s. 53 (schemat prądów powietrza w chmurze); s. 54 (chmura burzowa); s. 55 (wyładowanie wstępne); s. 56 (pole elektryczne przy piorunochronie), (instalacje odgromowe); s. 57 (dom); s. 58–59 (infografika), (słup wysokiego napięcia), (wykres wraz ze zjawiskami atmosferycznymi na nim); s. 62 (doświadczenie z izolatorami), (ładunki), (doświadczenie z izolatorem); s. 63 (schemat); s. 66 (schemat); s. 67 (ładunki); s. 68 (instalacja hydrauliczna); s. 69 (ogniwa); s. 70 (zjonizowana ciecz); s. 71 (struktura wewnątrz przewodnika); s. 86 (schematy); s. 88 (rozgałęziacz); s. 89 (rozgałęzienie hydrauliczne); s. 95 (połączenie sprzętów domowych); s. 102 (latarka); s. 107 (pole magnetyczne w Polsce), (układ igieł magnetycznych), (linie pola magnetycznego); s. 108 (magnesy), (igła magnetyczna), (pola magnetyczne); s. 109 (podział magnesu); s. 110 (pole magnetyczne); s. 111 (okrągły magnes), (magnes sztabkowy i kawałki żelaza), (magnes podkowiasty), (kolorowe prostokąty); s. 113 (pole magnetyczne wokół przewodu), (zachowanie igły magnetycznej wobec przewodu z prądem); s. 114 (kierunek pola magnetycznego wewnątrz zwojnicy a kierunek prądu); s. 117 (przewody), (zwojnice), (schemat gongu); s. 118 (magnes i przewód); s. 119 (pola magnetyczne); s. 120 (wyznaczanie zwrotu siły), (działanie magnesu neodymowego na przewód); s. 121 (pole magnetyczne pochodzące od sieci trakcyjnej); s. 122 (schemat działania silnika elektrycznego), (budowa silnika elektrycznego); s. 123 (schemat działania silnika); s. 124 (przewody w polu magnetycznym), (magnes z przewodem); s. 125 (ramka z prądem); s. 126 (elektrony w polu magnetycznym); s. 127 (wyznaczanie zwrotu siły); s. 128 (wyznaczanie zwrotu linii pola), (ruch cząstki w polu magnetycznym); s. 130 (ruch po linii śrubowej), (ruch cząstki względem rowerzysty); s. 131 (różne tory ruchu w polu magnetycznym), (tory ruchu przeciwnie naładowanych cząstek); s. 138–139 (infografika); s. 141 (ruch elektronów w ramce); s. 142 (ramka w polu magnetycznym), (ruch pierścienia przez pole magnetyczne); s. 144 (magnesy), (zwojnice), (przewód), (ruch pierścienia w polu magnetycznym); s. 145 (zbliżanie magnesu do zwojnicy); s. 146 (powstawanie prądu w wyniku zaniku pola magnetycznego); s. 147 (zwojnice); s. 148 (pole magnetyczne a pole elektryczne); s. 149 (schemat rozchodzenia się fali elektromagnetycznej), (zwojnica i magnes); s. 150 (pierścień), (magnesy), (zwojnice); s. 151 (model prądnicy); s. 153 (ramka w polu magnetycznym); s. 154 (wykres); s. 157 (schematy), (wykresy); s. 160 (tabliczka znamionowa); s. 161 (tabliczka znamionowa); s. 163 (schemat budowy transformatora); s. 164 (schemat działania transformatora); s. 166 (przesyłanie energii z elektrowni); s. 168–169 (schemat sieci energetycznej); s. 169 (zwojnice); s. 172 (magnes i kawałki żelaza), (igły magnetyczne wobec przewodów z prądem), (tory ruchu cząstek); s. 173 (magnes z przewodem), (transformator); s. 174 (magnes z ramką), (zwojnice na rdzeniu), (zwojnica i magnes), (zwojnice); s. 178 (podział fal elektromagnetycznych); s. 178–179 (podział fal elektromagnetycznych); s. 184–185 (infografika); s. 188 (widmo z podziałką długości fali), (widma żarówek); s. 189 (wykres); s. 190 (widmo liniowe helu); s. 193 (widma emisyjne); s. 194 (widmo galaktyki J120-0545); s. 195 (widmo absorpcyjne gwiazdy); s. 198 (rozproszenie fali), (strumień fotonów); s. 201 (ruch fotonów); s. 204 (chmury elektronowe), (poziomy energetyczne); s. 205 (poziomy energetyczne atomu); s. 206 (zmiana poziomu energetycznego po emisji fotonu); s. 207 (poziomy energetyczne atomu wodoru); s. 208 (zmiana poziomu energetycznego po absorpcji fotonu); s. 209 (wykres energii jonizacji pierwiastków); s. 211 (przejścia elektronu); s. 212 (piłeczki w rzędach); s. 213 (fragment układu okresowego), (rozmieszczenie elektronów w atomie krzemu); s. 214 (pasma energetyczne w metalach); s. 215 (wykres pasm energetycznych metalu), (wykres pasm energetycznych izolatora); s. 216 (pasma energetyczne półprzewodnika), (przejście elektronów półprzewodnika do wyższego pasma); s. 217 (pasma energetyczne w półprzewodnikach typu n i typu p); s. 219 (schemat pasm energetycznych w diodzie), (kierunek ruchu elektronów w diodzie); s. 220 (pasma złączenia półprzewodników p i n), (rozdział ładunków w złączu p-n), (pasma w złączu p-n); s. 222 (schemat działania diody świecącej); s. 223 (schemat budowy diody świecącej), (widmo lampy LED); s. 226 (przekrój tranzystora polowego); s. 227 (podłączenie bramki); s. 228 (tranzystor bez napięcia), (tranzystor z napięciem między bramką i kanałem), (wykres pasm energetycznych tranzystora); s. 232 (zjawisko fotoelektryczne); s. 234 (schemat wewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego); s. 235 (schematy); s. 236 (schemat budowy fotoogniwa), (model pasmowy fotoogniwa); s. 237 (działanie drukarki laserowej); s. 242 (poziomy energetyczne wodoru); s. 246 (jądra atomowe); s. 248 (fragment układu okresowego); s. 252 (tory ruchu cząstek $\alpha$, $\beta$ i $\gamma$ w polu magnetycznym); s. 253 (emisja cząstki $\alpha$); s. 256 (przenikliwość promieniowania jądrowego); s. 258 (badanie promieniowania); s. 259 (rozpad izotopu promieniotwórczego); s. 260 (wykres); s. 261 (wykres); s. 268 (źródła dawki równoważnej); s. 271 (wykres); s. 276–277 (infografika); s. 279 (detektor

promieniowania); s. 281 (rozbicie jądra deuteru), (powstanie deuteru); s. 283 (wykres); s. 286 (przekaz energii); s. 287 (rozbicie jądra na nukleony); s. 290 (rozszczepienie jądra atomowego); s. 292 (reakcja łańcuchowa); s. 293 (schemat bomby atomowej); s. 306 (materia tworząca gwiazdy); s. 307 (wykres); s. 308 (synteza wodoru w hel); s. 309 (odpychanie się jąder atomowych); s. 314–315 (infografika), (zgęszczenie materii); s. 316 (budowa Słońca), (warstwy Słońca); s. 318–319 (infografika), (porównanie wielkości Słońca teraz i za 5 mld lat), (ewolucja Słońca), (ewolucja gwiazdy masywniejszej od Słońca), (biały karzeł); s. 335 (oddziaływanie ładunków), (oddziaływanie balonów); s. 336 (siły działające na balon); s. 338 (połączenie obwodu); s. 342 (okrągły magnes); s. 343 (położenia kompasu i uzyskana linia); s. 347 (spektroskop); s. 358 (przekrój przez złoże w Oklo); s. 359 (rozszczepienie uranu); s. 363 (model atomu materii i atomu antymaterii); s. 364 (anihilacja pary elektron-pozyton), (kreacja pary elektron-pozyton)

**Autor:** Stefan Drewiczewski

s. 7 (uderzenie pioruna) Sergey Nivens/Shutterstock.com; s. 8 (maszyna elektrostatyczna) Gucio_Photo/Shutterstock.com; s. 9 (materiał) Yanokon/Shutterstock.com; s. 10 (dziecko) Yulia Nemchenko/Shutterstock.com; s. 11 (ręka) rvlsoft/Shutterstock.com, (puszka) Montri Thipsorn/Shutterstock.com; s.12 (ręka) rvlsoft/Shutterstock.com, (puszka) Montri Thipsorn/Shutterstock.com, (przewód) Emil Timplaru/Shutterstock.com, (materiał) everydayplus/Shutterstock.com; s. 13 (przepompowywanie) Standard store88/Shutterstock.com, (naprawa komputera) george photo cm/Shutterstock.com, (kulka) 123dartist/Shutterstock.com; s. 14. (elektroskop) Grzegorz F. Wojewoda/WSiP; s. 15 (kobieta) SebastianGauert/iStockphoto/Getty Images; s. 16 (naelektryzowana rura) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 18 (grzebień i papierki) haryigit/Shutterstock.com; s. 19 (kula) Africa Studio/Shutterstock.com; s. 20 (piesek) enviromantic/iStockphoto/Getty Images, (kulki) 123dartist/Shutterstock.com; s. 21 (kulki) 123dartist/Shutterstock.com; s. 22 (balony) ChrisGorgio/iStockphoto/Getty Images; s. 24 (książki) Hong Vo/Shutterstock.com; s. 26 (tabliczka ostrzegawcza) Tom_Sanderson/Shutterstock.com; s. 27 (pieprz w polu elektrycznym) Ted Kinsman/SCIENCE SOURCE/East News, (kulki) 123dartist/Shutterstock.com; s. 29 (kulki) 123dartist/Shutterstock.com; s. 30 (kula plazmowa) WHITE RABBIT83/Shutterstock.com; s. 32 (słup wysokiego napięcia) carlos castilla/Shutterstock.com, (burza) Dan Martin Maghiar/Shutterstock.com; s. 35 (zapalniczka) Stephen Chai/Shutterstock.com; s. 36 (kula plazmowa i świetlówka) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 38 (samolot) Science Photo Library/East News; s. 39 (ptaki) fotorutkowscy/Shutterstock.com; s. 40 (człowiek w klatce Faradaya) PA Images/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 41 (odchylony płomień) DE AGOSTINI PICTURE LIBRARY/Getty Images; s. 42 (przewód i iskra) Johan Swanepoel/Shutterstock.com; s. 44 (most) Fsolipa/Shutterstock.com; s. 45 (kondensatory na płytce) Danny Iacob/Shutterstock.com, (niebieski kondensator) Longklong/Shutterstock.com; s. 47 (mikrofon bokiem) www.akg.com, (mikrofon przekrojony) www.akg.com; s. 48 (kondensator) Kabardins photo/Shutterstock.com, (bateria) MarySan/Shutterstock.com, (żarówka) koosen/Shutterstock.com; s. 49 (defibrylator) Jin young-in/Shutterstock.com, (tramwaj) CRRC ZHUZHOU LOCOMOTIVE CO., LTD.; s. 51 (wieża i piorun) Atomazul/Shutterstock.com, (fragment kuli ziemskiej) Egyptian Studio/Shutterstock.com; s. 53 (chmury burzowe z ISS) Sara Schmidt, GeoControl Systems, JETS Contract at NASA-JSC, (chmura burzowa) kazoka/Shutterstock.com; s. 54 (burza w mieście) Izzy Bouchard/Shutterstock.com; s. 55 (pioruny) Riddick Patrec/Shutterstock.com; s. 58–59 (błękitne smugi) Science Photo Library/East News, (wyładowanie koronowe) Svetlosila/Shutterstock.com, (żaglowiec) SCIENCE SOURCE/BE&W, (duszki) John Sirlin/Alamy Stock Photo/BE&W, (wyładowania pajęczynowe) A. T. Willett/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 62 (białe kule) Africa Studio/Shutterstock.com, (srebrne kulki) 123dartist/Shutterstock.com; s. 65 (miasto nocą) JoeZ/Shutterstock.com; s. 66 (pomiar prądu) Africa Studio/Shutterstock.com; s. 68 (woltomierz analogowy) PassionStudio/iStockphoto/Getty Images, (woltomierz cyfrowy) Tense Electronic; s. 69 (baterie czarno-miedziane) MarySan/Shutterstock.com, (bateria szaro-niebieska) Vector Tradition/Shutterstock.com; s. 70 (sum elektryczny) Tom McHugh/SCIENCE SOURCE/BE&W; s. 71 (przewód) Emil Timplaru/Shutterstock.com; s. 72 (amperomierz analogowy) teh_z1b/Shutterstock.com, (amperomierz cyfrowy) connect11/iStockphoto/Getty Images; s. 73 (amperomierz) Leoco/Shutterstock.com; s. 74 (kuchenka elektryczna) Grandomart/Shutterstock.com, (różne natężenia w zależności od przewodnika) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 76 (opornik ceramiczny) www.blackdotaudio.eu, (opornik w dłoni) ra3rn/iStockphoto/Getty Images; s. 77 (połączenie obwodu) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 79 (żarówka) Chones/Shutterstock.com; s. 82 (pomiar) Andrey_Popov/Shutterstock.com; s. 84 (licznik energii) www.fhome.pl, (ściana) I.Friedrich/Shutterstock.com; s. 85 (ładowanie samochodu) ibae.chatdanai/Shutterstock.com; s. 86 (czajnik) tartanparty/Shutterstock.com; s. 87 (lampka solarna) Grisha Bruev/Shutterstock.com; s. 88 (przedłużacze) MPIX/Shutterstock.com, (lampa) Marco Prati/Shutterstock.com, (monitor) Ara Hovhannisyan/Shutterstock.com; s. 89 (obwód) Bartosz Wojciechowski/WSiP; s. 91 (turysta z czołówką) AYA images/Shutterstock.com, (kolorowe lampki) KRPD/Shutterstock.com; s. 93 (wyłączanie bezpiecznika) Grigorev_Vladimir/iStockphoto/Getty Images, (licznik energii) CHALERMPHON SRISANG/Shutterstock.com, (bezpiecznik) Kazarlenya/Shutterstock.com, (rozdzielacz) Mikhail Sedov/iStockphoto/Getty Images; s. 95 (pralka na tle ściany) Sashkin/Shutterstock.com, (lampa) Phonlamai Photo/Shutterstock.com; s. 96 (kuchnia) archideaphoto/Shutterstock.com; s. 97 (tramwaj) Alexandra Lande/Shutterstock.com, (trolejbus) Martyn Jandula/Shutterstock.com; s. 98 (bezpiecznik różnicowoprądowy) Kinek00/Shutterstock.com; s. 105 (zorza polarna) solarseven/Shutterstock.com; s. 106 (magnes i opiłki) New

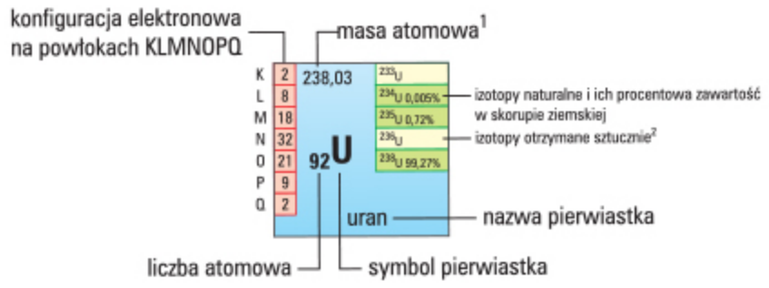
Africa/Shutterstock.com; s. 110 (opiłki żelaza wokół magnesu) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 111 (dziewczyna) OlegD/Shutterstock.com; s. 112 (zwojnica i opiłki) Science Photo Library/East News, (opiłki wokół przewodu) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 113 (ręka) 9nong/Shutterstock.com; s. 114 (opiłki wokół zwojnicy) Wojciech Wójtowicz/WSiP, (ręka) Denphumi/Shutterstock.com; s. 115 (złomowisko) dvande/Shutterstock.com, (dzwonek) xefstock/iStockphoto/Getty Images, (zamek elektromagnetyczny) Roman Bilan/Shutterstock.com; s. 116 (elektromagnes nadprzewodnikowy) Krzysztof Rogacki, (tradycyjny elektromagnes) Krzysztof Rogacki, (prądnice) Krzysztof Rogacki; s. 118 (silnik elektryczny) loraks/Shutterstock.com; s. 120 (wnętrze dłoni) Hafidziqram/Shutterstock.com, (grzbiet dłoni) Purple Clouds/Shutterstock.com; s. 121 (sieć trakcyjna) PhotoRK/Shutterstock.com; s. 122 (wnętrze silnika) CyrilLutz/Shutterstock.com; s. 123 (silnik elektryczny z baterii) Wojciech Wójtowicz/WSiP, (działanie silnika elektrycznego) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 126 (wnętrze tokamaka) dani3315/Shutterstock.com, (przewód) Emil Timplaru/Shutterstock.com; s. 127 (dłoń) Purple Clouds/Shutterstock.com; s. 128 (drukarka) www.matthews.com.au, (dłoń) Purple Clouds/Shutterstock.com; s. 129 (ślady cząstek) CERN; s. 130 (materia wyrzucana ze Słońca, Ziemia) NASA/GSFC/SDO; s. 132 (kompas na mapie) DaLiu/Shutterstock.com, (linie pola magnetycznego Ziemi) Magnetic field/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 133 (położenie bieguna magnetycznego) Peter Hermes Furianpryzmat/Shutterstock.com, (pole magnetyczne Słońca) Solar Dynamics Observatory/NASA; s. 134 (magnetosfera Ziemi) daulon/Shutterstock.com; s. 135 (pasy Van Allena) NASA, (zorza polarna) World_photographer/Shutterstock.com; s. 136 (wybuch na Słońcu) SOHO/ESA/NASA; s. 137 (Marek Kamiński) Wojciech Moskal/Forum, (sawanna) Byelikova_Oksana/iStockphoto/Getty Images; s. 138–139 (zorza polarna) V. Belov/Shutterstock.com, (zorza wokół bieguna południowego) Aurora-australis-Antarctica-NASA, (zorza widoczna z ISS) NASA, (zorza na Saturnie) VIMS Team, U. Arizona, U. Leicester, JPL, ASI, NASA, (zorza w Polsce) Piotr Jaczewski/Moment RF/Getty Images; s. 140 (budowa wiatraka) andrea crisante/Shutterstock.com, (laboratorium Faradaya) RYI/Science Photo Library/East News, (schemat doświadczenia Faradaya) The Print Collector/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 141 (wzbudzanie prądu w zwojnicy) Wojciech Wójtowicz/WSiP, (poruszanie zwojnicą) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 143 (wykład Faradaya) RYI/Science Photo Library/East News; s. 145 (ładowanie indukcyjne) JV Designs/Shutterstock.com; s. 147 (gotowanie na kuchence indukcyjnej) LNataly/Shutterstock.com; s. 148 (doświadczenie z rurką plastikową) Wojciech Wójtowicz/WSiP, (doświadczenie z rurką miedzianą) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 151 (radio) Science Museum/SSPL/Forum, (wiatraczek z diodą) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 152 (zewnętrzna część prądnicy) Marcin Hołubowicz/Agencja Gazeta; s. 153 (wzbudzanie prądu w zwojnicy) Wojciech Wójtowicz/WSiP, (hamowanie magnesu w rurce) Wojciech Wójtowicz/WSiP; s. 154 (elektrownia w Żarnowcu) Wojcik Wojciech/BE&W; s. 155 (pociąg) Denis Belitsky/Shutterstock.com; s. 157 (oscyloskop) Lyroky/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 162 (woltomierz); s. 163 (transformatory) MISS KANITHAR AIUMLA-OR/Shutterstock.com, (wnętrze transformatora) Olekcii Mach/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 166 (transformator na słupie energetycznym) rzelich/iStockphoto/Getty Images; s. 167 (Tesla) Wikipedia [Public Domain], (Edison) Public Domain; s. 174 (amperomierz) Mega Pixel/Shutterstock.com; s. 175 (wyświetlacz LED) Misunseo/Shutterstock.com; s. 176 (anteny) Eric Strand/Shutterstock.com; s. 178–179 (beczka) Dirk Ercken/Shutterstock.com, (rentgen czaszki) itsmejust/Shutterstock.com, (solarium) Piotr Latacha/Shutterstock.com, (soczewka obiektywu) igorlale/Shutterstock.com, (pilot) rangizzz/Shutterstock.com, (płomienie) LianeM/Shutterstock.com, (radioteleskop w Piwnicach) Dariusz Bednarek/BE&W, (radar) John Roman Images/Shutterstock.com, (kobieta z telefonem) Yuri Shevtsov/Shutterstock.com, (monitor) Franck Boston/Shutterstock.com, (radioteleskopy) cbpix/Shutterstock.com; s. 180 (mapa radarowa chmur) Adrian Bergiel (WSiP), s. 181 (pralka) Joseph Giacomin/www.imagesource.com/BE&W; s. 182 (zdjęcie twarzy) Ludwik Lehman; s. 183 (rentgen obrazu), (obraz); s. 184–185 (Słońce gołym okiem) Tomasz Mrozek, (Słońce dla $\lambda = 30$ nm) Tomasz Mrozek, (Słońce dla $\lambda = 17$ nm) Tomasz Mrozek, (Słońce dla $\lambda = 9$ nm) Tomasz Mrozek, (Słońce dla $\lambda = 2$ cm) Tomasz Mrozek; s. 187 (promienie) delphinae/Shutterstock.com, (światło po przejściu przez pryzmat) ALFRED PASIEKA/SCIENCE PHOTO LIBRARY/East News, (płyta CD) Galushko Sergey/Shutterstock.com; s. 188 (żarówki) Chones/Shutterstock.com; s. 190 (obraz termowizyjny komina) Ivan Smuk/Shutterstock.com, (widmo żarówki energooszczędnej) Ariel Majcher/WSiP; s. 191 (widmo Słońca); s. 192 (schemat powstawania widma absorpcyjnego); s. 195 (widmo w gwiazdozbiorze Łabędzia); s. 196 (oświetlone drzewo) Igor Sirbu/Shutterstock.com, (Einstein); s. 200 (krajobraz) a4ndreas/Shutterstock.com, (liść) irin-k/Shutterstock.com; s. 201 (żarówka) backUp/Shutterstock.com, (laser) Doug McLean/Shutterstock.com; s. 202 (krasnorost) F.Neidl/Shutterstock.com; s. 203 (światło lasera) Doug McLean/Shutterstock.com, (atomy krzemu) Franz Giessibl/The University of Utah; s. 212 (bryła krzemu i blachy) Bjorn Wylezich/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 219 (diody) schlyx/Shutterstock.com, (diody półprzewodnikowe) Sergiy Kuzmin/Shutterstock.com; s. 221 (dioda stosowana w prostowniku) Oleksandr Lysenko/Shutterstock.com; s. 223 (lampa LED) eightstock/Shutterstock.com; s. 225 (tranzystor na płytce) Richard McDowell/Alamy Stock Photo/BE&W, (tranzystory) a_v_d/Shutterstock.com, (tranzystory pod mikroskopem) IBM RESEARCH/Science Photo Library/East News; s. 229 (współczesna kabina motorniczego) ymgerman/Shutterstock.com, (stara kabina motorniczego) Jackson Stock Photography/Shutterstock.com; s. 230 (procesor) Volodymyr Krasyuk/Shutterstock.com; s. 232 (skaner kodów kreskowych) Bacho/Shutterstock.com; s. 235 (fotooporniki) Vera Aksionava/Shutterstock.com; s. 236 (tramwaj wodny) Tytus Żmijewski/PAP; s. 238 (pacjentka) Elnur/Shutterstock.com;

s. 245 (badanie) Mark_Kostich/Shutterstock.com; s. 246 (jądro atomowe) Rost9/Shutterstock.com; s. 251 (znak radioaktywności) fewerton/Shutterstock.com; s. 253 (ślady cząsteczek alfa) Science Photo Library/East News; s. 256 (płyta ołowiana) Sebastian Kaulitzki/Shutterstock.com; s. 258 (laptop) andersphoto/Shutterstock.com; s. 259 (rzut monetą) Alexey Stiop/Shutterstock.com; s. 263 (rozpad plutonu) US Department of Energy/Wikipedia [Public Domain]; s. 264 (sonda Voyager) NASA; s. 266 (licznik Geigera) Photosite/Shutterstock.com, (krzemian uranylu) Andrew Silver/USGS/Wikipedia [Public Domain]; s. 267 (wody radoczynne) ALLTRAVEL/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 269 (czujnik dymu) tanikewak/Shutterstock.com; s. 270 (pręty paliwowe) RIA NOVOSTI/SCIENCE PHOTO LIBRARY/East News; s. 272 (badanie) Mark_Kostich/Shutterstock.com; s. 273 (nosorożec włochaty) Grzegorz Kozakiewicz/Forum; s. 274 (Ötzi) Gianni GIANSANTI/Gamma-Rapho/Getty Images, (całun turyński) Diego Barbieri/Shutterstock.com; s. 275 (zdjęcie z badania PET) Steven Needell/SCIENCE SOURCE/BE&W, (przygotowanie pacjenta do radioterapii) Mark_Kostich/Shutterstock.com; s. 276–277 (prześwietlenie całego ciała) VOLKER STEGER/Science Photo Library/Easy News, (prześwietlenie głowy) CNRI/SCIENCE PHOTO LIBRARY/East News, (scyntygram płuc) SFR/Science Photo Library/East News, (scyntygram raka wątroby) NEIL M. BORDEN/ Living Art Enterprises/SCIENCE SOURCE/BE&W, (badanie NMR) alexptv/Shutterstock.com, (rentgen kolana) Martin D. Vonka/Shutterstock.com, (prześwietlenie bagażu) Khafizov Ivan Harisovich/Shutterstock.com; s. 279 (ziemniak nienapromieniowany) Ruslan Kudrin/Shutterstock.com, (ziemniak napromieniowany) Nattika/Shutterstock.com; s. 281 (kule bilardowe) ThamKC/Shutterstock.com; s. 285 (waga) Africa Studio/Shutterstock.com; s. 286 (kamień) chittakorn59/Shutterstock.com; s. 290 (kostki z symbolem uranu) Dmitry Demidovich/Shutterstock.com; s. 293 (wybuch bomby jądrowej) Science History Images/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 295 (panel sterowania reaktora jądrowego) Nordroden/Shutterstock.com; s. 296 (fabryka wzbogacania uranu) United States Department of Energy/Wikipedia, (pręty paliwowe) Bloomberg/Contributor/Getty Images, (reaktor wodny) Uli Deck/DPA/ZUMAPRESS.com/BE&W; s. 297 (schemat budowy reaktora wodnego) Maciej Tomala; s. 298 (reaktor Maria) PAP/Tomasz Paczos; s. 300 (chłodnie kominowe) TTstudio/Shutterstock.com, (elektrownia) engel.ac/Shutterstock.com; s. 301 (schemat budowy reaktora wodnego) Maciej Tomala; s. 302 (wymiana prętów paliwowych) George Rinhart/Corbis Historical/Getty Images, (pojemnik z odpadami promieniotwórczymi) Miguel Villagran/Getty Images, s. 304 (okręt podwodny) Bborriss/iStockphoto/Getty Images; s. 305 (kopalnia uranu) JohnCarnemolla/iStockphoto/Getty Images, (zakład przetwarzania uranu) Paolo KOCH/GAMMA RAPHO/Getty Images, (fabryka wzbogacania uranu) Caren Firouz/REUTERS/Forum, (elektrownia jądrowa) Aerial Archives/Alamy/BE&W, (składowisko odpadów promieniotwórczych) Matthias Graben/BE&W; s. 306 (synteza jądrowa) xello/Shutterstock.com; s. 311 (plazma) EFDA-JET/SCIENCE PHOTO LIBRARY/East News, (bomba termojądrowa) HEW Archive; s. 313 (Droga Mleczna) Denis Belitsky/Shutterstock.com; s. 314–315 (Mgławica Carina) European Southern Observatory, (Wielka Mgławica w Orionie) NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team, (powstające gwiazdy) C.R. O'Dell/Rice University; NASA, (gwiazda TYC 8998-760-1 i dwie planety) ESO/Bohn et al.; s. 301 (budowa Słońca) Sahara Prince/Shutterstock.com; s. 318–319 (mgławica planetarna NGC 7293) NASA, ESA, and C.R. O'Dell (Vanderbilt University), (mgławica planetarna Kohoutek) NASA, (mgławica – gwiezdny żłobek) Hui Yang University of Illinois/NASA, (LH 95) NASA, (błękitny nadolbrzym) Kryptid/Wikipedia [Public Domain], (SN19871) JPL/NASA, (czarna dziura) bluecrayola/Shutterstock.com, (Ziemia z kosmosu) Evstigneev Alexander/Shutterstock.com; s. 321 (supernowa) Antrakt2/Shutterstock.com, (mgławica Krab) NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University); s. 322 (biały karzeł ściągający materię) ESA and Justyn R. Maund (University of Cambridge); s. 323 (supernowa w NGC 4526) NASA/ESA, The Hubble Key Project Team and The High-Z Supernova Search Team, (pozostałość po supernowej z 1604 r.) NASA/ESA/JHU/R.Sankrit & W.Blair/Wikipedia; s. 324 (Betelgeza) ESO/M. Montargès et al.; s. 326 (czarna dziura) EHT/ESO; s. 327 (zderzenie czarnych dziur) PAP/Newscom/SXS; s. 328 (zakrzywienie czasoprzestrzeni) vchal/Shutterstock.com; s. 335, 336, 337 (balony) ChrisGorgio/iStockphoto/Getty Images; s. 337 (kątomierz) Les Perysty/Shutterstock.com; s. 338 (baterie) MarySan/Shutterstock.com, (amperomierz) connect11/iStockphoto/Getty Images, (akumulator) Olga Kurguzova/Shutterstock.com; s. 344 (dynamo) mts-profex.pl, (dioda) Cristian Storto/Shutterstock.com; s. 345 (dynamo) mts-profex.pl; s. 355 (lampa jarzeniowa) AstridSinai/Shutterstock.com; s. 356 (promieniowanie X) Carlos Camara and Juan Escobar; s. 359 (bryła rudy uranowej z uranofanem) MarcelC/iStockphoto/Getty Images, (bryła uranium) CUTWORLD/iStockphoto/Getty Images; s. 360 (wzbogacony uran) RHJ/iStockphoto/Getty Images; s. 362 (Dirac) Pictorial Press Ltd/Alamy Stock Photo/BE&W; s. 363 (aparatura w CERN) Brice, Maximilien/CERN

**Pozostałe ilustracje:** MathMaster 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. $27^1$ 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.

# UKŁAD OKRESOWY PIERWIASTKÓW




| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,0079 $^{1}$H 99,99% $^{2}$D 0,01% $^{3}$T<br>$_{1}$H<br>wodór | | | | | | | | | | | | | | | | | 4,0026 $^{3}$He 0,001% $^{4}$He 99,99%<br>$_{2}$He<br>hel |
| 2 | 6,941 $^{6}$Li 7,59% $^{7}$Li 92,41%<br>$_{3}$Li<br>lit | 9,0122 $^{9}$Be 100%<br>$_{4}$Be<br>beryl | | | | | | | | | | | 10,811 $^{10}$B 19,9% $^{11}$B 80,1%<br>$_{5}$B<br>bor | 12,011 $^{12}$C 98,93% $^{13}$C 1,07% $^{14}$C<br>$_{6}$C<br>węgiel | 14,007 $^{14}$N 99,64% $^{15}$N 0,36%<br>$_{7}$N<br>azot | 15,999 $^{16}$O 99,76% $^{17}$O 0,04% $^{18}$O 0,2%<br>$_{8}$O<br>tlen | 18,998 $^{19}$F 100%<br>$_{9}$F<br>fluor | 20,180 $^{20}$Ne 90,48% $^{21}$Ne 0,27% $^{22}$Ne 9,25%<br>$_{10}$Ne<br>neon |
| 3 | 22,990 $^{23}$Na 100%<br>$_{11}$Na<br>sód | 24,305 $^{24}$Mg 78,99% $^{25}$Mg 10,00% $^{26}$Mg 11,01%<br>$_{12}$Mg<br>magnez | | | | | | | | | | | 26,982 $^{27}$Al 100%<br>$_{13}$Al<br>glin | 28,086 $^{28}$Si 92,22% $^{29}$Si 4,69% $^{30}$Si 3,09%<br>$_{14}$Si<br>krzem | 30,974 $^{31}$P 100%<br>$_{15}$P<br>fosfor | 32,065 $^{32}$S 94,99% $^{33}$S 0,75% $^{34}$S 4,25% $^{36}$S 0,01%<br>$_{16}$S<br>siarka | 35,453 $^{35}$Cl 75,76% $^{37}$Cl 24,24%<br>$_{17}$Cl<br>chlor | 39,948 $^{36}$Ar 0,34% $^{38}$Ar 0,06% $^{40}$Ar 99,60%<br>$_{18}$Ar<br>argon |
| 4 | 39,098 $^{39}$K 93,26% $^{40}$K 0,01% $^{41}$K 6,73%<br>$_{19}$K<br>potas | 40,078 $^{40}$Ca 96,941% $^{42}$Ca 0,647% $^{43}$Ca 0,135% $^{44}$Ca 2,086% $^{46}$Ca 0,004% $^{48}$Ca 0,187%<br>$_{20}$Ca<br>wapń | 44,956 $^{45}$Sc 100%<br>$_{21}$Sc<br>skand | 47,867 $^{46}$Ti 8,25% $^{47}$Ti 7,44% $^{48}$Ti 73,72% $^{49}$Ti 5,41% $^{50}$Ti 5,18%<br>$_{22}$Ti<br>tytan | 50,942 $^{50}$V 0,25% $^{51}$V 99,75%<br>$_{23}$V<br>wanad | 51,996 $^{50}$Cr 4,35% $^{52}$Cr 83,79% $^{53}$Cr 9,50% $^{54}$Cr 2,36%<br>$_{24}$Cr<br>chrom | 54,938 $^{55}$Mn 100%<br>$_{25}$Mn<br>mangan | 55,845 $^{54}$Fe 5,85% $^{56}$Fe 91,75% $^{57}$Fe 2,12% $^{58}$Fe 0,28%<br>$_{26}$Fe<br>żelazo | 58,933 $^{59}$Co 100%<br>$_{27}$Co<br>kobalt | 58,693 $^{58}$Ni 68,08% $^{60}$Ni 26,22% $^{61}$Ni 1,14% $^{62}$Ni 3,63% $^{64}$Ni 0,93%<br>$_{28}$Ni<br>nikiel | 63,546 $^{63}$Cu 69,15% $^{65}$Cu 30,85%<br>$_{29}$Cu<br>miedź | 65,38 $^{64}$Zn 48,27% $^{66}$Zn 27,98% $^{67}$Zn 4,10% $^{68}$Zn 19,02% $^{70}$Zn 0,63%<br>$_{30}$Zn<br>cynk | 69,723 $^{69}$Ga 60,11% $^{71}$Ga 39,89%<br>$_{31}$Ga<br>gal | 72,64 $^{70}$Ge 20,38% $^{72}$Ge 27,31% $^{73}$Ge 7,76% $^{74}$Ge 36,72% $^{76}$Ge 7,83%<br>$_{32}$Ge<br>german | 74,922 $^{75}$As 100%<br>$_{33}$As<br>arsen | 78,96 $^{74}$Se 0,89% $^{76}$Se 9,37% $^{77}$Se 7,63% $^{78}$Se 23,77% $^{80}$Se 49,61% $^{82}$Se 8,73%<br>$_{34}$Se<br>selen | 79,904 $^{79}$Br 50,69% $^{81}$Br 49,31%<br>$_{35}$Br<br>brom | 83,798 $^{78}$Kr 0,35% $^{80}$Kr 2,28% $^{82}$Kr 11,59% $^{83}$Kr 11,50% $^{84}$Kr 56,98% $^{86}$Kr 17,27%<br>$_{36}$Kr<br>krypton |
| 5 | 85,468 $^{85}$Rb 72,17% $^{87}$Rb 27,83%<br>$_{37}$Rb<br>rubid | 87,62 $^{84}$Sr 0,56% $^{86}$Sr 9,86% $^{87}$Sr 7,00% $^{88}$Sr 82,58%<br>$_{38}$Sr<br>stront | 88,906 $^{89}$Y 100%<br>$_{39}$Y<br>itr | 91,224 $^{91}$Zr 51,45% $^{92}$Zr 11,22% $^{94}$Zr 17,15% $^{96}$Zr 17,38% $^{96}$Zr 2,80%<br>$_{40}$Zr<br>cyrkon | 92,906 $^{93}$Nb 100%<br>$_{41}$Nb<br>niob | 95,96 $^{92}$Mo 14,77% $^{94}$Mo 9,23% $^{95}$Mo 15,90% $^{96}$Mo 16,68% $^{97}$Mo 9,56% $^{98}$Mo 24,19% $^{100}$Mo 9,67%<br>$_{42}$Mo<br>molibden | 97,907 (98) $^{97}$Tc $^{96}$Tc $^{99}$Tc<br>$_{43}$Tc<br>technet | 101,07 $^{96}$Ru 5,54% $^{98}$Ru 1,87% $^{99}$Ru 12,76% $^{100}$Ru 12,60% $^{101}$Ru 17,06% $^{102}$Ru 31,55% $^{104}$Ru 18,62%<br>$_{44}$Ru<br>ruten | 102,906 $^{103}$Rh 100%<br>$_{45}$Rh<br>rod | 106,42 $^{102}$Pd 1,02% $^{104}$Pd 11,14% $^{105}$Pd 22,33% $^{106}$Pd 27,33% $^{108}$Pd 26,46% $^{110}$Pd 11,72%<br>$_{46}$Pd<br>pallad | 107,868 $^{107}$Ag 51,84% $^{109}$Ag 48,16%<br>$_{47}$Ag<br>srebro | 112,411 $^{106}$Cd 1,25% $^{108}$Cd 0,89% $^{110}$Cd 12,49% $^{111}$Cd 12,80% $^{112}$Cd 24,13% $^{113}$Cd 12,22% $^{114}$Cd 28,73% $^{116}$Cd 7,49%<br>$_{48}$Cd<br>kadm | 114,818 $^{113}$In 4,29% $^{115}$In 95,71%<br>$_{49}$In<br>ind | 118,710 $^{112}$Sn 0,97% $^{114}$Sn 0,66% $^{115}$Sn 0,34% $^{116}$Sn 14,54% $^{117}$Sn 7,68% $^{118}$Sn 24,22% $^{119}$Sn 8,59% $^{120}$Sn 32,58% $^{122}$Sn 4,63% $^{124}$Sn 5,79%<br>$_{50}$Sn<br>cyna | 121,760 $^{121}$Sb 57,21% $^{123}$Sb 42,79%<br>$_{51}$Sb<br>antymon | 127,60 $^{120}$Te 0,09% $^{122}$Te 2,55% $^{123}$Te 0,89% $^{124}$Te 4,74% $^{125}$Te 7,07% $^{126}$Te 18,84% $^{128}$Te 31,74% $^{130}$Te 34,08%<br>$_{52}$Te<br>tellur | 126,904 $^{127}$I 100%<br>$_{53}$I<br>jod | 131,293 $^{124}$Xe 0,09% $^{126}$Xe 0,09% $^{128}$Xe 1,91% $^{129}$Xe 26,40% $^{130}$Xe 4,07% $^{131}$Xe 21,23% $^{132}$Xe 26,91% $^{134}$Xe 10,44% $^{136}$Xe 8,86%<br>$_{54}$Xe<br>ksenon |
| 6 | 132,905 $^{133}$Cs 100%<br>$_{55}$Cs<br>cez | 137,327 $^{130}$Ba 0,11% $^{132}$Ba 0,10% $^{134}$Ba 2,42% $^{135}$Ba 6,59% $^{136}$Ba 7,85% $^{137}$Ba 11,23% $^{138}$Ba 71,70%<br>$_{56}$Ba<br>bar | 138,905 $^{138}$La 0,09% $^{139}$La 99,91%<br>$_{57}$La<br>lantan | 178,49 $^{174}$Hf 0,16% $^{176}$Hf 5,26% $^{177}$Hf 18,60% $^{178}$Hf 27,28% $^{179}$Hf 13,62% $^{180}$Hf 35,08%<br>$_{72}$Hf<br>hafn | 180,948 $^{180}$Ta 0,01% $^{181}$Ta 99,99%<br>$_{73}$Ta<br>tantal | 183,84 $^{180}$W 0,12% $^{182}$W 26,50% $^{183}$W 14,31% $^{184}$W 30,64% $^{186}$W 28,43%<br>$_{74}$W<br>wolfram | 186,207 $^{185}$Re 37,40% $^{187}$Re 62,60%<br>$_{75}$Re<br>ren | 190,23 $^{184}$Os 0,02% $^{186}$Os 1,59% $^{187}$Os 1,96% $^{188}$Os 13,24% $^{189}$Os 16,15% $^{190}$Os 26,26% $^{192}$Os 40,78%<br>$_{76}$Os<br>osm | 192,217 $^{191}$Ir 37,3% $^{193}$Ir 62,7%<br>$_{77}$Ir<br>iryd | 195,084 $^{190}$Pt 0,01% $^{192}$Pt 0,78% $^{194}$Pt 32,97% $^{195}$Pt 33,83% $^{196}$Pt 25,24% $^{198}$Pt 7,16%<br>$_{78}$Pt<br>platyna | 196,967 $^{197}$Au 100%<br>$_{79}$Au<br>złoto | 200,59 $^{196}$Hg 0,15% $^{198}$Hg 9,97% $^{199}$Hg 16,87% $^{200}$Hg 23,10% $^{201}$Hg 13,18% $^{202}$Hg 29,86% $^{204}$Hg 6,87%<br>$_{80}$Hg<br>rtęć | 204,383 $^{203}$Tl 29,52% $^{205}$Tl 70,48%<br>$_{81}$Tl<br>tal | 207,2 $^{204}$Pb 1,4% $^{206}$Pb 24,1% $^{207}$Pb 22,1% $^{208}$Pb 52,4%<br>$_{82}$Pb<br>ołów | 208,98 $^{209}$Bi 100%<br>$_{83}$Bi<br>bizmut | 209,982 (209) $^{209}$Po $^{210}$Po<br>$_{84}$Po<br>polon | 210,987 (210) $^{210}$At $^{211}$At<br>$_{85}$At<br>astat | 222,017 (222) $^{219}$Rn $^{220}$Rn $^{222}$Rn<br>$_{86}$Rn<br>radon |
| 7 | 223,020 $^{223}$Fr<br>$_{87}$Fr<br>frans | 226,025 (226) $^{223}$Ra $^{224}$Ra $^{226}$Ra $^{228}$Ra<br>$_{88}$Ra<br>rad | 227,028 $^{227}$Ac<br>$_{89}$Ac<br>aktyn | 265,117 $^{265}$Rf<br>$_{104}$Rf<br>rutherford | 268,125 $^{268}$Db<br>$_{105}$Db<br>dubn | 271,133 $^{271}$Sg<br>$_{106}$Sg<br>seaborg | 272,138 $^{272}$Bh<br>$_{107}$Bh<br>bohr | 270,135 $^{270}$Hs<br>$_{108}$Hs<br>has | 276,151 $^{276}$Mt<br>$_{109}$Mt<br>meitner | 281,162 $^{281}$Ds<br>$_{110}$Ds<br>darmstadt | 280,164 $^{280}$Rg<br>$_{111}$Rg<br>roentgen | 285,174 $^{285}$Cn<br>$_{112}$Cn<br>kopernik | 286 Nh<br>$_{113}$Nh<br>nihon | 289 Fl<br>$_{114}$Fl<br>flerow | 289 Mc<br>$_{115}$Mc<br>moscow | 292 Lv<br>$_{116}$Lv<br>liwermor | 293 Ts<br>294 Ts<br>$_{117}$Ts<br>tenes | 294 Og<br>$_{118}$Og<br>oganeson |

| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 140,116 $^{136}$Ce 0,19% $^{138}$Ce 0,25% $^{140}$Ce 88,45% $^{142}$Ce 11,11%<br>$_{58}$Ce<br>cer | 140,907 $^{141}$Pr 100%<br>$_{59}$Pr<br>prazeodym | 144,242 $^{142}$Nd 27,2% $^{143}$Nd 12,2% $^{144}$Nd 23,8% $^{145}$Nd 8,3% $^{146}$Nd 17,2% $^{148}$Nd 5,7% $^{150}$Nd 5,6%<br>$_{60}$Nd<br>neodym | 144,913 (145) $^{145}$Pm $^{147}$Pm<br>$_{61}$Pm<br>promet | 150,36 $^{144}$Sm 3,07% $^{147}$Sm 14,99% $^{148}$Sm 11,24% $^{149}$Sm 13,82% $^{150}$Sm 7,38% $^{152}$Sm 26,75% $^{154}$Sm 22,75%<br>$_{62}$Sm<br>samar | 151,964 $^{151}$Eu 47,81% $^{153}$Eu 52,19%<br>$_{63}$Eu<br>europ | 157,25 $^{152}$Gd 0,20% $^{154}$Gd 2,18% $^{155}$Gd14,80% $^{156}$Gd 20,47% $^{157}$Gd 15,65% $^{158}$Gd 24,84% $^{160}$Gd 21,86%<br>$_{64}$Gd<br>gadolin | 158,925 $^{159}$Tb 100%<br>$_{65}$Tb<br>terb | 162,50 $^{156}$Dy 0,06% $^{158}$Dy 0,09% $^{160}$Dy 2,33% $^{161}$Dy 18,89% $^{162}$Dy 25,48% $^{163}$Dy 24,89% $^{164}$Dy 28,26%<br>$_{66}$Dy<br>dysproz | 164,93 $^{165}$Ho 100%<br>$_{67}$Ho<br>holm | 167,259 $^{162}$Er 0,14% $^{164}$Er 1,60% $^{166}$Er 33,50% $^{167}$Er 22,87% $^{168}$Er 26,98% $^{170}$Er 14,91%<br>$_{68}$Er<br>erb | 168,934 $^{169}$Tm 100%<br>$_{69}$Tm<br>tul |
| 7 | 232,038 $^{230}$Th $^{232}$Th 100%<br>$_{90}$Th<br>tor | 231,036 $^{231}$Pa 100%<br>$_{91}$Pa<br>protaktyn | 238,029 $^{233}$U $^{234}$U 0,005% $^{235}$U 0,720% $^{236}$U $^{238}$U 99,274%<br>$_{92}$U<br>uran | 237,048 (237) $^{236}$Np $^{237}$Np<br>$_{93}$Np<br>neptun | 244,064 (244) $^{236}$Pu $^{238}$Pu $^{240}$Pu $^{241}$Pu $^{242}$Pu $^{244}$Pu<br>$_{94}$Pu<br>pluton | 243,061 (243) $^{241}$Am $^{243}$Am<br>$_{95}$Am<br>ameryk | 247,070 (247) $^{243}$Cm $^{244}$Cm $^{245}$Cm $^{246}$Cm $^{247}$Cm $^{248}$Cm<br>$_{96}$Cm<br>kiur | 247,070 (247) $^{247}$Bk $^{248}$Bk<br>$_{97}$Bk<br>berkel | 251,080 (251) $^{248}$Cf $^{250}$Cf $^{251}$Cf $^{252}$Cf<br>$_{98}$Cf<br>kaliforn | 252,083 $^{252}$Es<br>$_{99}$Es<br>einstein | 257,095 $^{257}$Fm<br>$_{100}$Fm<br>ferm | 258,098 (258) $^{258}$Md $^{260}$Md<br>$_{101}$Md<br>mendelew | 259,101 $^{259}$No<br>$_{102}$No<br>nobel | 262,109 $^{262}$Lr<br>$_{103}$Lr<br>lorens |

| | 16 | 17 | 18 |
|---|---|---|---|
| 6 | 173,054 $^{168}$Yb 0,13% $^{170}$Yb 3,04% $^{171}$Yb 14,28% $^{172}$Yb 21,83% $^{173}$Yb 16,13% $^{174}$Yb 31,83% $^{176}$Yb 12,76%<br>$_{70}$Yb<br>iterb | 174,97 $^{175}$Lu 97,41% $^{176}$Lu 2,59%<br>$_{71}$Lu<br>lutet | |
| 7 | | | |

metale

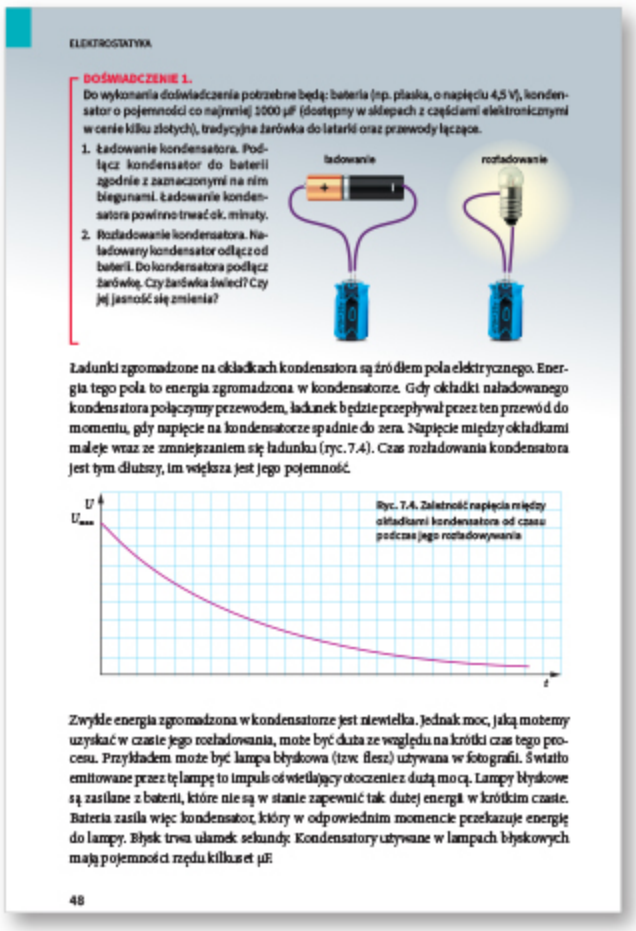
niemetale

[1] W przypadku pierwiastków, dla których istnieją tylko izotopy otrzymane sztucznie, podano masę najbardziej stabilnego izotopu, a w nawiasie – liczbę masową tego izotopu.
[2] W układzie okresowym wypisano tylko niektóre izotopy otrzymane sztucznie. W laboratoriach wytwarza się dużo więcej izotopów.

# FIZYKA

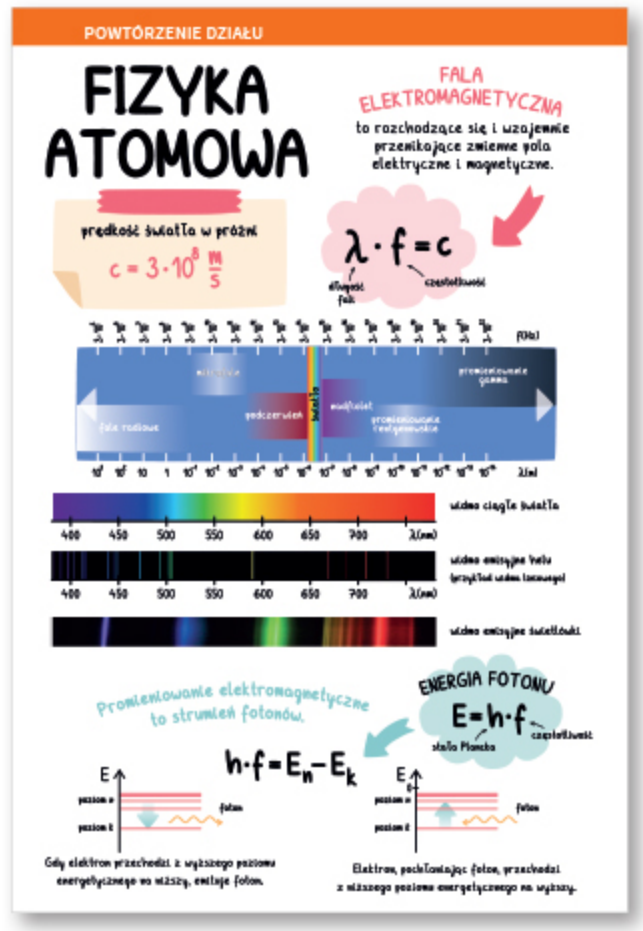
## ZAKRES PODSTAWOWY

**NOWA EDYCJA** | **PODRĘCZNIK • LICEUM I TECHNIKUM**




Proste **doświadczenia** i rozwiązane **przykłady** pomagają w samodzielnej nauce.

**Pytania i zadania** pomagają wyćwiczyć **umiejętności** wymagane przez podstawę programową.




**Powtórzenia działów** w formie skecznotek wspierają utrwalenie wiadomości.

# Aktywuj E-book

(cyfrowe odzwierciedlenie podręcznika) na

EDURANGA

Zeskanuj kod

WSiP | wsip.pl
sklep.wsip.pl
infolinia: 801 220 555

EDURANGA

ORKE
orke.pl